

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

**Audrius Švėgžda**

**MECHANINIŲ IR DEFORMAVIMO DIAGRAMOS**  
**CHARAKTERISTIKŲ PRIKLAUSOMYBIŲ NUSTATYMAS BŪDINGAME**  
**INTERVALE**

Magistro baigiamasis darbas

**Šiauliai, 2013**

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

**MECHANINIŲ IR DEFORMAVIMO DIAGRAMOS**  
**CHARAKTERISTIKŲ PRIKLAUSOMYBIŲ NUSTATYMAS**  
**BŪDINGAME INTERVALE**

Magistro baigiamasis darbas

**Autorius – Audrius Švėgžda (MM-11 gr.)**

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

**Recenzentas – Prof. habil. dr. Jonas Bareišis**

**Katedros vedėjas – doc. dr. A. 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) Audriui Švėgždai (MM-11 gr.)

Darbo tema Mechaninių ir deformavimo diagramos charakteristikų priklausomybių nustatymas būdingame intervale

Patvirtinta 20\_\_m. \_\_\_\_\_ mėn. \_\_d. fakulteto dekanı potvarkiu Nr. \_\_\_\_\_.

1. Darbo tikslas

Nustatyti legiruotųjų konstrukcinių plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų mechaninių ir deformavimo diagramos 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. Aprašyti būdingo intervalo pagal mechanines charakteristikas nustatymą kambario ir aukštesnėje temperatūroje.  
Trečias skyrius. Deformavimo parametrų ir modifikuoto plastiškumo kriterijaus statistinė analizė būdingame intervale. Nustatyti mažaciklio deformavimo ir mechaninių charakteristikų tarpusavio analitinių priklausomybių koeficientus.  
Atlikti medžiagų deformavimo charakteristikų pagal modifikuoto plastiškumo kriterijų kambario ir aukštesnėje temperatūroje palyginimą tarp būdingo intervalo duomenų ir bendrų plienų, suvirinimo siūlių medžiagų grupių duomenų.

Darbo pateikimo terminas 20\_\_m. \_\_\_\_\_ mėn. \_\_d.

Užduotį gavau Audrius Švėgžda

(magistranto vardas, pavardė)

\_\_\_\_\_  
(parašas, data)

Vadovas lekt. dr. Agnė Stulpinaitė

(pareigos, vardas, pavardė)

\_\_\_\_\_  
(parašas, data)

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

Audrius Švėgžda. MECHANINIŲ IR DEFORMAVIMO DIAGRAMOS  
CHARAKTERISTIKŲ PRIKLAUSOMYBIŲ NUSTATYMAS BŪDINGAME  
INTERVALE. Magistranto baigiamasis darbas / vadovas lekt. dr. Agnė Stulpinaitė.

**SANTRAUKA**

Magistriniame darbe nustatytos legiruotųjų konstrukcinių plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų mechaninių ir deformavimo diagramos charakteristikų  $A_1$ ,  $\alpha$ ,  $\sigma_T$  priklausomybės būdingame intervale kambario ir aukštesnėje temperatūroje. Nuosekli statistinė analizė parodė, kad duomenys yra atsitiktiniai, nepriklausomi bei pasiskirstę pagal normalųjį dėsnį, o atlikta tyrimo rezultatų koreliacinė ir regresinė analizė, kad tarp daugumos medžiagų grupių deformavimo diagramos charakteristikų ir modifikuoto plastiškumo kriterijaus egzistuoja reikšmingas tiesinis koreliacinis ryšys. Darbe ciklinėms deformavimo diagramos charakteristikoms pagal mechanines savybes nustatyti, buvo apskaičiuoti analitinių priklausomybių koeficientai, bei patikrintas regresijos lygčių adekvatumas. Nustatant deformavimo diagramos charakteristikų reikšmes nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus nustatytame būdingame intervale gaunami tikslesni rezultatai, nes daugumai skaičiuotų ir eksperimentinių charakteristikų rezultatų sklaida intervaluose yra mažesnė lyginant su bendrų plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų grupių rezultatų sklaida. Darbe pasiūlyti tiesinės priklausomybės koeficientai nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus, gali būti pritaikyti nustatant preliminarų inžinerijos šakose (energetikoje, naftoje) dirbančių mašinų ilgalaikiškumą, atsižvelgiant į jų eksploatacijos aplinką, darbo temperatūrą, naudojamas medžiagas.

Magistrinio darbo tema buvo skaitoma ir aptarta 2013 m. gegužės 15 d. Šiaulių universiteto Technologijos fakulteto 8-oje Tarptautinėje mokslinėje konferencijoje „Jaunųjų mokslininkų darbai“.

**Reikšminiai žodžiai:** mažaciklis, deformavimo charakteristikos, mechaninės charakteristikos, modifikuoto plastiškumo kriterijus, ilgalaikiškumas, legiruotieji plienai, intervalas, priklausomybės.

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

Audrius Švēgžda. CYCLIC STRESS–STAIN CURVES DEPENDENCES ON MECHANICAL CHARACTERISTIC IN THE TYPICAL RANGE. Master final work / research advisor Assoc. lekt. dr. Agnė Stulpinaitė.

**SUMMARY**

In this master thesis alloy structural steels and their weld joint materials cyclic stress–stain curves parameters  $A_1$ ,  $\alpha$ ,  $s_T$  dependences on mechanical characteristic in the typical range at room and elevated temperatures are determined. Consistent statistical analysis of experimental results shown, that data is accidental, independence and normal distributed, also correlation - regression analysis shown, that almost for all groups of the materials exists a significant linear correlation between cyclic stress–stain curves parameters and modified plasticity criterion. In this final work, for parameters  $A_1$ ,  $\alpha$ ,  $s_T$  from mechanical properties to determine, was calculated analytical dependence coefficients, also regression equations adequacy was verified. Determining value of deformation parameters from modified plasticity criterion in typical range, is better way, because the results is more accurate this is because for almost all computed and experimental characteristics results dispersion in ranges are lower comparing with total groups of alloy steels and their weld joint materials results dispersion. In this master thesis are suggested linear regression coefficients from modified plasticity criterion, which can be used for preliminary evaluation of lifetime for engineering industries machines considering of their operational environment, working temperature and what materials are used for machine's construction.

Master's thesis has been read and discussed in May 15, 2013 at Siauliai University Faculty of Technology of the 8th International Scientific Conference of "Young Scientists". Cyclic stress–stain curves dependences on mechanical characteristic in the typical range.

Keywords: low cycle, stress–stain curves parameters, mechanical parameters, modified plasticity criterion, durability, alloy steels, range, dependences.

# TURINYS

LENTELĖS .....	7
PAVEIKSLAI.....	9
ĮVADAS .....	10
1. LITERATŪROS ŠALTINIŲ APŽVALGA.....	12
1.1 Ciklinis stiprumas .....	12
1.2 Mažaciklis apkrovimas eksperimentiniame tyrime .....	13
1.3 Medžiagos ir medžiagų klasifikacija .....	16
1.4 Medžiagų bandymo mašinos ir bandiniai .....	18
1.5 Deformavimo parametrų priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus. ...	22
2. DEFORMAVIMO PARAMETRŲ PRIKLAUSOMYBĖ NUO MODIFIKUOTO PLASTIŠKUMO KRITERIJAUŠ NUSTATYTAME INTERVALE .....	24
2.1 Deformavimo diagramos parametrų analizė nustatytame intervale .....	25
2.2 Nustatyto intervalo patikslinimas pagal atmestus ryškiai išsiskiriančius taškus .....	31
3. STATISTINIS STATINIŲ MECHANINIŲ IR MAŽACIKLIO DEFORMAVIMO PARAMETRŲ TIKRINIMAS	33
3.1 Mechaninių ir deformavimo parametrų bei modifikuoto plastiškumo kriterijaus duomenų atsitiktinumo ir nepriklausomumo statistinis tikrinimas .....	33
3.2 Deformavimo parametrų ir modifikuoto plastiškumo kriterijaus reikšmių pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį hipotezių tikrinimas .....	36
3.3 Tyrimo rezultatų koreliacinė – regresinė analizė .....	41
3.4 Eksperimentinių ir skaičiuotų duomenų plyginimas .....	49
IŠVADOS.....	52
LITERATŪRA .....	53
PRIEDAI .....	56
1 PRIEDAS. Legiruotųjų konstrukcinių plienų terminis apdirbimas, mechaninės, deformavimo diagramos charakteristikos kambario temp. ....	57
2 PRIEDAS. Legiruotųjų konstrukcinių plienų terminis apdirbimas, mechaninės, deformavimo diagramos charakteristikos aukštesnėje temp. ....	59
3 PRIEDAS. Legiruotųjų konstrukcinių plienų suvirinimo siūlių medžiagų terminis apdirbimas, mechaninės, deformavimo diagramos charakteristikos kamb. temp. ....	61
4 PRIEDAS. Legiruotųjų konstrukcinių plienų suvirinimo siūlių medžiagų terminis apdirbimas, mechaninės, deformavimo diagramos charakteristikos aukšt. temp.....	64

## LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Tiesinės priklausomybės deformavimo diagramos charakteristikų koeficientai nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus kambario ir aukštesnėje temperatūroje [6] .....	22
2.1 lentelė. Nustatyto intervalo reikšmės.....	25
2.2 lentelė. Atmetimo tikrinimas naudojant kvartilinį plotą.....	30
2.3 lentelė. Atmetimo tikrinimas N. Smirnovo kriterijumi .....	30
2.4 lentelė. Ryškiai išsiskiriantys duomenys .....	31
2.5 lentelė. Stačiakampės diagramos reikšmės pagal patikslintą sąlygą $(\sigma_u/\sigma_y)Z$ .....	31
2.6 lentelė. Patikslinto intervalo reikšmės .....	32
3.1 lentelė. Serijų kriterijus, naudojant medianą .....	35
3.2 lentelė. Kylančių ir krintančių serijų kriterijus .....	36
3.3 lentelė VAN metodo skaičiavimo rezultatai.....	37
3.4 lentelė. Legiruotųjų plienų aukštesnėje temperatūroje deformavimo diagramos charakteristikos $s_T$ reikšmių išdėstymo variacine seka.....	39
3.5 lentelė. Legiruotųjų plienų aukštesnėje temperatūroje deformavimo diagramos charakteristikos $s_T$ skaičiavimo rezultatai, naudojant Šapiro i Vilko kriterijų .....	39
3.6 lentelė. Suderinamumo hipotezės tikrinimo rezultatai (Kolmogorovo Smirnovo suderinamumo kriterijus, SPSS).....	40
3.7 lentelė. Pirsono koreliacijos koeficientas (Pearson Corr.) legiruotųjų plienų deformavimo parametro $A_1$ aukštesnėje temperatūroje gautas “OriginPro 8” pagalba .....	42
3.8 lentelė. Pirsono koreliacijos koeficientas .....	42
3.9 lentelė. Legiruotųjų konstrukcinių plienų modifikuoto plastiškumo ir deformavimo parametro $\alpha$ aukštesnėje temperatūroje tiesinio ryšio stiprumo vertinimas .....	43
3.10 lentelė. Legiruotųjų konstrukcinių plienų deformavimo diagramos charakteristikos $\alpha$ nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus kambario temperatūroje regresinės lygties koeficientų nustatymas .....	44
3.11 lentelė. Tiesinės regresinės lygties $y=0,09-0,073x$ , 95% prognozuojamų reikšmių pasikliautiniosios juostos ribų nustatymas, kai $t_{p,k} = 2,120$ , $p=0,05$ .....	45
3.12 lentelė. Legiruotųjų plienų deformavimo charakteristikos $\alpha$ nuo $(\sigma_u/\sigma_y)Z$ tiesinio ryšio adekvatumo tyrimas.....	47
3.13 lentelė. Tiesinio ryšio adekvatumo tyrimas (Fišerio kriterijus), su 90% tikimybe, kad regresija yra tiesinė .....	48

3.14 lentelė. Plienų ir jų suvirinimo medžiagų siūlių deformavimo parametrų $\bar{s}_T, \alpha, A_1$ tiesinės priklausomybės koeficientai nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus kambario ir aukštesnėje temperatūroje.....	49
3.15 lentelė. Legiruotųjų plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų eksperimentinių ir skaičiuotų deformavimo diagramos parametrų palyginimas kambario ir aukštesnėje temperatūrose.....	50



## PAVEIKSLAI

1.1 pav. Vagono ašies apkrovimo schema [18].....	12
1.2 pav. Minkšto mažaciklio apkrovimo schemas: a – cikliškai stiprėjanti medžiaga; b – cikliškai silpnėjanti medžiaga; c – cikliškai stabili medžiaga [18] .....	14
1.3 pav. Medžiagų klasifikavimas kambario ir aukštesnėje temperatūroje pagal legiruojančiuosius elementus [15].....	18
1.4 pav. MTS 810 medžiagų bandymo mašina [19].....	19
1.5 pav. MTS 810 terminės mechaninės medžiagų bandymo mašinos: a – indukcinio kaitinimo; b – kaitinimas krosnelėje [19].....	20
1.6 pav. Bandymo stendo schema (a) ir bandymo mašinos tempimo – gniuždymo griebtuvai (b) [18].....	20
1.7 pav. Savaiame centruojantis griebtuvas [20].....	21
1.8 pav. Apvalaus skerspjūvio bandiniai: a – bandiniai naudojami esant kambario temperatūroje; b – bandiniai naudojami esant aukštesnei temperatūrai; c – korsetiniai bandiniai [18].....	21
1.9 pav. Deformavimo parametro $\alpha$ priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus $(\sigma_u/\sigma_y)$ Z legiruotiems plienams kambario temperatūroje ir 95% prognozuojamų reikšmių pasikliautinoji juosta (taškinės linijos) [6].....	23
2.1 pav. Legiruotųjų plienų kambario temp. stačiakampė diagrama gauta pagal kriterijų $(\sigma_u/\sigma_y)$ Z „SPSS Statistics 20” programos pagalba.....	24
2.2 pav. Stačiakampė diagrama .....	28
2.3 pav. Legiruotųjų plienų kambario temperatūroje deformavimo parametro $A_1$ išsiskiriančių duomenų atmetimas; - ryškiai išsiskiriantys duomenys .....	28
2.4 pav. Legiruotųjų plienų kambario temperatūroje deformavimo parametro $A_1$ išsiskirčių tikrinimas; - ryškiai išsiskiriantys duomenys .....	29
2.5 pav. Legiruotųjų plienų kambario temperatūroje deformavimo parametro $A_1$ išsiskirčių tikrinimas.....	29
2.6 pav. Deformavimo parametro $A_1$ priklausomybė nuo $(\sigma_u/\sigma_y)$ Z legiruotiems plienams kambario temperatūroje atmetus ryškiai išsiskiriančius duomenis .....	30
3.1 pav. Deformavimo konstantos $\alpha$ priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus $(\sigma_u/\sigma_y)$ Z legiruotiesiems konstrukciniams plienams kambario temperatūroje ir 95% prognozuojamų reikšmių pasikliautinoji juosta (punkttyrinė linija) .....	46
3.2 pav. Eksperimentinių $\alpha_{eks}$ ir skaičiuotų $\alpha_{sk}$ parametrų palyginimas legiruotųjų plienų grupei nustatytame būdingame intervale aukštesnėje temperatūroje .....	50

## ĮVADAS

**Darbo aktualumas.** Šiomis dienomis inžinerijos šakose ypač didelį vaidmenį atlieka mašinų, įrenginių, eksploatuojamų ekstremalioje ciklinio apkrovimo aplinkoje, ilgalaiškumas. Norint padidinti jų našumą, reikia atitinkamai didinti ilgalaiškumą ir patikimumą. Ilgalaiškumas ypač priklauso nuo techninio lygio ir eksploatacijos sąlygų. Kvalifikuotas aptarnavimas, laiku atlikta profilaktika, perkrovų vengimas – visa tai gali žymiai padidinti mašinų ir įrenginių ilgalaiškumą. Ilgalaiškumas sumažėja esant pastovioms perkrovoms ir nedėkingoms klimatinėms sąlygoms. Palengvinus darbo sąlygas ilgalaiškumas didėja. Tačiau tai padaryti ne visada taip paprasta, kuomet kartais mašinos dirba be sustojimų. Vis dėl to labiausiai ilgalaiškumas priklauso nuo konstrukcijos teisingumo ir darbo sąlygų [14]. Todėl norint tinkamai parinkti konstrukcijos sudedamųjų dalių ir jų suvirinimo siūlių medžiagas reikia detaliai išnagrinėti jų savybes ir cheminę sudėtį.

Blogiausioje padėtyje yra šiluminės mašinos, kurios dirba padidintoje temperatūroje (200 – 550 °C). Keičiantis eksploatacijos temperatūrai, atitinkamai keičiasi ir mechaninės, statinės ir ciklinės savybės. Šių mašinų ilgalaiškumas ir stiprumas visų pirma priklauso nuo detalių atsparumo didelėms temperatūroms. Be to, pasireiškia valkšnumas (plastinis medžiagos tekėjimas veikiant pastoviems įtempimams), ir keičiantis detalės formai ji praranda darbingumą. Tokių detalių ilgalaiškumas didinamas naudojant karščiui atsparias medžiagas, racionaliai aušinant [14].

Nuo medžiagų mažaciklio deformavimo ir nuovargio charakteristikų priklauso daugelio labai atsakingų konstrukcijų stiprumas ir ilgalaiškumas, o šioms charakteristikoms nustatyti reikia atlikti sudėtingus ir brangius bandymus, todėl ilgalaiškumo problema vis dar aktuali ir dabar.

Ankstesniuose kitų autorių darbuose, buvo surastos mechaninių ir deformavimo diagramos charakteristikų priklausomybės išskiriant medžiagas ir jų suvirinimo medžiagas į atskiras grupes pagal tyrimo temperatūrą, taip pat pagal legiruojančiuosius elementus. Tačiau buvo pastebėta, kad deformavimo diagramos parametrų duomenų sklaida koncentruojasi tam tikrame intervale pagal medžiagų mechanines charakteristikas. Todėl magistriniame darbe analizuojama mechaninių ir deformavimo diagramos charakteristikų priklausomybė legiruotiems plienams ir jų suvirinimo medžiagoms kambario ir aukštesnėje temperatūroje nustatytame būdingame intervale, siekiant gauti stipresnį ryšį ir tikslesnius skaičiavimus preliminariam ilgalaiškumo nustatymui.

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

**Darbo uždaviniai:**

1. nustatyti legiruotųjų plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų deformavimo diagramos charakteristikų  $A_1$ ,  $\alpha$ ,  $s_T$  būdingą intervalą, kuris priklauso nuo mechaninių charakteristikų;
2. nustatyti būdingo intervalo įtaką tarpusavio ryšio stiprumui tarp ciklinių deformavimo diagramos charakteristikų  $A_1$ ,  $\alpha$ ,  $s_T$  ir modifikuoto plastiškumo kriterijaus  $(\sigma_u/\sigma_y)Z$ ;
3. ciklinėms deformavimo diagramos parametrų pagal mechanines savybes nustatyti analitinių priklausomybių koeficientus, bei patikrinti regresijos lygčių adekvatumą.

**Tyrimo metodai.** Siekiant objektyviai išanalizuoti mechaninių ir deformavimo diagramos charakteristikų priklausomybių nustatymą būdingame intervale remiamasi KTU mašinų projektavimo katedros laboratorijoje atliktais šios srities eksperimentais ir tyrimais. Magistriniame darbe naudoti mokslinės literatūros analizės ir apibendrinimų metodai, lyginamoji analizė, duomenų sisteminimas ir apibendrinimas, jų grafinis vaizdavimas bei statistiniai, matematiniai, analitiniai metodai.

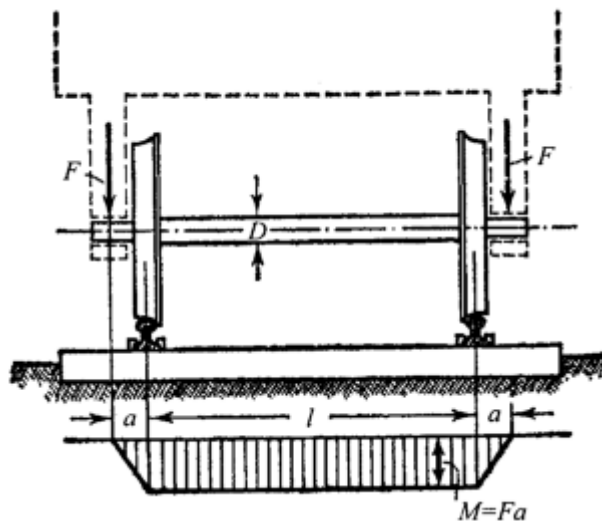
**Tiriamąjį darbo naujumas.** Išanalizuotos legiruotųjų konstrukcinių plienų ir jų suvirinimo medžiagų mechaninės ir deformavimo diagramos charakteristikos  $A_1$ ,  $\alpha$ ,  $s_T$ , kambario ir aukštesnėje temperatūroje, priklausomybės nustatytame būdingame intervale.

**Praktinis pritaikymas.** Šiame darbe gautos analitinės priklausomybės nuo modifikuoto plastiškumo, gali būti pritaikytos nustatant preliminarų inžinerijos šakose (energetikoje, naftoje) dirbančių mašinų ilgalaikiškumą, atsižvelgiant į jų eksploatacijos aplinką, darbo temperatūrą, naudojamas medžiagas.

# 1. LITERATŪROS ŠALTINIŲ APŽVALGA

## 1.1 Ciklinis stiprumas

Daugelio mašinų detalės (velenai, krumpliaračiai) yra apkraunamos cikliška, kai detalių skerspjūvyje įtempimai kinta periodiškai ciklais. 1.1 pav. Parodytas vagono ašies apkrovimas. Įtempiai besisukančios ašies skerspjūvyje kinta nuo  $+\sigma_{\max}$  (tempimas) iki  $-\sigma_{\max}$  (gniuždymas). Vienas įtempių pasikeitimo ciklas įvyksta per viena lenkiamos ašies apsisukimą. Dažniausiai maksimalūs įtempiai  $\sigma_{\max}$  nepasiekia detalės medžiagos tamprumo ribos, todėl detalė cikliškai tampriai deformuojasi ir priklausomai nuo ją veikiančių įtempių dydžio atlaiko milijonus arba dešimtis milijonų ciklų.



1.1 pav. Vagono ašies apkrovimo schema [18]

Jeigu ciklinio deformavimo metu įtempiai viršija tamprumo ribą, atsiranda liekamosios plastinės deformacijos ir detalės ilgalaikiškumas sumažėja iki kelių arba keliasdešimt tūkstančių ciklų. Taip dažniausiai deformuojasi nedideli medžiagos tūriai įtempių koncentracijos ir plyšių zonose, taip pat suvirintuosiuose sujungimuose. Dėl mažo ciklų skaičiaus iki suirimo toks deformavimas vadinamas mažacikliu. Jeigu cikliniai įtempiai siekia zoną, artimą tamprumo ribai, tada turime tarpinį ilgalaikiškumą – tarp daugiacyklio ir mažacyklio. Šiuo atveju plastinės deformacijos yra labai mažos ir ciklų skaičius iki suirimo priklausomai nuo detalių medžiagos ir apkrovimo lygio.

Daugiaciklis apkrovimas, kai ilgalaikiškumas siekį milijonus ciklų, tradiciškai vadinamas nuovargiu, nes detalė suyra atsiradus jos medžiagoje nuovargio plyšių, kaip anksčiau buvo manoma, nuvargus detalės medžiagai. Dėl susidariusio plyšio detalė suyra ir

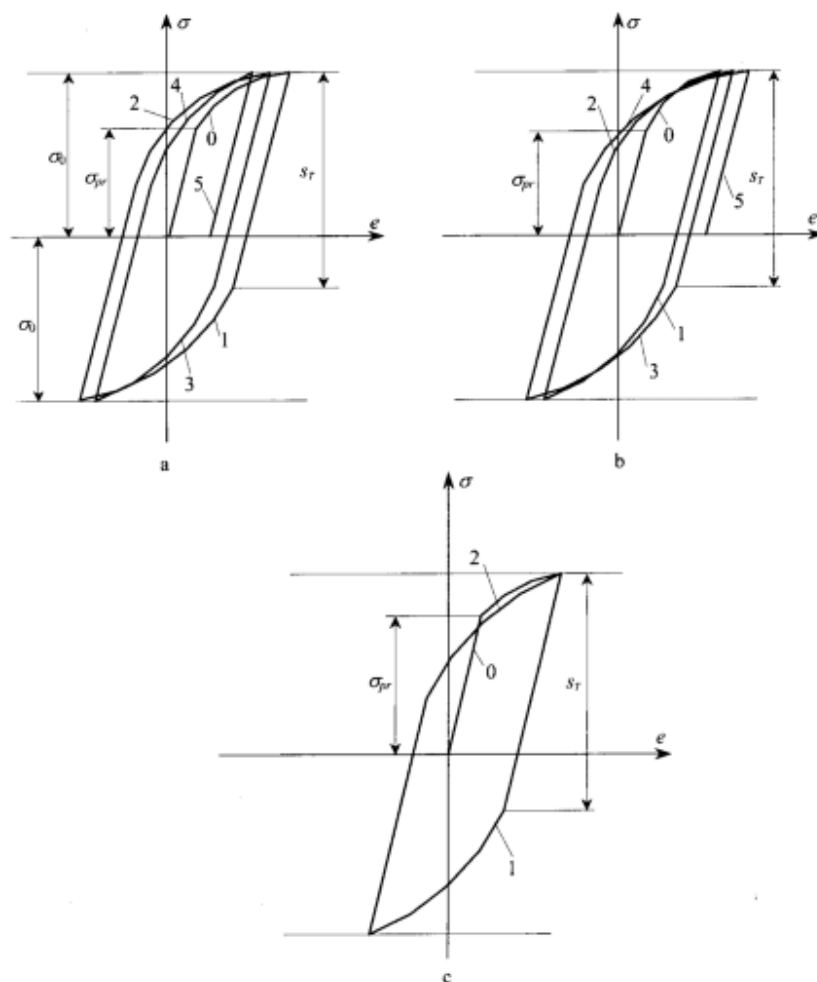
mažaciklio apkrovimo metu, kai įtempiai artimi proporcingumo ribai, ir visada esant tarpiniam apkrovimui [18].

## 1.2 Mažaciklis apkrovimas eksperimentiniame tyrime

Kaip buvo minėta dauguma įrengimų, mašinų ir kitų sunkiai apkrautų prietaisų dažniausiai yra veikiami mažacikliu apkrovimu. Pirmieji mažaciklio deformavimo bandymai parodė, kad medžiagos pasipriešinimas mažacikliam deformavimui priklauso nuo apkrovimo tipo t.y. nuo to, kas yra ribojama – įtempiai ar deformacijos.

Taigi vyrauja keli mažaciklio apkrovimo tipai: standus ir minkštas. Standus apkrovimas - kuomet yra apribojamos deformacijos ir nevaržomai didėja įtempiai. Esant standžiajam mažacikliam apkrovimui, detalę ar bandinį pažeidžia tik ciklinė plastinė deformacija. Minkštas apkrovimas – tai apkrovimas kuomet yra apribojama jėga ar įtempiai ir deformacijos didėja nevaržomai. Minkšto apkrovimo atveju turime tris suirimo zonas: *kvazistatinę, pereinamąją* ir *nuovargio*. Kvazistatinei zonai būdingos didelis vienpusės plastinės deformacijos  $\bar{e}_{pk}$  kaupimas ir mažas ciklų skaičius iki suirimo. Toks suirimas panašus į statinį, jo metu susidaro kakliukas. Medžiaga suyra, kai jos stiprumo riba  $\sigma_u$  tampa artima amplitudiniams įtempimams. Esant nedideliems ciklo amplitudiniams įtempimams ar artimai medžiagos proporcingumo ribai, medžiaga suyra dėl nuovargio be pastebimų plastinių deformacijų. Suirimas, esant vidutiniams amplitudiniams įtempimams, vadinamas tarpiniu arba pereinamuoju, kai susidaro nedidelis kakliukas ir jame atsiranda aiškiai matomų nuovargio plyšių.

Buvo nustatyta, kad esant mažacikliam deformavimui medžiagos elgiasi trejopai: stiprėja, silpnėja ir būna stabilios. 1.2 pav., a, b, c parodytos cikliška stiprėjančių, silpnėjančių ir stabilių medžiagų minkštojo deformavimo diagramos. Iš jų matyti, kad esant minkštam apkrautumui stiprėjančioms medžiagoms kilpos plotis  $\delta$ , didėjant apkrovimo pusciklių skaičiui  $k$ , mažėja (1.2 pav., a), o silpnėjančioms medžiagoms atvirkščiai – pusciklių skaičiui  $k$  didėjant,  $\delta$  didėja (1.2 pav., b). Cikliška stabilioms medžiagoms  $\delta$  nepriklauso nuo pusciklių skaičiaus, t.y. išlieka pastovus (1.2 pav., c) [18].



**1.2 pav.** Minkšto mažaciklio apkrovimo schemas: a – cikliškai stiprėjanti medžiaga; b – cikliškai silpnėjanti medžiaga; c – cikliškai stabili medžiaga [18]

Eksperimentai KTU mažaciklio nuovargio laboratorijoje buvo atlikti esant simetriniam apkrovimo ciklui. Vyraujant tokiam apkrovimo ciklui, tiksliai yra apibūdinamos medžiagos savybės esant tampriai plastiniam cikliniam deformavimui ir jo metu beveik vienodai pasireiškia tempimo ir gniuždymo deformacijos.

Šiame magistriniame darbe naudojami tyrimo rezultatai, kurie gauti tempimo ir gniuždymo bandymais, užtikrinant vienalytį deformavimą  $N_f = 10^2 - 2 \cdot 10^4$  ciklų intervale [16]. Nors ir šis būdas turi trūkumų (reikalingi sudėtingi ir labai brangūs pulsatoriai, sunkesnis bandinio tvirtinimas, keliami aukšti reikalavimai bandinio centravimo tikslumui, būtinos optimalios bandinio formos) lyginant su cikliniu sukimu ir lenkimu, tačiau reikia pažymėti, kad šis bandymo tipas geriausiai parodo medžiagos pasipriešinimą nuovargiui. Šių bandymų metu visame bandinio skerspjūvyje įtempiai yra vienodi, ko negalima pasakyti apie lenkimo ir sukimo bandymus, kada didžiausi įtempiai susidaro tiksliai išoriniuose bandinio sluoksniuose, o viduryje lygūs nuliui [18].

**Mechaninės charakteristikos**  $e_{pr}$ ,  $\sigma_{pr}$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_u$ ,  $S_k$ ,  $Z$  legiruotiems plienams ir jų suvirinimo siūlių medžiagoms nustatytos iš tempimo bandymo rezultatų kambario ir aukštesnėje temperatūroje [16].

**Deformavimo diagramos charakteristikos.** Eksperimentiškai nustatyta, kad konstrukcinės medžiagos priklausomai nuo jų cheminės sudėties ir struktūrinio mechaninio būvio pagal pasipriešinimą tampriai plastiniam cikliniam deformavimui skirstomos į cikliškai stiprėjančias, silpnėjančias ir cikliškai stabilias, taip pat į cikliškai izotropines ir anizotropines. Norint ciklines tampriai plastinio deformavimo diagramas panaudoti inžineriniuose skaičiavimuose, reikia nustatyti analitinę priklausomybę tarp įtempių ir deformacijų kiekviename pusciklyje  $k$ . Pasipriešinimas deformavimui kiekviename pusciklyje apibūdinamas apibendrinta ciklinio tampriai plastinio deformavimo diagrama [2].

Norint supaprastinti analitines išraiškas mažaciklio deformavimo skaičiavimams naudojami santykiniai vienetai:  $\bar{S}_k = \frac{S_k}{\sigma_{pr}}$ ;  $\bar{S}_1 = \frac{S_1}{\sigma_{pr}}$ ;  $\bar{s}_T = \frac{s_T}{\sigma_{pr}}$ ;  $\bar{e}_o = \frac{e_o}{e_{pr}}$ ;  $\bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{e_{pr}}$ ;  $\bar{\delta} = \frac{\delta}{e_{pr}}$ . Mažaciklio standaus deformavimo  $k$ -ojo pusciklio diagrama aprašoma lygybe [2]:

$$\bar{S}_k = \bar{\varepsilon} - A_{1;2} \left( \bar{e}_o - \frac{\bar{s}_T}{2} \right) k^\alpha \quad (1.1)$$

čia,  $\bar{S}_k$  -  $k$ -ojo pusciklio cikliniai įtempimai;  $\bar{\varepsilon}$  - standaus apkrovimo ciklinė deformacija (esant simetriniam cinkui);  $\bar{e}_o$  - pradinio pusciklio deformacija;  $\bar{s}_T$  - ciklinė proporcingumo riba;  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $\alpha$  - ciklinio deformavimo diagramos parametrai.

Konstrukcijų mažacikliam ilgalaikiškumui apskaičiuoti dažniausiai naudojami mažaciklio standaus deformavimo rezultatai. Parametrai  $A_1$  ir  $\alpha$  yra apskaičiuojami iš standaus mažaciklio deformavimo diagramų.

Iš sudarytų priklausomybių koordinatėse  $\log \bar{\delta}_k - \log \bar{\delta}_1$  nustačius 1-ojo ir  $k$ -ojo pusciklių  $\bar{\delta}_1$  ir  $\bar{\delta}_k$  reikšmes kiekvienam bandiniui, medžiagos stiprėjimo (silpnėjimo) intensyvumą įvertinantis parametras:

$$\alpha = \frac{\log \bar{\delta}_k - \log \bar{\delta}_1}{\log k} \quad (1.2)$$

arba panaudojus ciklinio deformavimo diagramos parametrus:

$$\alpha = \frac{1}{\log k} \log \frac{\bar{\varepsilon} - \bar{S}_k}{A_1 (\bar{e}_o - \bar{s}_T / 2)} \quad (1.3)$$

Taigi iš anksčiau pateiktų lygybių matyti, kad ciklinio deformavimo diagramoms analitiškai aprašyti naudojami šie parametrai:  $\bar{s}_T$ ,  $\alpha$ ,  $A_1$ ,  $A_2$  ir  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$ . (1.2) ir (1.3) lygybėse parametras  $\alpha$  įvertina medžiagos ciklinių savybių kitimą, esant cikliniam tampriam plastiniam deformavimui. Jeigu  $\alpha > 0$  (teigiamas), tai medžiaga silpnėja, jei  $\alpha < 0$  (neigiamas) medžiaga stiprėja, o jeigu  $\alpha = 0$  medžiaga stabili. Toks medžiagų skirstymas yra iš dalies sąlyginis, kadangi priklausomai nuo apkrovimo lygio ir apkrovimo ciklų skaičiaus ta pati medžiaga gali cikliškaip stiprėti ir stipriškai silpnėti ar būti cikliškaip stabili [2].

Pagal M. Daunys (2005) ciklinė proporcingumo riba  $s_T$  pagal įvairius modelius turėtų būti lygi dvigubai proporcingumo ribai  $\sigma_{pr}$ , taigi  $\frac{s_T}{\sigma_{pr}} = 2$ . Tačiau konstrukcinių medžiagų bandymai parodė, kad realus vaizdas yra gerokai sudėtingesnis. Didėjant apkrovimo pusciklių skaičiui, ciklinė proporcingumo riba kinta priklausomai nuo medžiagos ciklinių savybių. Cikliškaip stiprėjančių medžiagų ji truputi didėja, silpnėjančių – mažėja, o cikliškaip stabilių išlieka pastovi. Kadangi šie pokyčiai ciklinio deformavimo metu yra nedideli, skaičiavimui supaprastinti  $s_T$  paimta lygi pirmojo pusciklio ribai.

Parametrai  $A_1$  ir  $A_2$  apibrėžia pirmojo ir antrojo pusciklių kilpos plotius  $\bar{\delta}_1$  ir  $\bar{\delta}_2$ . Jų kitimo ribos yra nedideles. Parametrai  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$ , apibūdinantys deformavimo diagramų priklausomybę nuo ciklo asimetrijos  $r_\sigma$ , yra mažiau tyrinėti, o jų kitimo ribos yra -1 - +1 [18].

### 1.3 Medžiagos ir medžiagų klasifikacija

Eksperimentiniams bandymais KTU mažaciklio nuovargio laboratorijoje buvo naudoti legiruotieji konstrukciniai plienai. Plienai legiruojami norint pagerinti mechanines ir technologines, fizikines savybes – t.y. į jų sudėtį įvedami elementai – chromas, molibdenas, vanadis, Si, Ti ir kt. Legiruojantys elementai suteikia plienui spec. savybes. Pavyzdžiui, chromas (Cr) pagerina plieno stiprumą, kai  $Cr \geq 13\%$  – plienas tampa nerūdijantis; molibdenas (0.2–1% Mo) labai pagerina konstrukcinių ir įrankinių plienų mechanines savybes; vanadis (0.1–3%V) plienui garantuoja smulkiagrūdę mikrostruktūrą; nikelis (Ni) padidina plieno stiprumą bei smūginį tūsumą. Legiruojantys elementai (Ni, Cr, V) mažina mechaninių savybių pokytį nuo temperatūros. Tai praplėčia plienų panaudojimo sritį ir įgalina naudoti juos žemose ir aukštose temperatūrose, agresyviose chem. aplinkose, elektrotechnikoje ir kitur. Legiruojančių elementų žymėjimas leidžia sutrumpintai nurodyti jų chem. sudėtį. Kiekvienas leg. elementas žymimas didžiosiomis raidėmis: chromas – X,

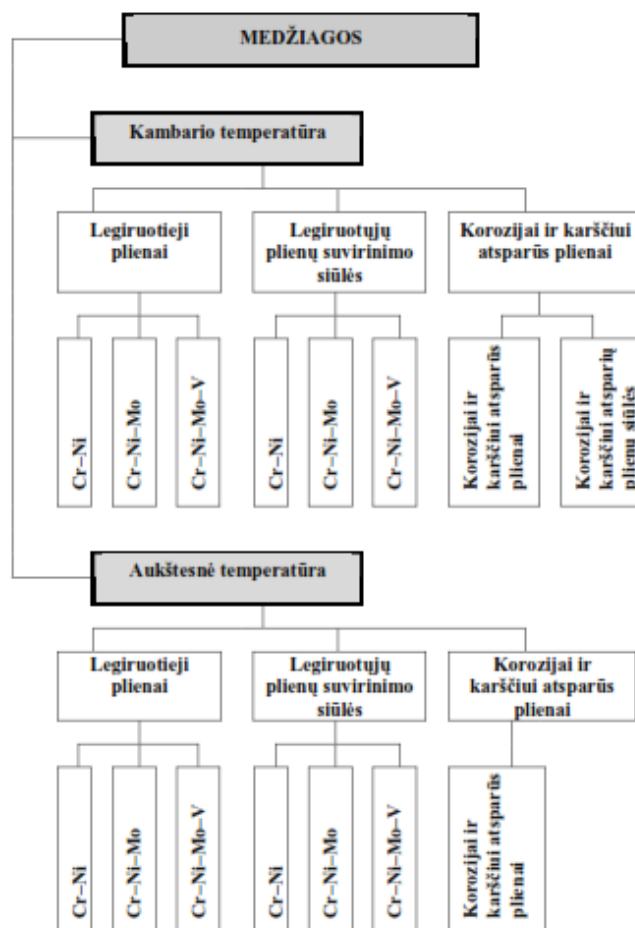


manganas – Γ, varis – D, nikelis – H, molibdenas – M, vanadis – Ю, volframas – B. Dviženklis sk. markės pradžioje nurodo C kiekį šimtosiomis % dalimis. Jei legiruojančio elemento iki 0.5% – nerašomas. Kai kurios plienų grupės priimta žymėti spec. raide, kuri rašoma prieš markę, pvz.: guolių plienams naudojama III markė IIIX15. Įrankiniai plienai žymimi P5HG, o elektrotechniniai – Э [1].

**Medžiagos veikiamos temperatūrinio poveikio.** Įrenginiai ir jų detalės yra eksploatuojamos įvairiomis sąlygomis, tačiau gan didelis dėmesys yra skiriamas kokioje temperatūroje bus naudojamas įrenginys. Išskiriamos dvi grupės: a) kambario temperatūroje (20°C), b) aukštesnėje temperatūroje (200 – 550°C). Todėl Lietuvos ir kitų šalių universitetų laboratorijose sukaupti tiriamų medžiagų darbo rezultatų duomenys klasifikuojami pagal šias dvi grupes. KTU Mašinų projektavimo katedros mažaciklio nuovargio laboratorijoje bandiniai buvo kaitinami 200 – 350°C temperatūros intervale, praleidžiant elektros srovę. Kitose šalių laboratorijose, Slovakijos, Rusijos, Vengrijoje bandiniai buvo kaitinami 350 – 550°C temperatūros intervale, naudojant indukcinį kaitinimą arba kaitinimą elektros krosnelėje.

**Medžiagų klasifikavimas.** Pasak R. Šniuoli, M. Daunį (2006) ir A. Stulpinaitę (2009) medžiagos buvo klasifikuojamos pagal plieno tipus ir suvirinto sujungimo medžiagas: 1) atominėje energetikoje naudojami konstrukciniai plienai; 2) konstrukcinių plienų suvirinimo siūlių medžiagos; 3) korozijai ir karščiui atsparūs plienai; 4) korozijai ir karščiui atsparių plienų suvirinimo siūlių medžiagos.

A. Stulpinaitė (2009) analizuojamas medžiagas suskirsto į grupes pagal darbo temperatūrą, plienų tipą bei legiruojančius elementus (1.3 pav.).



**1.3 pav.** Medžiagų klasifikavimas kambario ir aukštesnėje temperatūroje pagal legiruojančiuosius elementus [15]

Legiruotieji konstrukciniai plienai buvo grupuojami pagal cheminius elementus, sudarant tokias plienų grupes: 1) Cr–Ni grupė – kai Cr, Ni < 13%; 2) Cr–Ni–Mo grupė – kai Cr, Ni < 13% ir 0.2-1 % Mo; 3) Cr–Ni–Mo–V grupė – kai Cr, Ni < 13%, 0.2– 1 % Mo ir 0.1–3% V.

Taigi apibendrinant galima teigti, kad detalės yra eksploatuojamos įvairiomis darbo sąlygomis. Ypač didelis dėmesys yra skiriamas kokioje temperatūroje dirba detalės, todėl yra išskiriamos dvi grupės: kambario temperatūroje ir aukštesnėje temperatūroje. Be to, medžiagos klasifikuojamos pagal plieno tipus ir suvirinto sujungimo medžiagas. Taigi atlikus kitų autorių darbų apžvalgą, rezultatai parodė, kad skirstyti analizuojamų medžiagų duomenis į kambario ir aukštesnę temperatūrą yra tikslinga.

#### 1.4 Medžiagų bandymo mašinos ir bandiniai

Mažaciklio deformavimo ir suirimo procesams tirti naudojamos žemojo dažnio mechaninės arba hidraulinės bandymo mašinos, o deformavimo diagramos užrašomos

elektroniniu – mechaniniu arba skaitmeniniu būdu. Dabar gaminamos programinio valdymo mašinos su elektrine hidrauline pavara. Deformavimo diagramos užrašomos kompiuteriais. Visos jos turi tris pagrindines sistemas: apkrovimo įrenginį, matavimo ir registravimo bei valdymo sistemas.

Pagrindinis apkrovimo tempimu – gniuždymu įrenginio uždavinys – suteikti deformuojamam bandiniui vienalytį deformacijų būvį (be lenkimo). Tai pasiekama dideliu griebtuvų bendraašiškumu ir mašinos standumu [18].



**1.4 pav.** MTS 810 medžiagų bandymo mašina [19]

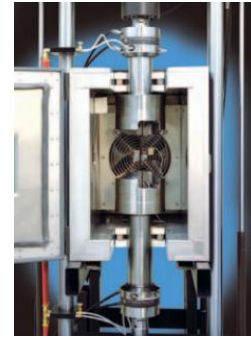
Paveiksle 1.4 pateikta „MTS“ įmonės programinio valdymo bandymo mašina, kurios: jėgos bandymo intervalas nuo 25kN iki 500 kN, galimybė bandyti įvairias medžiagas nuo plastikų iki aliuminiu, kompozitų ir plienų, galimybė tvirtinti įvairių dydžių bandinius [19].

Bandymų aukštose temperatūrose įrenginiai turi papildomą kaitinimo ir automatinio temperatūros reguliavimo sistemą. Ši sistema turi užtikrinti tolygų bandinio bandomosios dalies kaitinimą ir automatinį temperatūros reguliavimą su paklaida, ne didesne kaip  $\pm 1,5\%$  matavimo skalės. Bandiniai kaitinami leidžiant elektros srovę per bandinį arba išoriniame šaltinyje (krosnelėje), kurio viduje yra bandinys su griebtuvais, ir indukcinio būdu.

Paprasčiausias būdas kaitinti leidžiant elektros srovę per bandinį. Šiuo atveju bandinys yra atviras ir deformaciją galima matuoti taip pat kaip ir normalioje temperatūroje. Taip pat deformacija matuojama ir esant indukciniam kaitinimui, čia bandinys taip pat yra atviras. Didžiausias šių kaitinimo būdų trūkumai: didelis temperatūros gradientas išilgai bandinio kaitinant elektros srove ir sudėtinga indukcinio kaitinimo aparatūra. Be to, kaitinimas elektros srove netinka plyšio didėjimo stadijoje, nes dėl skerspjūvio kitimo bandinys pradeda perkaisti. Tinkamas visais atžvilgiais kaitinimas krosnelėje, tačiau nepatogus matuojant deformacijas [18].



a

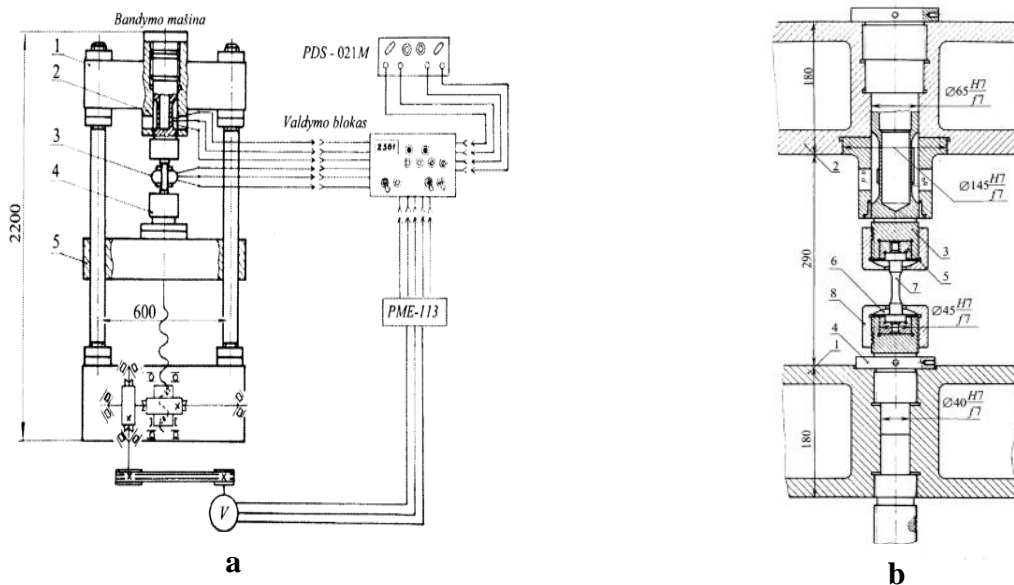


b

**1.5 pav.** MTS 810 terminės mechaninės medžiagų bandymo mašinos: a – indukcinio kaitinimo; b – kaitinimas krosnelėje [19]

Terminės mechaninės „MTS“ medžiagų bandymo mašinos (žr. 1.5 pav., a) pagalba galima vienu metu stebėti termines mechanines šilumos bangų formas ir papildomus procesus tokius kaip medžiagos grūdinimas ir pan. Atlikus bandymą, rezultatai yra automatizuotai sukuriami, atliekant viso bandymo išsamią analizę. 1.5 pav. b pateikta bandymo mašina, kurioje bandinys kaitinamas krosnelėje. Šioje bandymo mašinoje bandinius galima veikti plataus diapazono temperatūroje [19].

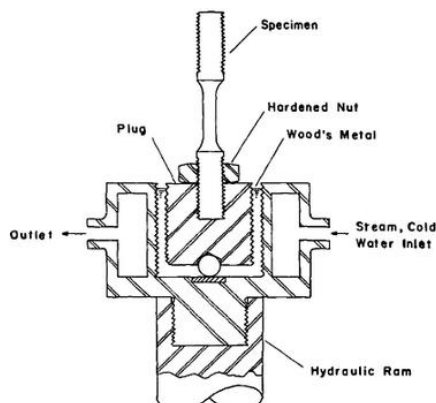
Šiame magistriniame darbe naudoti eksperimentinio bandymo duomenys (žr. 1-4 priedus) gauti KTU laboratorijose naudojamų bandymo mašinų pagalba. Bendra naudojamų įrenginių schema pateikta 1.6 pav. a, o pagrindinio įrenginio junginio – griebtuvų konstrukcija 1.6 pav. b [18].



**1.6 pav.** Bandymo stendo schema (a) ir bandymo mašinos tempimo – gniuždymo griebtuvai (b) [18]

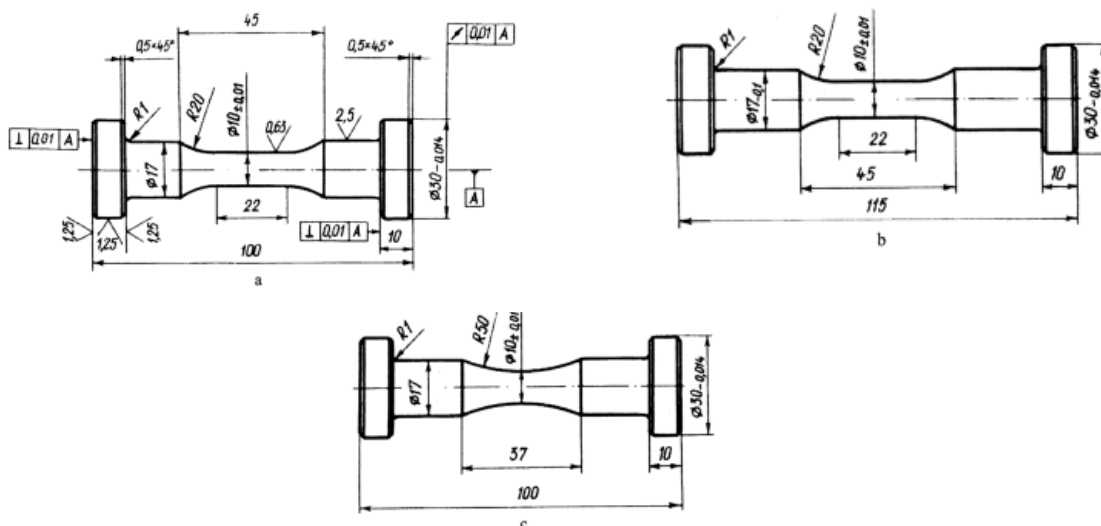
Paveiksle 1.6 b griebtuvų junginys skirtas bandiniui 7 tiksliai centruoti. Viršutinis ir apatinis griebtuvai 3, 4 įtvirtinti mašinos skersiniuose 1 ir 2. Bandiniai 7 griebtuvuose bazuojami cilindriniais lizdų 5 paviršiais. Gniuždymo jėgos bandiniui perduodamos lizdų 5 dugnais, o tempimo – griebtuvų veržlėmis 8 per sferinius segmentus 6.

Autorių R. M Wetzel., L. F. Coffin (1969) Ilinojaus universitete atliktų bandymų, aprašomos mašinos griebtuvo schema, kuri užtikrina tinkamą bandinio ašies centravimą (žr. 1.7 pav.).



1.7 pav. Savaiame centruojantis griebtuvas [20]

**Bandiniai.** Bandiniai, naudojami mažaciklio deformavimo bandymams atlikti, esant tiesiniam įtempių būviui, turi užtikrinti vienalytį įtempių būvį bandomoje bandinio dalyje iki nuovargio plyšio atsiradimo. Šias sąlygas geriausiai tenkina 1.8 pav. pateikti bandiniai [18].



1.8 pav. Apvalaus skerspjūvio bandiniai: a – bandiniai naudojami esant kambario temperatūroje; b – bandiniai naudojami esant aukštesnei temperatūrai; c – korsetiniai bandiniai [18]

Bandinių (žr. 1.8 pav.) suapvalinimo spinduliai R=20 ir R=50 parinkti skersmenų pasikeitimo vietose mažinant įtempimų koncentraciją. Neilga bandomoji dalis (l=22) cilindrinuose bandiniuose daroma siekiant išvengti bandinio klupimo esant didelėms gniuždymo deformacijoms, artimoms stiprumo ribai. Įtempimų koncentracijai, plyšių didėjimui, suvirintiesiems sujungimams tirti paprastai naudojami didesni bandiniai su plokščia bandomąją dalimi, kuriuose yra sudaromi įtempimų koncentratoriai [18].

### 1.5 Deformavimo parametrų priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus.

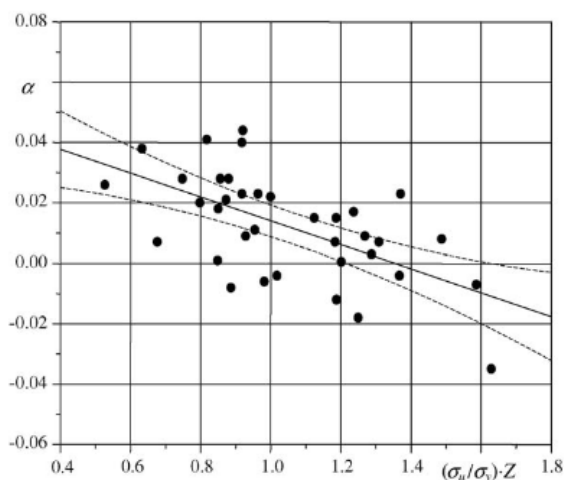
Mažaciklio deformavimo parametrų pagal pilnutinę tampriai plastinę deformaciją priklausomybės analizė nuo statinių mechaninių charakteristikų ir jų variacijų autorių darbuose [3, 4, 5, 6, 7] parodė, kad deformavimo konstantos  $A_1$ ,  $\alpha$ ,  $s_T$  geriausiai koreliuojasi su modifikuoto plastiškumo kriterijumi  $(\sigma_u/\sigma_y)Z$  kambario ir aukštesnėje temperatūroje.

M. Daunys, R. Šniuolis (2006) išanalizavo legiruotųjų plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų deformavimo diagramos parametrų  $A_1$ ,  $\alpha$ ,  $s_T$  priklausomybės nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus  $(\sigma_u/\sigma_y)Z$  kambario ir aukštesnėje temperatūroje.

**1.1 lentelė.** Tiesinės priklausomybės deformavimo diagramos charakteristikų koeficientai nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus kambario ir aukštesnėje temperatūroje [6]

Kambario temperatūra	Aukštesnė temperatūra
Legiruotieji konstrukciniai plienai $A_1 = 1,21 + 0,32(\sigma_u / \sigma_y)Z$ $\alpha = 0,054 - 0,039(\sigma_u / \sigma_y)Z$ $s_T = 1,49 + 0,14(\sigma_u / \sigma_y)Z$	$A_1 = 1,21 + 0,27(\sigma_u / \sigma_y)Z$ $\alpha = 0,047 - 0,025(\sigma_u / \sigma_y)Z$ $s_T = 1,63 + 0,07(\sigma_u / \sigma_y)Z$
Legiruotųjų plienų suvirinimo siūlių medžiagos $A_1 = 1,38 + 0,23(\sigma_u / \sigma_y)Z$ $\alpha = 0,034 - 0,019(\sigma_u / \sigma_y)Z$ $s_T = 1,37 + 0,39(\sigma_u / \sigma_y)Z$	$A_1 = 1,81 - 0,34(\sigma_u / \sigma_y)Z$ $\alpha = -0,034 + 0,039(\sigma_u / \sigma_y)Z$ $s_T = 1,56 + 0,13(\sigma_u / \sigma_y)Z$
Nerūdijantys plienai $A_1 = 1,71 + 0,24(\sigma_u / \sigma_y)Z$ $\alpha = 0,052 - 0,035(\sigma_u / \sigma_y)Z$ $s_T = 1,60 + 0,11(\sigma_u / \sigma_y)Z$	$A_1 = 1,06 + 0,33(\sigma_u / \sigma_y)Z$ $\alpha = 0,036 - 0,030(\sigma_u / \sigma_y)Z$ $s_T = 1,73 + 0,05(\sigma_u / \sigma_y)Z$
Nerūdijančių plienų suvirinimo siūlių medžiagos $A_1 = 1,58 + 0,10(\sigma_u / \sigma_y)Z$ $\alpha = 0,036 - 0,018(\sigma_u / \sigma_y)Z$ $s_T = 1,87 + 0,09(\sigma_u / \sigma_y)Z$	- - -

Minėtoms deformavimo diagramos charakteristikoms pasiūlytos analitinės priklausomybės (žr. 1.1 lent.), kurios buvo panaudotos medžiagos ilgalaikiškumui prognozuoti.



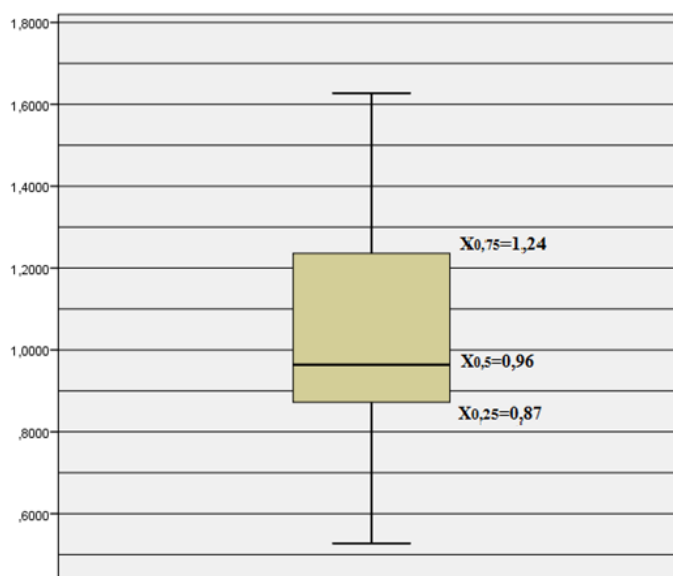
**1.9 pav.** Deformavimo parametro  $\alpha$  priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus  $(\sigma_u/\sigma_y)Z$  legiruotiems plienams kambario temperatūroje ir 95% prognozuojamų reikšmių pasikliautinoji juosta (taškinės linijos) [6]

Deformavimo diagramos parametro  $\alpha$  priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus kambario temperatūroje ( $20^\circ\text{C}$ ) empirinė regresijos tiesė ir 95% pasikliautinios srities ribos teorinei regresijos tiesei pavaizduota 1.9 pav.

Apibendrinant šiame skyriuje pateiktą literatūros šaltinių apžvalgą, galima teigti, kad daugelio mašinų detalės yra apkraunamos cikliškai. Praktikoje dažniausiai pasitaiko mažaciklis apkrovimo tipas. Dėl mažo ciklų skaičiaus iki suirimo toks deformavimas vadinamas mažacikliu. Cikliškai kintantys įtempiai viršija medžiagos proporcingumo ribą, prasideda tampriai plastinis deformavimas, susidaro plastinės deformacijos, histerezės kilpa ir medžiagos ilgalaikiškumas sumažėja iki tūkstančių arba šimtų ciklų. Ypač didelis dėmesys yra skiriamas kokioje temperatūroje dirba detalės, todėl yra išskiriamos dvi grupės: kambario temperatūroje ir aukštesnėje temperatūroje. Be to, medžiagos klasifikuojamos pagal plieno tipus ir suvirinto sujungimo medžiagas. Šiame magistriniame darbe naudoti eksperimentinio bandymo duomenys gauti KTU laboratorijose naudojamų bandymo mašinų pagalba. Ciklinio deformavimo diagramoms analitiškai aprašyti naudojami parametrai:  $s_T$ ,  $\alpha$ ,  $A_1$ . Deformavimo konstantos  $A_1$ ,  $\alpha$ ,  $s_T$  geriausiai koreliuojasi su modifikuoto plastiškumo kriterijumi  $(\sigma_u/\sigma_y)Z$  kambario ir aukštesnėje temperatūroje.

## 2. DEFORMAVIMO PARAMETRŲ PRIKLAUSOMYBĖ NUO MODIFIKUOTO PLASTIŠKUMO KRITERIJAUS NUSTATYTAME INTERVALE

Kitų autorių darbuose pastebėta kad, nagrinėjamų duomenų sklaida koncentruojasi tam tikrame intervale pagal medžiagų mechanines charakteristikas. Todėl norint gauti tikslesnes legiruotųjų konstrukcinių plienų ir jų suvirinimo medžiagų deformavimo konstantų  $s_T$ ,  $A_1$ ,  $\alpha$  priklausomybes nuo modifikuoto plastiškumo  $(\sigma_u/\sigma_y)Z$  reikia nustatyti charakteringą intervalą, kuriame ir bus toliau analizuojamos šios priklausomybės. Tai galima atlikti stačiakampės diagramos pagalba naudojant „SPSS Statistics 20” programą (žr. 2.1 pav.). Šiame darbe panaudoti medžiagų tyrimo rezultatai, esant mažacikliam standžiam deformavimui kambario ir aukštesnėje temperatūroje, terminis apdirbimas, mechaninės charakteristikos ir deformavimo diagramos parametrai pateikti 1-4 prieduose.



**2.1 pav.** Legiruotųjų plienų kambario temp. stačiakampė diagrama gauta pagal kriterijų  $(\sigma_u/\sigma_y)Z$  „SPSS Statistics 20” programos pagalba

2.1 pav. pavaizduotas procentilių reikšmės (angl. percentiles), kurios yra vienos iš svarbiausių nustatant intervalą. Procentiliai kitaip dar vadinami kvartiliais. Kvartilis – vienas iš trijų kvantilių, dalijančių skaitmeninių duomenų pasiskirstymą į 4 ketvirčius. Kvartilis  $q_1$  yra realusis skaičius, už kurį mažesnės stebimos reikšmės sudaro 25%. Medianą galime vadinti antruoju kvartiliu  $q_2$ . Trečiasis kvartilis  $q_3$  yra realusis skaičius, už kurį mažesnės stebimos reikšmės sudaro 75%. Taigi procentiliai (kvantiliai) visus stebėjimo duomenis pagal jų dydį surikiuoja procentinėje skalėje. Kvartilių plotis yra atitinkamas stebėjimo duomenų



kintamumo matas. Šios charakteristikos esmė panaši į standartinio nuokrypio. Kvartilų plotis apskaičiuojamas iš lygybės:  $Q_p = q_3 - q_1$ . [12]

Taigi intervalas nustatomas iš stačiakampės diagramos (žr. 2.1 pav) gautų rezultatų. Legiruotiesiems plienams kambario temperatūroje (20 °C) deformavimo parametrams  $\alpha$ ,  $s_T$ ,  $A_1$  intervalui nustatyti buvo panaudoti visi duomenys paimti iš 1 priedo. Priimta, kad nustatyto intervalo ribos yra 0,87 - 1,24, pagal kurį bus toliau analizuojama deformavimo parametru priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo.

### 2.1 lentelė. Nustatyto intervalo reikšmės

Tipas	Deformavimo konstantos	Temperatūra	Nustatytas intervalas
Plienai	$\alpha$	Kambario temperatūra (20 °C)	0,87 - 1,24
	$s_T$		
	$A_1$		
Plienų siūlės	$\alpha$	Kambario temperatūra (20 °C)	0,875 - 1,095
	$s_T$		
	$A_1$		
Plienai	$\alpha$	Aukštesnė temperatūra (200 °C -550 °C)	0,96 - 1,304
	$s_T$		
	$A_1$		
Plienų siūlės	$\alpha$	Aukštesnė temperatūra (200 °C -550 °C)	0,965 – 1,243
	$s_T$		
	$A_1$		

2.1 lentelėje nurodytos nustatyto intervalo reikšmės. Likusiems deformavimo parametrams  $\alpha$ ,  $s_T$ ,  $A_1$  legiruotiems plienams ir jų suvirinimo medžiagų siūlėms kambario ir aukštesnėje temperatūroje intervalą nustatysime analogiškai.

### 2.1 Deformavimo diagramos parametru analizė nustatytame intervale

Šiame poskyriuje nagrinėjama deformavimo parametru priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus nustatytame intervale bei atmesti ryškiai išsiskiriantys taškai.

Išskirtys – tai netipinės ir retos reikšmės, kurios yra žymiai nukrypusios nuo kitų duomenų pasiskirstymo. Šie duomenys, arba tikrai atspindi tiriamojo reiškinio (kintamojo) tikrąsias savybes, arba yra matavimo klaidų arba anomalinių reiškinų padarinys. Dėl to, išskirtys dažnai neįtraukiamos į tiriamąjį modelį. Jos didina dispersiją, iškreipia vidutinę reikšmę, mažina koreliacinį ryšį [13]. Duomenų sklaida apibūdinama tam tikromis

charakteristikomis: imties pločiu IP, kvartiliniu pločiu KP, dispersija  $s^2$ , standartiniu nuokrypiu  $s$ , variacijos koeficientu  $V_k$ , didžiausia reikšme  $x_{\max}$ ,  $x_{\min}$ .

Duomenų atmetimui gali būti naudojamas N. Smirnovo (N. Smirnov) kriterijus [8], kuris dažnai taikomas kuomet žinomi ne teoriniai parametrai, o jų įverčiai. Tyrimo rezultatai išdėstomi variacine eilute:

$$x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_i \leq \dots \leq x_n . \quad (2.1)$$

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

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} . \quad (2.2)$$

Atsitiktinio dydžio X reikšmių išsisklaidymo laipsnį apie empirinį vidurkį nusako dispersija:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \left[ \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right]; \quad (2.3)$$

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

Esant didesniai duomenų skaičiui ( $n > 50$ ), vidutinę reikšmę ir dispersiją paprasčiau apskaičiuoti sistematizuojant turimus duomenis, t.y. išdėstant tyrimo rezultatus variacine eilute pagal (2.1) lygtį. Po to tyrimo rezultatai grupuojami, suskirstant nagrinėjamos charakteristikos variavimo amplitudę:

$$R = x_{\max} - x_{\min} \quad (2.4)$$

Suskirsčius į 7 - 20 vienodus intervalus ( $n > 80$ ) ir apskaičiuojant dažnumą (stebėjimų skaičių) kiekviename intervale. Šiuo atveju empirinis vidurkis:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{j=1}^e x_j n_j}{n} \quad (2.5)$$

Dispersijos įvertis:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \left[ \sum_{j=1}^e x_j^2 n_j - \frac{1}{n} \left( \sum_{j=1}^e x_j n_j \right)^2 \right]; \quad (2.6)$$

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

Apskaičiuotos dydžių  $\bar{x}$  ir  $s^2$  reikšmės pagal (2.5) ir (2.6) lygybes nėra tikslios dėl duomenų grupavimo, tačiau gaunamos paklaidos nepaisoma, kai  $e \geq 7$  [8].

Imties dispersija matuojama kvadratiniais vienetais, todėl sklaidai apibūdinti dažnai naudojama kita charakteristika – imties standartinis nuokrypis:

$$s = \sqrt{s^2} . \quad (2.7)$$

Ryškiei išsiskiriančio duomenų variacinės eilutės pirmojo nario atmetimui apskaičiuojama statistika:

$$u_1 = \frac{\bar{x} - x_1}{s} ; \quad (2.8)$$

arba jei abejojama dėl didžiausių reikšmę turinčio variacinės sekos nario:

$$u_n = \frac{x_n - \bar{x}}{s} ; \quad (2.9)$$

Gauta reikšmė yra lyginama su kritine riba  $u_p$  [8, 54 p., 3.2 lent.], kai reikšmingumo lygmuo  $p$  ir duomenų skaičius  $n$ .

Kai teisingos lygtys:

$$u_1 \leq u_p \text{ arba } u_n \leq u_p , \quad (2.10)$$

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

$$u_1 > u_p \text{ arba } u_n > u_p , \quad (2.11)$$

nulinė hipotezė nepriimama, t.y.  $x_n$  arba  $x_1$  nėra būdingi esamai duomenų grupei ir jie atmetami. Atmetus šiuos dydžius, anksčiau apskaičiuoti įverčiai  $\bar{x}$  ir  $s^2$  turi būti koreguojami, imant  $n-1$  ir vėl tikrinami kiti abejotini duomenys.

Išskirčių sukeltam iškreipimui eliminuoti įprasta naudoti kvartilinį plotį (KP). Kvartilinis plotis lygus viršutinio (trečiojo) ir apatinio (pirmojo) kvartilijų skirtumui:

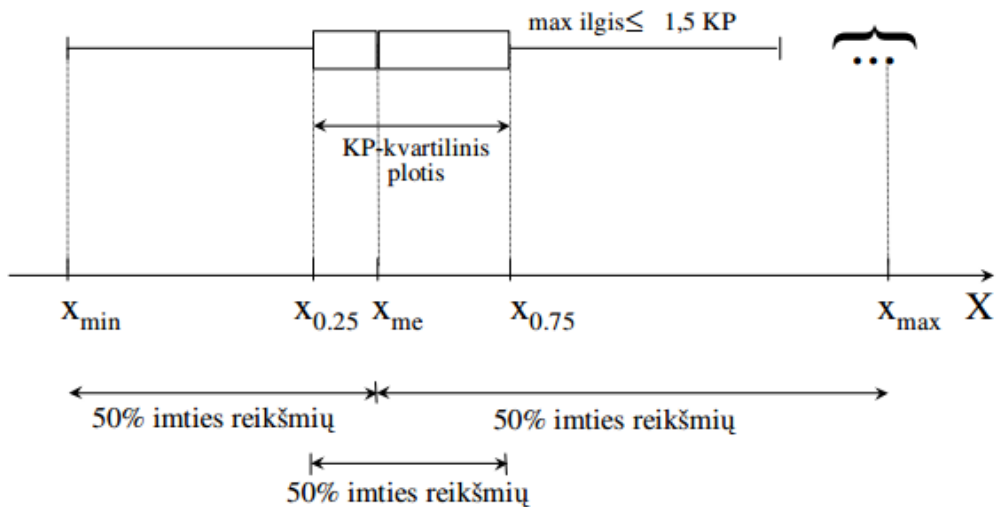
$$KP = x_{0,75} - x_{0,25} , \quad (2.12)$$

ir jis apibūdina vidurinių 50% duomenų reikšmių sklaidą. Kvartilinis plotis dažniausiai yra patikima sklaidos charakteristika [10]. Variacinės sekos pirmasis arba  $n$ -tasis narys priklauso tai pačiai duomenų grupei (nėra išskirtis), jei tenkinamos šios lygtys:

$$x_1 \geq x_{0,25} - 1.5KP \text{ arba } x_n \leq x_{0,75} + 1.5KP . \quad (2.13)$$

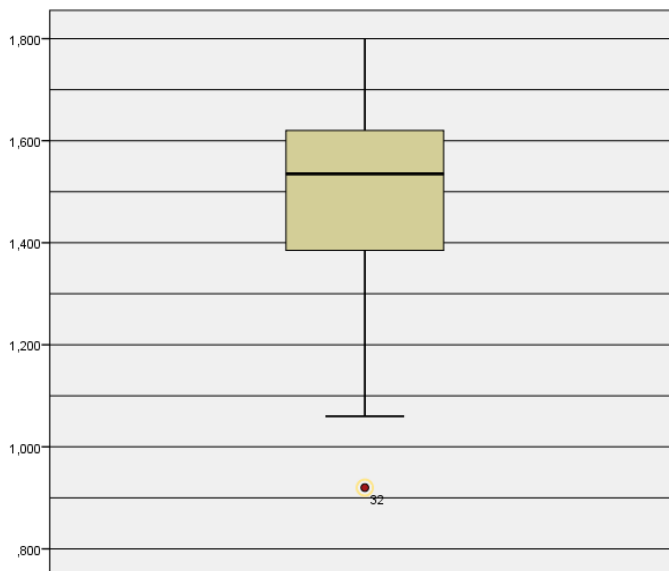
Kaip jau buvo minėta, dar vienas plačiai taikomas būdas atmesti ryškiai išsiskiriančius duomenis tai stačiakampė diagrama. Joje skaičiavimo rezultatai pateikiami grafiškai. Šią diagramą pasiūlė amerikiečių mokslininkas Džonas Tjukis. Ji vaizduoja duomenų skaitines charakteristikas. Dabar yra naudojami keli šios diagramos variantai, kurie skiriasi vienas nuo kito tik vaizduojamų skaitinių charakteristikų skaičiumi. 2.2 paveiksle pavaizduota tipiška stačiakampė diagrama. Ją sudaro stačiakampis, einantis nuo apatinio (pirmojo) kvartilio  $x_{0,25}$  iki viršutinio (trečiojo) kvartilio  $x_{0,75}$ . Linija stačiakampio viduje atitinka medianą  $x_{me}$ . Nuo stačiakampio šonų link mažiausios reikšmės  $x_{min}$  ir didžiausios reikšmės  $x_{max}$  yra atkarpos.

Maksimalus atkarpos ilgis lygus 1,5 kvartilinio pločio. Taškai neįeinantys į atkarpas yra išskirtys [9].



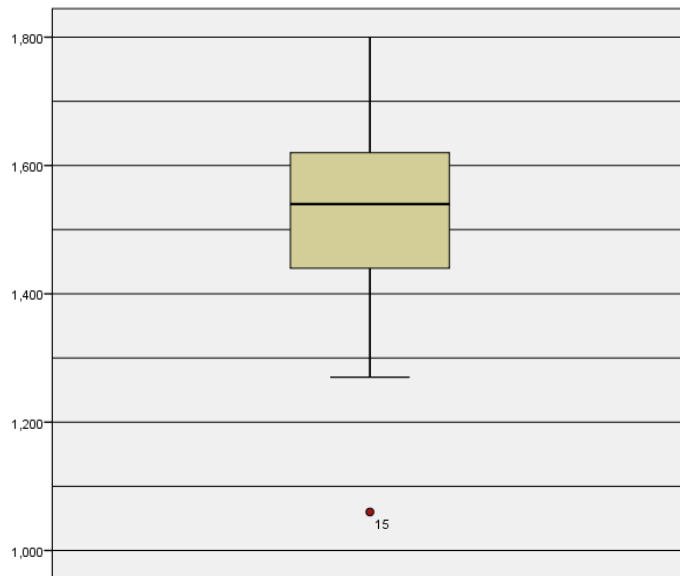
**2.2 pav.** Stačiakampė diagrama

Ryškiai išsiskiriančių duomenų atmetimui naudojama stačiakampė diagrama, kuri sudaryta „SPSS Statistics 20” programos pagalba. 2.3 pav. pateikiamas legiruotųjų plienų kambario temperatūroje deformavimo parametro  $A_1$  ryškiai išsiskiriančių duomenų atmetimas nustatytame intervale.



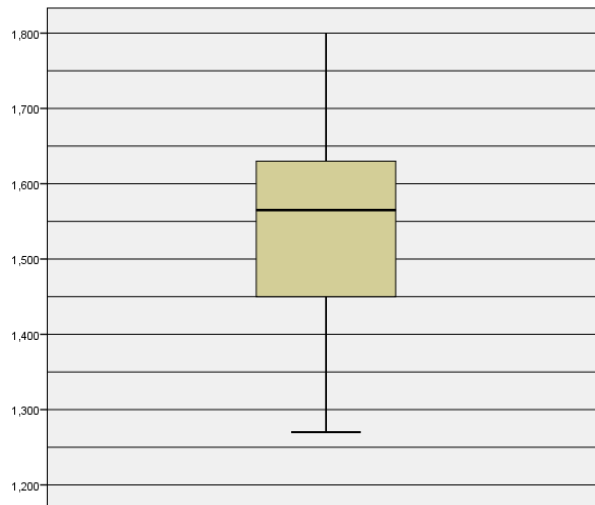
**2.3 pav.** Legiruotųjų plienų kambario temperatūroje deformavimo parametro  $A_1$  išsiskiriančių duomenų atmetimas; ● - ryškiai išsiskiriantys duomenys

Iš paveikslo 2.3 matoma, kad taškas 32 yra ryškiai išsiskiriantis ir turi būti pašalintas. Pašalinus išskirtį gaunamas naujas stačiakampės diagramos grafikas (žr. 2.4 pav.).



**2.4 pav.** Legiruotųjų plienų kambario temperatūroje deformavimo parametro  $A_1$  išskirčių tikrinimas; ● - ryškiai išsiskiriantys duomenys

Patikrinus dar kartą buvo rasta nauja išskirtis taškas 15 (žr. 2.4 pav.), ji taip pat buvo pašalinta ir iš naujo patikrintas stačiakampės diagramos grafikas (žr. 2.5 pav.).



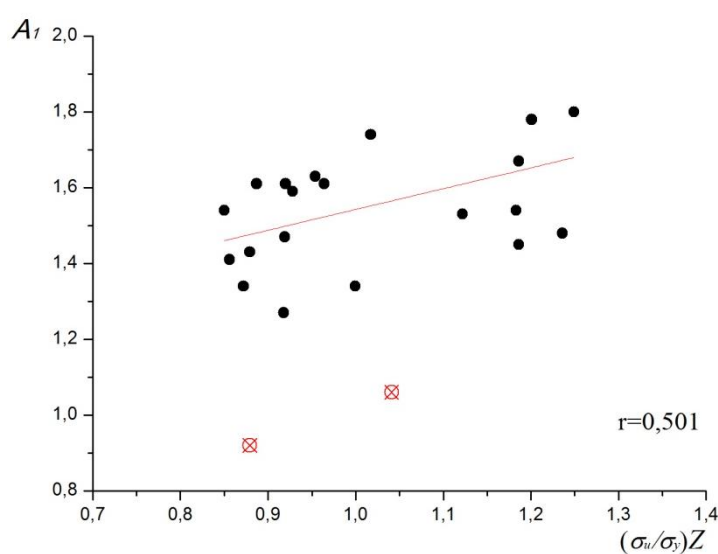
**2.5 pav.** Legiruotųjų plienų kambario temperatūroje deformavimo parametro  $A_1$  išskirčių tikrinimas

Kaip matoma 2.5 pav. nebėra naujų išskirčių. Skaičiavimo rezultatai legiruotųjų plienų deformavimo diagramos parametro  $A_1$  kambario temperatūroje pagal kvartilinį plotą (2.1 poskyr.) pateikti 2.2 lentelėje. Atmetus variacinės sekos ryškiai išsiskiriančius duomenis, reikia iš naujo perskaičiuoti apatinį ir viršutinį kvartilius, kvartilinį plotą ir pertikrinti ar neatsirado naujų išskirčių.

## 2.2 lentelė. Atmetimo tikrinimas naudojant kvartilinį plotą

Tikrinamas parametras	$x_i$	$x_{0,75}$	$x_{0,25}$	KP	Išvados
32	0,92	1,63	1,36	0,27	$0,92 < 0,955^*$ Atmesta
15	1,06	1,63	1,43	0,2	$0,92 < 1,07^*$ Atmesta
Legiruotųjų plienų kambario temperatūroje deformavimo parametro $A_1$ išskirčių tikrinimas					
* Tikrinimas remiantis lygtimis (3.13)					

Atmetus ryškiai išsiskiriančius duomenis  $A_1$  priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo pavaizduota 2.6 paveiksle.



**2.6 pav.** Deformavimo parametro  $A_1$  priklausomybė nuo  $(\sigma_u/\sigma_y)Z$  legiruotiems plienams kambario temperatūroje atmetus ryškiai išsiskiriančius duomenis

Ar gerai buvo atmesti ryškiai išsiskiriantys duomenys stačiakampės diagramos pagalba patikrinama N. Smirnov (N. Smirnov) kriterijumi (2.1 poskyrius), kuris dažnai taikomas kuomet žinomi ne teoriniai parametrai, o jų įverčiai. Skaičiavimo rezultatai pateikti 2.3 lent.

## 2.3 lentelė. Atmetimo tikrinimas N. Smirnov kriterijumi

Tikrinamas parametras	$x_i$	$\sum_{i=1}^n x_i$	$\sum_{i=1}^n x_i^2$	$\bar{x}$	<b>n</b>	<b>s</b>	$u_i$	$u_{0,05}$	Išvados
32	0,92	32,82	49,93	1,492	22	0,215	2,66	2,6	Atmetam*
15	1,06	31,9	49,08	1,519	21	0,177	2,592	2,58	Atmetam*
Legiruotųjų plienų kambario temperatūroje deformavimo parametro $A_1$ išskirčių tikrinimas;									
* Tikrinimas remiantis (3.10) lygtimis.									

Iš 2.3 lent. matoma, kad duomenys 15, 32 pagal N. Smirnovo kriterijų atmetami. Taigi patikrinus grafiškai (2.3 pav – 2.4 pav.), pagal kvartilinį plotą ir N.Smirnovo kriterijų gauta, kad šie taškai yra ryškiai išsiskiriantys ir juos būtina pašalinti iš skaičiavimo duomenų, norint gauti tikslius tolimesnius skaičiavimo rezultatus.

Analogišku būdu bus pašalintos išskirtys likusiems deformavimo diagramos parametrų, kambario ir aukštesnėje temperatūroje.

**2.4 lentelė.** Ryškiai išsiskiriantys duomenys

Tipas	Deformavimo konstantos	Temperatūra	Atmesti taškai, Nr.
Legiruotieji konstrukciniai plienai	$A_1$	Kambario temperatūra (20 °C)	15, 32
	$\alpha$		-
	$s_T$		9
Legiruotųjų konstrukcinių plienų siūlių suvirinimo medžiagos	$\alpha$	Kambario temperatūra (20 °C)	-
	$s_T$		-
	$A_1$		-
Legiruotieji konstrukciniai plienai	$\alpha$	Aukštesnė temperatūra (200 °C -550 °C)	16
	$s_T$		-
	$A_1$		-
Legiruotųjų konstrukcinių plienų siūlių suvirinimo medžiagos	$\alpha$	Aukštesnė temperatūra (200 °C -550 °C)	-
	$s_T$		-
	$A_1$		-

2.4 lentelėje nurodytos legiruotųjų konstrukcinių plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų nustatytame būdingame intervale išskirtys. Šias išskirtis pašalinus bus gauti tolimesni tikslesni rezultatai.

## 2.2 Nustatyto intervalo patikslinimas pagal atmestus ryškiai išsiskiriančius taškus

Norint gauti dar tikslesnius rezultatus, patiksliname nustatytą intervalą. Patikslintą intervalą nustatysime naudodamiesi 2.4 lent. duomenimis, t.y. atmesime ryškiai išsiskiriančius duomenis. Intervalą nustatysime analogišku būdu, kaip 2.1 poskyriuje.

**2.5 lentelė.** Stačiakampės diagramos reikšmės pagal patikslintą sąlygą  $(\sigma_u/\sigma_y)Z$

Procentiliai	25	0,854
	50	0,981
	75	1,254

2.5 lent. gautos reikšmės patikslina intervalą legiruotiesiems plienams kambario temperatūroje (20 °C) deformavimo parametrams  $\alpha$ ,  $s_T$ ,  $A_1$ : 0,854 - 1,254.

**2.6 lentelė.** Patikslinto intervalo reikšmės

Tipas	Deformavimo konstantos	Temperatūra	Intervalas	Patikslintas intervalas
Legiruotieji konstrukciniai plienai	$\alpha$	Kambario temperatūra (20 °C)	0,864 - 1,243	0,854 - 1,254
	$s_T$			
	$A_1$			
Legiruotųjų konstrukcinių plienų siūlių suvirinimo medžiagos	$\alpha$	Kambario temperatūra (20 °C)	0,875 - 1,095	Nepakitęs*
	$s_T$			
	$A_1$			
Legiruotieji konstrukciniai plienai	$\alpha$	Aukštesnė temperatūra (200 °C -550 °C)	0,96 - 1,304	0,958 – 1,275
	$s_T$			
	$A_1$			
Legiruotųjų konstrukcinių plienų siūlių suvirinimo medžiagos	$\alpha$	Aukštesnė temperatūra (200 °C -550 °C)	0,965 – 1,243	Nepakitęs*
	$s_T$			
	$A_1$			

\* - Intervalas išlieka nepakitęs, nes nebuvo atrastą naujų išskirčių (žr. 2.4 lent.)

2.6 lentelėje patikslintas likusiems deformavimo parametrams  $\alpha$ ,  $s_T$ ,  $A_1$  plienams ir plienų siūlėms kambario ir aukštesnėje temperatūroje intervalas. 1–4 prieduose pateikti duomenys nustatyto intervalo ribose, kurie naudojami tolimesniuose skaičiavimuose.

Apibendrinant šiame skyriuje gautus rezultatus ir pateiktą medžiagą, galima teigti, kad norint gauti tikslesnes legiruotųjų konstrukcinių plienų ir jų suvirinimo medžiagų deformavimo konstantų  $s_T$ ,  $A_1$ ,  $\alpha$  priklausomybes nuo modifikuoto plastiškumo  $(\sigma_u/\sigma_y)Z$  nustatomas charakteringas intervalas, nes kitų autorių darbuose pastebėta, kad duomenų sklaida koncentruojasi nustatyto intervalo ribose. Atmestos išskirtys, didinančios dispersiją, iškreipiančios vidutinę reikšmę bei mažinančios koreliacinį ryšį. Duomenų atmetimui buvo panaudotas stačiakampės diagramos grafinis metodas, N. Smirnovo kriterijus bei kvartilinis plotas. Siekiant užtikrinti tikslesnius tolimesnius skaičiavimus, buvo patikslintas nustatytas intervalas.



### **3. STATISTINIS STATINIŲ MECHANINIŲ IR MAŽACIKLIO DEFORMAVIMO PARAMETRŲ TIKRINIMAS**

Kiekvienam realiam objektui egzistuojančiam aplinkiniame pasaulyje, būdinga daugybė įvairių tarpusavyje susietų veiksnių, aibė apribojimų, bei įvairovė tikslų. Išskirti objekto požymiai kinta laike, kartu formuojasi naujos situacijos ir siekiant įgyvendinti pageidaujamus tikslus iškyla naujos problemos, o kartu šioms problemoms išspręsti nauji uždaviniai. Todėl tiriant konstrukcijų stiprumą ir ilgalaikiškumą atliekami eksperimentiniai bandymai ir statistiškai apdorojami jų rezultatai.

Pasak A. Bakšio (2007), statistika yra vienas svarbiausių tikrovės kūrimo metodų. B. Martinėnas (2004) teigia, kad eksperimentu gautas matuojamojo dydžio įvertis, be naudingos informacijos, visuomet turi ir šalutinę, kurios įtaką vertinant eksperimento rezultatą stengiamasi sumažinti taikant matematinės statistikos metodus. Matematinės statistikos metodai eksperimento duomenų analizei pirmiausia pritaikyti fizikos moksle ir jų taikymo ypatybėms atskirose srityse atskleisti skirtos išsamios monografijos. Pažymėtina, kad šių metodų taikymas susijęs su nemažais matematiniais skaičiavimais ir tik kompiuterijos laimėjimai sudarė sąlygas jiems paplisti technikos, inžinerijos moksluose ir kitose srityse, susijusiose su duomenų vertinimu. Šiuo metu pasaulyje sparčiai didėja įvairiose duomenų bazėse kaupiamos įvairios informacijos apimtys ir tobulėja statistinės analizės programinė įranga (SPSS, SAS, STATA ir t.t.), kuri ženkliai palengvina visus reikiamos informacijos gavimo iš duomenų žingsnius.

#### **3.1 Mechaninių ir deformavimo parametrų bei modifikuoto plastiškumo kriterijaus duomenų atsitiktinumo ir nepriklausomumo statistinis tikrinimas**

Eksperimento duomenų analizė yra esminis etapas, kurio metu ne tik nustatomas gautas rezultatas, bet ir eksperimento kokybė, o kartais tokia analizė lemia ir eksperimento sėkmę [22]. Deformavimo diagramų parametrų ir modifikuoto plastiškumo kriterijaus duomenys priklauso nuo daugelio faktorių, tokių kaip temperatūra, mechaniniai poveikiai, nukrypimai nuo technologinio proceso ir pan. Tokie faktoriai vadinami atsitiktiniais. Taip pat neišvengiama ir atsitiktinių paklaidų, nes medžiagų grupių parametrai nustatomi eksperimentiškai.

Norint taikyti matematinius statistinius metodus uždaviniams spręsti turi būti tenkinama tam tikra sąlyga. Bandymų rezultatai turi būti stochastiškai (statistiškai) nepriklausomi. Šiam tikslui panaudotas serijų kriterijus, naudojant imties medianą, bei kylančių ir krintančių serijų kriterijų. Jei sąlyga yra tenkinama, tuomet galima taikyti matematinius statistinius metodus

uždaviniais spręsti, taip pat juos teoriškai pagrįsti koreliacinės ir regresinės analizės metodais.

**Serių kriterijus, naudojant imties medianą.** Duomenų imčiai  $x_1, x_2, \dots, x_n$  elementai surašomi didėjimo tvarka ir sudaroma variacinė seka (žr. (2.1) lygtį). Medianos reikšmė, esant nelyginiam tyrimo rezultatų skaičiui  $n=2m-1$ , yra lygi viduriniam variacinės eilutės nariui:

$$x_{0,5} = x_m, \quad (3.1)$$

o esant lyginiam tyrimo rezultatų skaičiui  $n=2m$ , tuomet medianos reikšmė lygi:

$$x_{0,5} = \frac{x_m + x_{m+1}}{2}. \quad (3.2)$$

Nagrinėtoms duomenų imtims  $x_1, x_2, \dots, x_n$  sudaroma ženklų eilutė: jeigu  $x_i > x_{me}$ , tai variacinės sekos nariui  $x_i$  priskiriamas ženklas „+“, kai  $x_i < x_{me}$  rašomas ženklas „-“. Imties nariai, lygūs medianos reikšmei, buvo praleisti. Taip sudaroma pliusų ir minusų eilutė.

Vienas paskui kitą einanti vienodų ženklų seka vadinama serija. Atskiru atveju seriją gali sudaryti vienas „+“ arba vienas „-“ ženklas. Pliusų ir minusų eilutę charakterizuoja bendras serių skaičius  $\gamma_n$  ir ilgiausios ženklo „+“ arba „-“ serijos elementų skaičius  $\tau_n$ . Jei tyrimo rezultatai yra stochastiškai nepriklausomi, tai pliusų ir minusų eiga turi būti atsitiktinė. Todėl serių eilutėje neturi būti ilgų serių ir serių skaičius  $\gamma_n$  neturi būti labai mažas [8].

Pasirinkus reikšmingumo lygmenį  $\alpha$ , turi būti tenkinamos lygtys:

$$\left. \begin{aligned} \gamma_n &> \left[ \frac{1}{2}(n+1 - x_\alpha \sqrt{n-1}) \right]; \\ \tau_n &< [3.3(\lg n + 1)] \end{aligned} \right\}; \quad (3.3)$$

čia,  $x_\alpha$  - normaliojo pasiskirstymo kvantilis [8]; lygtyje laužtiniai skliaustai reiškia, kad imama sveikoji skaičiaus esančio skliaustuose dalis.

Jei bent viena iš (3.3) lygčių yra netenkinama, tuomet hipotezė apie tyrimo rezultatų nepriklausomumą atmetama.

**Kylančių ir krintančių serių kriterijus.** Nagrinėjamai duomenų imčiai  $x_1, x_2, \dots, x_n$  buvo sudaryta pliusų ir minusų seka: kai  $x_{i+1} - x_i > 0$ , tai variacinės sekos nariui  $x_i$  priskiriamas ženklas „+“, kai  $x_{i+1} - x_i < 0$ , rašomas ženklas „-“. Kai du ar daugiau vienas po kito einantys imties elementai tarpusavyje lygūs, tai imamas vienas iš jų.

Ženklų eilutėje pliusų serija žymi nagrinėjamų duomenų reikšmių didėjimą (kylanti serija), tuo tarpu minusų serija atitinka mažėjimą (krentanti serija). Kai tyrimo rezultatai yra nepriklausomi ir atsitiktiniai, tai sudarytoje ženklų eilutėje serių skaičius neturi būti labai mažas, taigi ir serijos ilgis neturi būti didelis [8].

Turimi duomenys yra atsitiktiniai, jei esant pasirinktam reikšmingumo lygmeniui  $\alpha$ , teisinga lygtis:

$$\left. \begin{aligned} \gamma_n &> \left[ \frac{1}{3} (2n-1 - x_\alpha \sqrt{\frac{16n-29}{30}}) \right]; \\ \tau_n &< \tau_k \end{aligned} \right\}; \quad (3.4)$$

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

Legiruotųjų konstrukcinių plienų deformavimo diagramos parametro  $A_1$  duomenų aukštesnėje temperatūroje pasirinktame intervale atsitiktinumo ir nepriklausomumo statistinis tikrinimas, naudojant imties medianą bei kylančių ir krintančių serijų kriterijus, pateikti 3.1 lent. ir 3.2 lent. Tokiu būdu tikrintos visų analizuojamų legiruotųjų plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų deformavimo charakteristikų bei modifikuoto plastiškumo kriterijaus skaitinės reikšmės.

**3.1 lentelė.** Serijų kriterijus, naudojant medianą

$i$	$A_1$	$x_i > x_{me}; x_i < x_{me}$	<i>Skaičiavimai</i>
1	1,44	-	$x_{me} = 1,52;$ $\gamma = 7 > \left[ \frac{1}{2} (11+1 - 1,64\sqrt{11-1}) \right] = 3,4$ $\tau = 2 < [3,3(\lg 11 + 1)] = 11,2$
2	1,9	+	
3	1,67	+	
4	1,34	-	
5	1,28	-	
6	1,52	-	
7	1,65	+	
8	1,48	-	
9	1,46	-	
10	1,55	+	
11	1,39	-	
Legiruotųjų plienų aukštesnėje temperatūroje deformavimo parametro $A_1$ nepriklausomumo statistinis tikrinimas			

3.1 lent. gautų skaičiavimo rezultatų matoma, kad (3.3) lygtys teisingos ir galima teigti, kad legiruotųjų plienų deformavimo parametro  $A_1$  aukštesnėje temperatūroje duomenys yra statistiškai nepriklausomi.

### 3.2 lentelė. Kylančių ir krintančių serijų kriterijus

<i>i</i>	<i>AI</i>	$x_{i+1} - x_i > 0; x_{i+1} - x_i < 0;$	<i>Skaičiavimai</i>
1	1,44	+	$\gamma = 6 > \left[ \frac{1}{3} (2 \cdot 11 - 1 - 1,64 \sqrt{\frac{16 \cdot 11 - 29}{30}}) \right] = 5,7$ $\tau = 2 < 3$
2	1,9	-	
3	1,67	-	
4	1,34	-	
5	1,28	+	
6	1,52	+	
7	1,65	-	
8	1,48	-	
9	1,46	+	
10	1,55	-	
11	1,39		
Legiruotųjų plienų aukštesnėje temperatūroje deformavimo parametro $A_1$ nepriklausomumo statistinis tikrinimas			

Iš 3.2 lent. galima daryti išvadą, kad legiruotųjų plienų deformavimo parametro  $A_1$  aukštesnėje temperatūroje duomenys yra statistiškai nepriklausomi, nes (3.4) lygtys yra teisingos.

Analogišku būdu (žr. 3.1 lent., 3.2 lent.) patikrinami duomenys likusiems deformavimo diagramos parametrams, kambario ir aukštesnėje temperatūroje.

### 3.2 Deformavimo parametrų ir modifikuoto plastiškumo kriterijaus reikšmių pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį hipotezių tikrinimas

Platus normaliojo pasiskirstymo dėsnio taikymas patikimumo skaičiavimuose paaiškinamas tuo, kad suma didelio skaičiaus nepriklausomų atsitiktinių dydžių, tarp kurių nėra labiausiai veikiančių šią sumą, pasiskirsto pagal normalųjį dėsnį nepriklausomai nuo dėmenų pasiskirstymo dėsnų [18].

Tiriant duomenų išsidėstymą, reikia žinoti jų pasiskirstymo dėsnius. Jie nustatyti remiantis eksperimento rezultatais. Legiruotųjų plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų ciklinio deformavimo diagramos parametrų  $\alpha$ ,  $s_T$ ,  $A_1$  priklausomybės nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus  $(\sigma_u/\sigma_y)Z$  skaičiavimo metodika reikalauja, kad šių dydžių reikšmės būtų atsitiktinės bei pasiskirsčiusios pagal normalųjį skirstinį.

**Vidutinio absoliutinio nuokrypio (VAN) naudojimas.** Esant nedideliui skaičiui  $n$ , kaip sklaidos matą nuo vidutinės reikšmės rekomenduojama naudoti vidutinį absoliutinį

nuokrypį, kuris sumažina ekstremalių reikšmių įtaką. Vidutinis absoliutinis nuokrypis apskaičiuojamas pagal lygybę:

$$VAN = \frac{\sum |x_i - \bar{x}|}{n}, \quad (3.5)$$

kai tyrimo rezultatai artimi normaliajam dėsnui, turi būti tenkinama lygtis:

$$\left| \frac{VAN}{s} - 0.7979 \right| < \frac{0.4}{\sqrt{n}}; \quad (3.6)$$

čia,  $s$  – empirinis vidutinis kvadratinis nuokrypis apskaičiuojamas pagal (2.7) lygybę [11].

Kaip pavyzdį pateikiame legiruotųjų konstrukcinių plienų suvirinimo siūlių medžiagų deformavimo diagramos parametro  $\alpha$  aukštesnėje temperatūroje nustatytame intervale 0,965 – 1,243 pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį tikrinimą (3.3 lent.).

### 3.3 lentelė VAN metodo skaičiavimo rezultatai

n	$x_i$	$\bar{x}$	VAN	s	$\left  \frac{VAN}{s} - 0.7979 \right  < \frac{0.4}{\sqrt{n}}$
					<i>Išvados</i>
1	-0,013	0,0082	0,0106	0,0128	0,03 < 0,11
2	0,007				
3	-0,003				
4	-0,008				
5	0,003				
6	0,006				Galima daryti išvadą kad šie tikrinti duomenys yra pasiskirstę pagal normalųjį skirstinį
7	0,018				
8	0,018				
9	1,00E-03				
10	0,024				
11	0,022				
12	0,004				
13	0,028				

Magistriniame darbe tikriname legiruotųjų konstrukcinių plienų suvirinimo siūlių medžiagų deformavimo parametro  $\alpha$  aukštesnėje temperatūroje pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį naudojant **Deivido kriterijų (H.A. David)**. Tyrimo duomenų pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį hipotezės tikrinimas gali būti atliktas **naudojant imties plotį (IP)**. IP naudingas, kai nėra išsiskiriančių reikšmių, bei kai  $n$  daugiau arba lygu 3 ir mažiau arba lygu 1000 ( $3 \leq n \leq 1000$ ). Sklaidos charakteristika parodo egzistuojantį atotrūkį tarp didžiausios ( $x_{\max}$ ) ir mažiausios ( $x_{\min}$ ) imties reikšmių.

Nulinė hipotezė ( $H_0$ ) – legiruotų konstrukcinių plienų suvirinimo siūlių medžiagų deformavimo parametro  $\alpha$  skirstinys yra normalus. Norint patikrinti hipotezę, pasak L. Zaks (1976), pirmiausia reikia pasirinkti hipotezės reikšmingumo lygmenį ( $p$ ). Apskaičiuojamas

santykis tarp imties ploto ir standartinio nuokrypio, apskaičiuotą santykį IP/s lyginame su viršutinėmis ir apatinėmis kritinėmis santykio ribomis. Jeigu santykio reikšmė mažesnė (didesnė) už šį lygmenį atitinkančią apatinės (viršutinės) ribos reikšmę, tai esant pasirinktam  $p$ , hipotezė – atmetama.

Darbe pasirinktas reikšmingumo lygmuo  $p=0,05$ , t.y. 95 %. Įvertinamas imties plotis ( $x_{\max} - x_{\min}$ )  $IP=0.041$ . Apskaičiuotas dispersijos įvertis  $s^2=0.000164$  ir standartinis nuokrypis  $s=0.01279$ . Gautas Deivido kriterijus  $IP/s=3.206$ . Pasirinktas reikšmingumo lygmuo 90% ( $p=0.1$ ),  $n=13$ , šį lygmenį atitinkanti apatinė riba - 2.86, viršutinė – 4 ( $2.86 < 3,206 < 4$ ) [8, p.299, 72 lent.]. Taigi, galima daryti išvadą, kad nulinės hipotezės ( $H_0$ ) atmesti negalima ir su 95 % tikimybe galima teigti, kad plienų suvirinimo siūlių medžiagų deformavimo parametro  $\alpha$  skirstinys yra normalus.

**Šapiro ir Vilko suderinamumo kriterijus W** (S. S. Shapiro, M. . Wilk) naudojamas hipotezės tikrinimui, ar tyrimo rezultatai yra pasiskirstę pagal normalųjį arba logaritminį normalųjį dėsnį. Kai duomenų skaičius yra 50 arba mažesnis ( $n \leq 50$ ), tuomet šis kriterijus su didesne tikimybe atmeta neteisingą hipotezę. Pradžioje tyrimo rezultatai išdėstomi variacine seka ( žr. (2.1) lygtį) [8].

Šapiro ir Vilko kriterijus W, apskaičiuojamas pagal:

$$W = \frac{b^2}{S^2}, \quad (3.7)$$

Dydžiai b ir  $S^2$  apskaičiuojami pagal:

$$S^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{n}; \quad (3.8)$$

$$b = \sum_{i=1}^k a_{n-i+1} (x_{n-i+1} - x_i); \quad (3.9)$$

čia  $a_{n-i+1}$  ( $i=1, 2, 3, \dots, k$ ) reikšmė parenkama iš lentelių [8, 219 p.]. 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 lygtis:

$$W \geq W_p, \quad (3.10)$$

čia  $W_p$  - kritinė Šapiro ir Vilko kriterijaus reikšmė [8, 221 p.], parinkta pagal reikšmingumo lygmenį  $p$ .

Šiuo metodu pateikiamas normalumo pasiskirstymas, legiruotųjų konstrukcinių plienų siūlių medžiagoms deformavimo diagramos parametru  $s_T$  aukštesnėje temperatūroje. Duomenys ir skaičiavimo rezultatai pateikti 3.4 lent, 3.5 lent.

**3.4 lentelė.** Legiruotųjų plienų aukštesnėje temperatūroje deformavimo diagramos charakteristikos  $s_T$  reikšmių išdėstymo variacine seka

$n$	$s_T$	$n$	$s_T$	$n$	$s_T$	$\sum_{i=1}^n x_i^2$	$\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2$
1	1,41	11	1,69	21	1,84	87,13	2419,6
2	1,55	12	1,7	22	1,87		
3	1,55	13	1,72	23	1,93		
4	1,6	14	1,74	24	1,93		
5	1,6	15	1,77	25	1,96		
6	1,61	16	1,78	26	2,01		
7	1,61	17	1,82	27	2,02		
8	1,62	18	1,83	28	2,05		
9	1,64	19	1,83				
10	1,67	20	1,84				

**3.5 lentelė.** Legiruotųjų plienų aukštesnėje temperatūroje deformavimo diagramos charakteristikos  $s_T$  skaičiavimo rezultatai, naidojant Šapiro i Vilko kriterijų

$i$	$a_{n-1+i}$	$(s_T)_{n-i+1}$	$(s_T)_i$	$S^2$	$b^2$	$W$	$W \geq W_p, \text{ kai } p=0,05$
							<i>Išvados</i>
1	0,4328	2,05	1,41	0,71	0,691	0,973	$0,973 \geq 0,924$
2	0,2992	2,02	1,55				
3	0,251	2,01	1,55				
4	0,2151	1,96	1,6				
5	0,1857	1,93	1,6				
6	0,1601	1,93	1,61				
7	0,1372	1,87	1,61				
8	0,1162	1,84	1,62				Lygties (3.10) sąlyga yra tenkinama
9	0,0965	1,84	1,64				
10	0,0778	1,83	1,67				
11	0,0598	1,83	1,69				
12	0,0424	1,82	1,7				
13	0,0253	1,78	1,72				
14	0,0084	1,77	1,74				

Matoma iš 3.5 lent. gautų rezultatų, jog su 95% tikimybe galima teigti, kad legiruotųjų konstrukcinių plienų deformavimo diagramos charakteristikos  $s_T$  aukštesnėje temperatūroje reikšmių skirstinys yra normalus.

**Kolmogorovo ir Smirnovo testas.** Suderinamumo hipotezes rekomenduojama tikrinti įvairiais būdais. Remiantis skirtingais kriterijais, atstumas tarp teorinio ir empirinio skirstinio išmatuojamas įvairiais matais. Todėl, taikant keletą kriterijų, gaunama daugiau informacijos. Kadangi duomenys yra pasiskirstę pagal normalųjį skirstinį, o nagrinėjamos duomenų imtys nėra didelės patogu ir tikslinga atlikti neparametrinį Kolmogorovo – Smirnovo testą (angl. A.

Kolmogorov, N. Smirnov). Kolmogorovas ir Smirnovas suderinamumo hipotezės tikrinimui pasiūlė statistiką, kuri matuojant atstumą tarp empirinio ir teorinio skirstinių įvertina skirtumą tarp empirinio skirstinio funkcijos  $F_n(x)$  ir teorinio skirstinio funkcijos  $F(x)$ :

$$Z = \sqrt{n} \max |F_n(x) - F(x)|. \quad (3.11)$$

Kolmogorovo-Smirnovo kriterijus taikomas tikrinant suderinamumo hipotezę [23]. Magistriniame darbe pasirinkus reikšmingumo lygmenį  $p=0,05$  iškeliamos tokios hipotezės:

$H_0$ : legiruotųjų konstrukcinių plienų aukštesnėje temperatūroje deformavimo charakteristikos atsitiktinio dydžio  $s_T$  skirstinio funkcija yra  $F(x)$ .

Tikrinant Kolmogorovo – Smirnovo suderinamumo hipotezę, naudojama „SPSS Statistics 20“ programa bei taikoma statistika, kuri įvertina skirtumą tarp empirinio skirstinio funkcijos  $F_n(x)$  ir teorinio skirstinio  $F(x)$ .

**3.6 lentelė.** Suderinamumo hipotezės tikrinimo rezultatai (Kolmogorovo Smirnovo suderinamumo kriterijus, SPSS)

		$s_T$
Imties didumas n		12
Normaliojo skirstinio parametrai	Vidurkis	1,708
	Standartinis nuokrypis	0,053
Labiausiai išsiskiriančios reikšmės	Absoliuti reikšmė	0,206
	Teigiama reikšmė	0,150
	Neigiama reikšmė	-0,206
Kolmogorovo-Smirnovo kriterijus Z		0,715
Stebėtas reikšmingumo lygmuo p		0,686

3.6 lent.nurodyti duomenys: imties didumas ( $n=12$ ); normaliojo skirstinio parametrų taškiniai įverčiai apskaičiuoti pagal negrupuotus duomenis (vidurkis 1,708 ir standartinis nuokrypis 0,053); didžiausio skirtumo tarp empirinio skirstinio funkcijos  $F_n(x)$  ir teorinio skirstinio funkcijos  $F(x)$  absoliutinis didumas  $\max |F_n(x) - F(x)| = 0,206$ . Didžiausias teigiamas ir didžiausias neigiamas skirtumai atitinkamai 0,15 ir -0,206; Kolmogorovo ir Smirnovo statistikos kriterijus  $Z=0,715$  ir  $p$ -reikšmė 0,686. Kadangi  $p=0,686 > 0,05$  tai atmesti  $H_0$  nėra pagrindo.

Galima daryti išvadą, kad su 95% tikimybe legiruotųjų konstrukcinių plienų aukštesnėje temperatūroje deformavimo charakteristikos atsitiktinio dydžio  $s_T$  skirstinys yra normalus.



### 3.3 Tyrimo rezultatų koreliacinė – regresinė analizė

Pasak V. Boguslauskas (1999), tyrimuose dažnai tenka nustatyti dviejų dydžių – Y, vadinamo išėjimo kintamuoju (pasekme), ir X, vadinamo įėjimo kintamuoju (priežastimi), - tarpusavio ryšį. Pasaulyje esama nepaprastos įvairovės šių ryšių tipų, bet visus juos galima suskirstyti į dvi grupes: *funkcinius* ir *koreliacijas*.

Kiekvieną funkcinio ryšio įėjimo kintamojo reikšmę atitinka griežtai apibrėžta, fiksuota išėjimo kintamojo reikšmė. Koreliacijos ryšio įėjimo kintamojo kitimas veikia tik išėjimo kintamojo vidutines reikšmes. Kai yra šis ryšys, esant tai pačiai įėjimo kintamojo reikšmei, išėjimo kintamojo reikšmės gali būti skirtingos. Koreliacijos ryšys ryškėja tik per statistinius stebėjimus, formaliai jis užrašomas lygtimi:  $Y=F(X)+\varepsilon$ , kur  $\varepsilon$  – atsitiktinė dedamoji, įvertinanti ir X, ir Y atsitiktinį pobūdį. Kai yra koreliacijos ryšys, funkcija  $Y=F(X)$  vadinama regresijos lygtimi (modeliu), o jos koeficientai – regresijos koeficientais.

Regresinės lygties kintamųjų ryšio stiprumą nusako ryšio glaudumo rodikliai: koreliacijos koeficientas r; koreliacijos santykis R; determinacijos koeficientas D [24].

**Koreliacijos koeficientas.** Koreliacijos koeficientų yra daug ir jų pasirinkimas priklauso nuo analizuojamų kintamųjų skirstinių, vertinamų ryšių formų ir t.t. Šiame poskyryje nagrinėjamas tik Pirsono koreliacijos koeficientas, kuris plačiai naudojamas tiesinėje regresinėje analizėje. Pirsono koreliacijos koeficientas įvertina tiesinio ryšio stiprumą. Jis gali būti naudojamas, kai stebimų atsitiktinių dydžių X ir Y reikšmės yra išmatuotos intervalų arba santykių skalėje, o jų dvimatis skirstinys yra normalusis. Populiacijos Pirsono koreliacijos koeficiento taškinis įvertis (imties Pirsono koreliacijos koeficientas) apskaičiuojamas taikant formulę:

$$r = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\sqrt{x^2 - (\bar{x})^2} \sqrt{y^2 - (\bar{y})^2}}. \quad (3.12)$$

Tiesinis ryšys tuo stipresnis, kuo |r| reikšmė bus arčiau 1. Jei  $r>0$ , tai didėjant vieno atsitiktinio dydžio reikšmėms, kito reikšmės tiesiškai didėja. Jei  $r<0$ , tai didėjant vieno atsitiktinio dydžio reikšmėms, kito reikšmės mažėja. Jei  $r=0$ , arba artimas jam, tai dar nereiškia, kad kintamieji x ir y yra nepriklausomi ar menkai priklausomi: jie gali būti susieti ne tiesine, o priklausomybe [25].

Deformacijų diagramos charakteristikų koreliacinė analizė nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus atlikta „OriginPro 8” programos pagalba. 3.7 lentelėje pateikiamas modifikuoto plastiškumo kriterijaus ir legiruotųjų plienų deformavimo charakteristikos  $A_1$  aukštesnėje temperatūroje koreliacijos analizė pagal Pirsono koreliacijos koeficientą.

**3.7 lentelė.** Pirsono koreliacijos koeficientas (Pearson Corr.) legiruotųjų plienų deformavimo parametro  $A_1$  aukštesnėje temperatūroje gautas “OriginPro 8” pagalba

Pirsono koreliacijos koeficientas			
		$A_1$	$(\sigma_u/\sigma_y)Z$
$A_1$	Pirsono koef.	1	0,461
	$p$ - reikšmė	-	0,154
$(\sigma_u/\sigma_y)Z$	Pirsono koef.	0,461	1
	$p$ - reikšmė	0,154	-

Iš lentelės 3.7 galima teigti kad, deformavimo charakteristikos  $A_1$  priklausomybė tarp modifikuoto plastiškumo kriterijaus yra vidutinio stiprumo  $r=0,460$ .

Visų magistriniame darbe analizuotų medžiagų deformavimo diagramos charakteristikų koreliacinė priklausomybė (pagal Pirsono koreliacijos koef.) esant tiesinei deformavimo diagramos parametrų priklausomybei nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus  $(\sigma_u/\sigma_y)Z$  pateikta 3.8 lent.

**3.8 lentelė.** Pirsono koreliacijos koeficientas

Medžiagų grupė	Deformavimo diagramos charakteristikos	Bendros grupės Pirsono koreliacijos koeficientas $r$ [15]	Nustatyto intervalo Pirsono koreliacijos koeficientas $r$	Temperatūra
Plienai	$\alpha$	-0,598	-0,658	Kambario temperatūra (20 °C)
	$s_T$	0,475	0,640	
	$A_1$	0,460	0,501	
Plienų siūlės	$\alpha$	-0,240	0,341	Kambario temperatūra (20 °C)
	$s_T$	0,366	0,509	
	$A_1$	0,343	0,357	
Plienai	$\alpha$	-0,415	-0,637	Aukštesnė temperatūra (200 °C -550 °C)
	$s_T$	0,308	0,396	
	$A_1$	0,392	0,460	
Plienų siūlės	$\alpha$	0,501	0,807	Aukštesnė temperatūra (200 °C -550 °C)
	$s_T$	0,531	0,510	
	$A_1$	-0,374	-0,550	

Iš 3.8 lent. galima spręsti, kad nustačius būdingą intervalą gautas stipresnis ryšys tarp mechaninių ir deformavimo charakteristikų, nei bendros grupės analizuojamų medžiagų.

**Determinacijos koeficientas** rodo, kokią viso išėjimo (Y) kintamojo kitimo dalį nulemia įėjimo (X) kintamojo kitimas, o (100-D) – likę neįvertinti veiksniai. Tiesinės ir netiesinės koreliacijos atveju apskaičiuojamas determinacijos koeficientas [24]:

$$D = r^2 \cdot 100\% = R^2 \cdot 100\% \quad (3.13)$$

Pagal A. Stulpinaitę (2009),  $R^2$  ne taip tiksliai įvertina tiriamus duomenis kaip pataisytas determinacijos koeficientas  $R_a^2$ :

$$R_a^2 = R^2 - \frac{k(1-R^2)}{(n-k-1)} \quad (3.14)$$

Pataisyto apibrėžtumo koeficiento reikšmė  $R_a^2 \cdot 100\%$  žymi sklaidos apie vidurkį procentų dalį, kurią galima paaiškinti tiesine regresija. Kuo didesnė šio koeficiento reikšmė, tuo duomenys yra mažiau nutolę nuo mažiausių kvadratų metodu gautos regresinės tiesės.

Šiuos koeficientus (koreliacijos koeficientą  $r$ , determinacijos koeficientą  $R^2$  ir pataisytą determinacijos koeficientą  $R_a^2$ ), kurie apibūdina tiesinio ryšio stiprumą, galima nesunkiai apskaičiuoti „OriginPro 8” programos pagalba. Pateikiamas legiruotųjų konstrukcinių plienų modifikuoto plastiškumo ir deformavimo parametro  $\alpha$  aukštesnėje temperatūroje tiesinio ryšio stiprumo vertinimas 3.9 lent

**3.9 lentelė.** Legiruotųjų konstrukcinių plienų modifikuoto plastiškumo ir deformavimo parametro  $\alpha$  aukštesnėje temperatūroje tiesinio ryšio stiprumo vertinimas

	$\alpha$
Pirsono koreliacijos koeficientas	0,637
Determinacijos koeficientas	0,406
Pataisytas determinacijos koeficientas $R_a^2$	0,321

Regresinės analizės metu tiesinės analizės modelio taikymas yra abejotinas, jei  $R_a^2 < 0,25$  [15]. Taigi galima teigti, kad legiruotųjų plienų modifikuoto plastiškumo kriterijaus ir deformavimo charakteristikos  $\alpha$  reikšmių aukštesnėje temperatūroje tiesinio ryšio stiprumas yra pakankamas, t.y. 32,1% sklaidos apie vidurkį, nes  $R_a^2 > 0,25$ .

**Regresinė analizė.** Koreliacinė analizė parodė, kad tarp daugumos plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų deformavimo diagramos charakteristikų  $A_1$ ,  $\alpha$ ,  $\sigma_T$  ir modifikuoto plastiškumo normalioje ir aukštesnėje temperatūroje egzistuoja koreliacinis ryšys, t.y. egzistuoja tiesinis ryšys, kurį galima aprašyti empirine regresijos tiesės lygtimi [2]:

$$y = a + bx, \quad (3.15)$$

čia  $a$  ir  $b$  regresijos linijos parametrų įverčiai apskaičiuojami pagal formules:

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (3.16)$$

$$b = r \frac{S_y}{S_x} \quad (3.17)$$

Apskaičiavus regresinės lygties koeficientus, dažniausiai tikrinama hipotezė, kad tarp kintamųjų  $X$  ir  $Y$  nėra jokio tiesinio ryšio, t.y. ar  $a$  ir  $b$  lygūs nuliui. Šios hipotezės tikrinimui taikomas Stjudento  $t$  kriterijus [15]:

$$(n-2)t \sim \begin{cases} t = \frac{\alpha}{S_{\alpha}} \\ t = \frac{\beta}{S_{\beta}} \end{cases} \quad (3.18)$$

čia  $S_{\alpha}$  ir  $S_{\beta}$  yra koeficientų  $a$  ir  $b$  standartinės paklaidos.

Šiame darbe regresinės lygties koeficientų nustatymas ir jų reikšmingumo hipotezės tikrinimas atliktas „OriginPro 8“ ir „SPSS 20“ programomis. 3.10 lent. pateikiamos legiruotųjų konstrukcinių plienų deformavimo diagramos charakteristikos  $\alpha$  nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus kambario temperatūroje regresinės lygties koeficientų nustatymas.

**3.10 lentelė.** Legiruotųjų konstrukcinių plienų deformavimo diagramos charakteristikos  $\alpha$  nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus kambario temperatūroje regresinės lygties koeficientų nustatymas

Koeficientas	Regresijos lygties koeficientai (Unstandardized Coefficients)		Normuoti koeficientai (Standardized Coefficients)	Stebėta Stjudento statistikos reikšmė (t)	Stebėtas reikšmingumo lygmuo ( $p$ – reikšmė) (Sig.)
	Koeficientų taškiniai įverčiai	Koeficientų standartinės paklaidos (Std. Error)	(Beta)		
$a$ (constant)	0,090	0,021		4,291	0,000
$b$	-0,073	0,020	-0,658	-3,601	0,002

Taigi iš 3.10 lent. gaunama lygtis  $\alpha=0,09-0,073(\sigma_u/\sigma_y)Z$ , kurios gauti regresinės lygties koeficientai tikrinami pagal hipotezę: ar legiruotųjų plienų deformavimo parametro  $\alpha$  nuo  $(\sigma_u/\sigma_y)Z$  kambario temperatūroje regresijos lygties koeficientai yra reikšmingi, esant pasirinktam reikšmingumo lygmeniui  $p=0,1$ :

$H_0$ :  $a$  ir  $b$  nereikšmingi;

$H_1$ :  $a$  ir  $b$  reikšmingi.

Vadovaujantis 3.10 lent. duomenimis, galima atmesti  $H_0$  hipotezę, nes programos reikšmingumo lygmuo  $p$  yra mažesnis už pasirinktą reikšmingumo lygmenį  $p=0,1$ . Taigi su 90% tikimybe galima teigti, kad plienų deformavimo parametro  $\alpha$  nuo  $(\sigma_u/\sigma_y)Z$  kambario temperatūroje regresijos lygties koeficientai yra reikšmingi.

**Prognozavimo paklaidų vertinimas.** Kai turima  $n$  duomenų porų  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots (x_i, y_i), \dots, (x_n, y_n)$ , galima įvertinti atsitiktinio dydžio  $Y$  sąlyginę dispersiją, panaudojant nuokrypių kvadratų vidurkį (dispersiją) apie regresijos tiesę [15]:

$$s_{y/x}^2 = s_y^2 (1-r^2) \frac{n-1}{n-2}. \quad (3.19)$$

Skaidos dydis apie regresijos tiesę nusakomas standartine regresijos paklaida:

$$\delta_y = \sqrt{s_{y/x}^2}; \quad (3.20)$$

Apskaičiuojama regresinės tiesės lygties koeficientų dispersija:

$$s_{Y/x}^2 = s_{y/x}^2 \left[ \frac{1}{n} + \frac{(x_{pi} - \bar{x})^2}{(n-1)s_x^2} \right]. \quad (3.21)$$

Standartinis nuokrypis apskaičiuojamas pagal:

$$s_{Y/x} = \sqrt{s_{y/x}^2} \quad (3.22)$$

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

Pasikliautinis intervalas nustatomas:

$$\hat{y} - s_{Y/x} \cdot t_{p,k} < \hat{y}_{pi} < \hat{y} + s_{Y/x} \cdot t_{p,k}; \quad (3.23)$$

čia,  $t_{p,k}$  – Stjudento kriterijaus reikšmė, nustatoma remiantis literatūros šaltiniu [8, 208 p.],

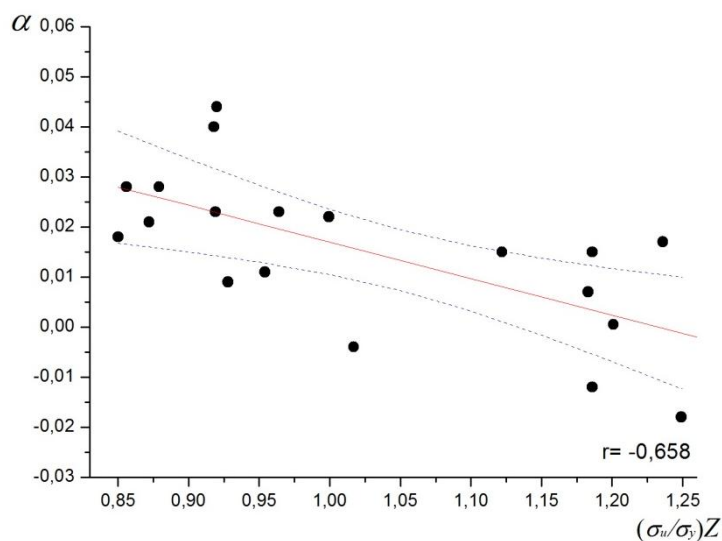
pasirenkant reikšmingumo lygmenį  $p=0,05$  ir laisvės laipsnių skaičių  $k=n-2$ .

Legiruotųjų plienų kambario temperatūroje tiesinės regresijos  $\alpha=0,09-0,073(\sigma_u/\sigma_y)Z$  prognozuojamų reikšmių pasikliautinoji juosta su 95% tikimybe nustatymo skaičiavimai pateikiami 3.11 lent.

**3.11 lentelė.** Tiesinės regresinės lygties  $y=0,09-0,073x$ , 95% prognozuojamų reikšmių pasikliautiniosios juostos ribų nustatymas, kai  $t_{p,k} = 2,120$ ,  $p=0,05$

<i>Legiruotųjų plienų kambario temp. lygties: <math>\alpha=1,113-5,928(\sigma_u/\sigma_y)Z</math> skaičiavimai</i>									
$x = \frac{\sigma_u}{\sigma_y} Z$	$y = a + bx$	$s_x^2$	$(x - \bar{x})^2$	$\frac{(x - \bar{x})^2}{(n-1)s_x^2}$	$s_{y/x}^2$	$s_{Y/x}$	$s_{Y/x} \cdot t_{p,k}$	$y - s_{Y/x} \cdot t_{p,k}$	$y + s_{Y/x} \cdot t_{p,k}$
0,85	0,02795	0,01875	0,04	0,267	6,475E-05	0,0049	0,01118	0,0167628	0,039137
0,9	0,0243		0,0225	0,150		0,0041	0,00930	0,0149993	0,033601
0,95	0,02065		0,01	0,067		0,0033	0,00767	0,0129756	0,028324
1	0,017		0,0025	0,017		0,0028	0,00650	0,0104937	0,023506
1,05	0,01335		4,93038E-32	0,000		0,0026	0,00606	0,0072829	0,019417
1,1	0,0097		0,0025	0,017		0,0028	0,00650	0,0031937	0,016206
1,15	0,00605		0,01	0,067		0,0033	0,00767	-0,001624	0,013724
1,2	0,0024		0,0225	0,150		0,0041	0,00930	-0,006901	0,011701
1,25	-0,0012		0,04	0,267		0,0049	0,01118	-0,012437	0,009937

Legiruotųjų plienų deformavimo diagramos charakteristikos  $\alpha$  priklausomybė nuo  $(\sigma_u/\sigma_y)Z$  kambario temperatūroje ir 95% prognozuojamų reikšmių pasikliautinios juostos (punktyrinė linija) skaičiavimo rezultatai grafiškai pateikti 3.1 pav.



**3.1 pav.** Deformavimo konstantos  $\alpha$  priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus  $(\sigma_u/\sigma_y)Z$  legiruotiesiems konstrukciniams plienams kambario temperatūroje ir 95% prognozuojamų reikšmių pasikliautinoji juosta (punktyrinė linija)

**Tiesinio regresinio modelio adekvatumo tikrinimas.** Adekvatumo tikrinimo metodu, iškėlus hipotezę, galima įvertinti ar gautas koreliacinis ryšys tarp kintamųjų yra statistškai reikšmingas. Šiai hipotezei patikrinti, naudosime Fišerio kriterijų [15] [26]:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y} - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2 \cdot \frac{1}{n-2}}, \sim F(1, n-2); \quad (3.24)$$

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

Pasirinkus reikšmingumo lygmenį  $p=0,05$ , iškeliamos hipotezės:

$H_0$ : gautas tiesinis ryšys yra statistškai nereikšmingas;

$H_a$ : gautas tiesinis ryšys yra statistškai reikšmingas.

Legiruotųjų plienų deformavimo charakteristikos  $\alpha$  nuo  $(\sigma_u/\sigma_y)Z$  kambario temperatūroje regresijos tiesiškumas, tikrinamas naudojant “SPSS Statistics 20” programą, kuri Fišerio kriterijų apskaičiuoja pagal adekvatumo analizės 3.24 lygybę. Skaičiavimo rezultatai pateikti 3.12 lent.

**3.12 lentelė.** Legiruotųjų plienų deformavimo charakteristikos  $\alpha$  nuo  $(\sigma_u/\sigma_y)Z$  tiesinio ryšio adekvatumo tyrimas

Nuokrypių šaltinis	Nuokrypių kvadratų suma ( <i>Sum of squares</i> )	Laisvės laipsnių skaičius ( <i>df</i> )	Nuokrypių kvadratų vidurkis ( <i>Mean Square</i> )	Stebėto Fišerio statistikos reikšmės ( <i>F</i> )	Reikšmingumo lygmuo (Sig.) <i>p</i> - reikšmė
	<b>Skaičiavimo rezultatas</b>	<b>Skaičiavimo rezultatas</b>	<b>Skaičiavimo rezultatas</b>	<b>Skaičiavimo rezultatas</b>	<b>Skaičiavimo rezultatas</b>
Regresija (Regression)	$\sum_{i=1}^n (\hat{y} - \bar{y})^2$	<i>K</i>	$\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y} - \bar{y})^2}{K}$	$F = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y} - \bar{y})^2 / K}{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2 \cdot \frac{1}{n - K - 1}}$	$p^a$
	<b>0,002</b>	<b>1</b>	<b>0,002</b>		
Atsitiktiniai faktoriai (paklaidos) (Residual)	$\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2$	<i>n-k-1</i>	$\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2}{n - K - 1}$	<b>12,965</b>	<b>0,002<sup>a</sup></b>
	<b>0,003</b>	<b>17</b>	<b>0,00</b>		
Bendrai (Total)	$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$	<i>n-1</i>			
	<b>0,005</b>	<b>18</b>			

a. Nepriklausomi kintamieji (Predictors): Konstanta (Constant)

b. Priklausomas kintamasis (Dependent Variable):Y

Iš 3.12 lent. skaičiavimo duomenų matyti, kad gautas Fišerio kriterijus  $F=12,965$  su reikšmingumo lygmeniu  $p^a=0,002$  yra mažesnis už pasirinktą reikšmingumo lygmenį  $p=0,05$  ( $p^a=0,002 < p=0,05$ ). Taigi  $H_0$  hipotezė yra atmetama ir su 95% tikimybe galima teigti, kad analizuojamos plienų grupės deformavimo diagramos charakteristikos  $\alpha$  nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus  $(\sigma_u/\sigma_y)Z$  egzistuoja reikšmingas tiesinis ryšys ir koreliacijos koeficientas nelygus nuliui ( $r \neq 0$ ).

Likusiųjų deformavimo diagramos charakteristikų adekvatumo tikrinimas pateikiamas 3.13 lent. Pasirinktas reikšmingumo lygmuo  $p=0,1$ .

**3.13 lentelė.** Tiesinio ryšio adekvatumo tyrimas (Fišerio kriterijus), su 90% tikimybe, kad regresija yra tiesinė

KAMBARIO TEMPERATŪROJE				
Legiruotieji plienai				
Deformavimo diagramos charakteristika	Fišerio statistikos reikšmė $F$	Reikšmingumo lygmuo $p^a$	Pasirinktas reikšmingumo lygmuo $p$	Išvados*
$s_T$	11,818	0,003	0,1	+
$\alpha$	12,965	0,002		+
$A_1$	5,7	0,029		+
Legiruotųjų plienų suvirinimo siūlių medžiagos				
$s_T$	9,088	0,06	0,1	+
$\alpha$	3,677	0,065		+
$A_1$	3,498	0,074		+
AUKŠTESNĖJE TEMPERATŪROJE				
Legiruotieji plienai				
$s_T$	1,672	0,228	0,1	-
$\alpha$	4,788	0,065		+
$A_1$	2,429	0,154		-
Legiruotųjų plienų suvirinimo siūlių medžiagos				
$s_T$	3,886	0,074	0,1	+
$\alpha$	20,573	0,001		+
$A_1$	5,288	0,04		+
*regresija yra tiesinė, jei $p^a < p$ tuomet žymima “+” ženklų, jei „-“, ženklas, tuomet $p^a > p$ ir tiesinis ryšys yra nereikšmingas.				

Regresijos modelio adekvatumo tyrimas (3.13 lent.) patvirtina, kad tarp daugumos atsitiktinių, pasiskirsčiusių pagal normalųjį dėsnį kintamųjų egzistuoja reikšmingas tiesinis ryšys nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus.

3.14 lent. pateikiamos plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų aukštesnėje ir kambario temperatūroje deformavimo diagramos charakteristikų tiesinės analitinės priklausomybės koeficientai.



**3.14 lentelė.** Plienų ir jų suvirinimo medžiagų siūlių deformavimo parametrų  $\bar{s}_T$ ,  $\alpha$ ,  $A_1$  tiesinės priklausomybės koeficientai nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus kambario ir aukštesnėje temperatūroje.

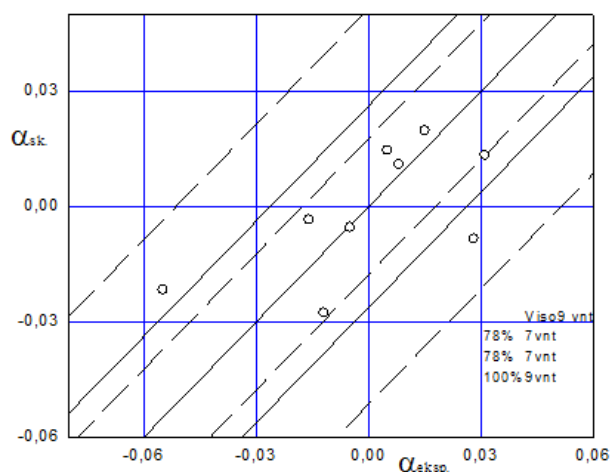
KAMBARIO TEMPERATŪROJE	AUKŠTESNĖJE TEMPERATŪROJE
Legiruotieji plienai	
$s_T = 1,340 + 0,266(\sigma_u / \sigma_y)Z$	$s_T = 1,478 + 0,216(\sigma_u / \sigma_y)Z$
$\alpha = 0,09 - 0,073(\sigma_u / \sigma_y)Z$	$\alpha = 0,180 - 0,166(\sigma_u / \sigma_y)Z$
$A_1 = 0,994 + 0,549(\sigma_u / \sigma_y)Z$	$A_1 = 0,574 + 0,862(\sigma_u / \sigma_y)Z$
Legiruotųjų plienų suvirinimo siūlių medžiagos	
$s_T = 0,431 + 1,348(\sigma_u / \sigma_y)Z$	$s_T = 1,274 + 0,393(\sigma_u / \sigma_y)Z$
$\alpha = -0,049 + 0,065(\sigma_u / \sigma_y)Z$	$\alpha = -0,163 + 0,158(\sigma_u / \sigma_y)Z$
$A_1 = 0,971 + 0,686(\sigma_u / \sigma_y)Z$	$A_1 = 2,915 - 1,434(\sigma_u / \sigma_y)Z$

Atlikus minėtus statistinius tikrinimus, 3.14 lent. pateikiamos plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų, aukštesnėje ir kambario temperatūroje, deformavimo diagramos charakteristikų tiesinės analitinės priklausomybės koeficientai.

### 3.4 Eksperimentinių ir skaičiuotų duomenų palyginimas

Eksperimentinių ir skaičiuotų duomenų pasiskirsčiusių pagal normalųjį dėsnį palyginimas nustatomas: su tikimybe  $P \approx 0,50$  intervalo ribose  $\bar{x} \pm 0,675 \cdot s$ , kurio nukrypimo tikimybė labai maža; intervale  $\bar{x} \pm s$  su tikimybe  $P \approx 0,68$ ; intervale  $\bar{x} \pm 1,96 \cdot s$  su tikimybe  $P \approx 0,95$ . Čia  $\bar{x}$  - deformavimo charakteristikų vidurkis;  $s$  – standartinis nuokrypis [11].

Remiantis 3.14 lent. pateiktomis analitinėmis priklausomybėmis ir eksperimentiniais duomenimis, atliktas eksperimentinių  $\alpha_{eks}$  ir skaičiuotų  $\alpha_{sk}$  parametrų palyginimas legiruotųjų plienų grupei nustatytame būdingame intervale aukštesnėje temperatūroje (3.2 pav.). Likusiųjų legiruotųjų plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų deformavimo diagramos parametrų aukštesnėje ir kambario temperatūroje nustatytame būdingame intervale gauti rezultatai pateikiami 3.15 lentelėje.



**3.2 pav.** Eksperimentinių  $\alpha_{eks}$  ir skaičiuotų  $\alpha_{sk}$  parametų palyginimas legiruotųjų plienų grupei nustatyta būdingame intervale aukštesnėje temperatūroje

**3.15 lentelė.** Legiruotųjų plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų eksperimentinių ir skaičiuotų deformavimo diagramos parametų palyginimas kambario ir aukštesnėje temperatūrose

Def. paramterai	Nustatytaime intervale				Bendros grupės			
	Bandinių bendras kiekis	$\pm 0,675 \cdot s$	$\pm s$	$\pm 1,96 \cdot s$	Bandinių bendras kiekis	$\pm 0,675 \cdot s$	$\pm s$	$\pm 1,96 \cdot s$
		vnt. / %	vnt. / %	vnt. / %		vnt. / %	vnt. / %	vnt. / %
Legiruotieji konstrukciniai plienai kambario temperatūroje								
$s_T$	19	12 / 63	16 / 84	19 / 100	38	22 / 58	28 / 74	37 / 97
$\alpha$	19	11 / 58	14 / 74	19 / 100	36	20 / 61	25 / 69	36 / 100
$A_1$	19	8 / 42	15 / 79	19 / 100	33	17 / 52	22 / 67	33 / 100
Legiruotieji konstrukciniai plienai aukštesnėje temperatūroje								
$s_T$	11	6 / 55	8 / 73	11 / 100	24	11 / 46	19 / 79	24 / 100
$\alpha$	9	7 / 78	7 / 78	9 / 100	23	10 / 43	18 / 78	22 / 96
$A_1$	11	5 / 46	7 / 64	11 / 100	23	10 / 43	17 / 74	23 / 100
Legiruotųjų konstrukcinių plienų suvirinimo siūlių medžiagos kambario temperatūroje								
$s_T$	28	16 / 57	21 / 75	28 / 100	69	37 / 54	51 / 74	66 / 96
$\alpha$	30	13 / 43	21 / 70	29 / 96	69	26 / 38	48 / 70	66 / 96
$A_1$	26	12 / 46	19 / 73	25 / 96	69	34 / 49	47 / 68	66 / 96
Legiruotųjų konstrukcinių plienų suvirinimo siūlių medžiagos aukštesnėje temperatūroje								
$s_T$	13	6 / 46	9 / 69	13 / 100	35	18 / 51	23 / 66	35 / 100
$\alpha$	13	9 / 69	12 / 92	13 / 100	33	16 / 48	24 / 73	33 / 100
$A_1$	14	7 / 50	10 / 71	14 / 100	33	15 / 45	24 / 73	33 / 100

Iš 3.15 lentelės matoma, kad eksperimentinių ir skaičiuotų parametrų nustatytame intervale rezultatų sklaida intervale  $\bar{x} \pm 1,96 \cdot s$  lyginant su bendrų plienų grupėmis yra panaši. Siauresniame intervale  $\bar{x} \pm s$  daugumai parametrų rezultatų sklaida yra mažesnė arba lygi nustatytame būdingame intervale (išskyrus  $s_T, A_1$  - plienams aukštesnėje temp.;  $A_1$  - plienų siūlėms aukštesnėje temp.). Intervalo ribose  $\bar{x} \pm 0,675 \cdot s$  daugumai deformavimo diagramos parametrų rezultatų sklaida taip pat yra mažesnė nustatytame būdingame intervale lyginant su bendromis plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų grupėmis. Galima teigti, kad rezultatų sklaida siauresniuose intervaluose daugumai parametrų yra mažesnė nustatytame būdingame intervale lyginant su bendromis plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų grupėmis. Tuomet nustatant deformavimo diagramos charakteristikų reikšmes nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus nustatytame būdingame intervale gaunami tikslesni rezultatai.

Apibendrinant šiame skyriuje gautus rezultatus, galima teigti, kad legiruotųjų plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų deformavimo charakteristikų  $\bar{s}_T, \alpha, A_1$  kambario ir aukštesnėje temperatūroje, nustatytame būdingame intervale, duomenys yra stochastiškai nepriklausomi, atsitiktiniai bei pasiskirstę pagal normalųjį skirstinį. Atlikta koreliacinė – regresinė analizė parodė, kad tarp daugumos medžiagų grupių deformavimo diagramos charakteristikų ir modifikuoto plastiškumo kriterijaus egzistuoja reikšmingas tiesinis koreliacinis ryšys, kurį patvirtina atliktas adekvatumo tyrimas. Taip pat atlikta lyginamoji analizė, lyginant bendrų plienų, jų siūlių medžiagų grupes su plienų, jų siūlių medžiagų grupėmis nustatytame būdingame intervale. Analizė parodė, kad gaunamas stipresnis koreliacinis ryšys tarp plienų ir jų siūlių medžiagų grupių nustatytame būdingame intervale. Todėl galima teigti, kad atsitiktinių, pasiskirsčiusių pagal normalųjį dėsnį atskirų plienų grupių analizavimas nustatytame būdingame intervale duoda geresnius rezultatus. Atlikus minėtus statistinius tikrinimus, pateikiamos plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų, aukštesnėje ir kambario temperatūroje, deformavimo diagramos charakteristikų tiesinės analitinės priklausomybės koeficientai.

## IŠVADOS

Nustatytas legiruotųjų plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų deformavimo diagramos charakteristikoms  $A_1$ ,  $\alpha$ ,  $s_T$  būdingas intervalas, kambario ir aukštesnėje temperatūroje, kuris priklauso nuo mechaninių charakteristikų. Gautos intervalo ribos: plienams (20 °C) - 0,854 - 1,254; plienams (200 °C -550 °C) - 0,958 – 1,275; plienų siūlių suvirinimo medžiagos (20 °C) - 0,875 - 1,095; plienų siūlių suvirinimo medžiagos (200 °C -550 °C) - 0,965 – 1,243.

Legiruotųjų plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų deformavimo charakteristikų  $\bar{s}_T$ ,  $\alpha$ ,  $A_1$  kambario ir aukštesnėje temperatūroje, nustatytame būdingame intervale, duomenys yra stochastiškai nepriklausomi, atsitiktiniai bei pasiskirstę pagal normalųjį skirstinį.

Atlikta koreliacinė – regresinė analizė, kuri parodė, kad tarp daugumos medžiagų grupių deformavimo diagramos charakteristikų ir modifikuoto plastiškumo kriterijaus egzistuoja reikšmingas tiesinis koreliacinis ryšys, kurį patvirtina atliktas adekvatumo tyrimas panaudojant Fišerio kriterijų.

Atlikta lyginamoji analizė, lyginant bendrų plienų, jų siūlių medžiagų grupes su plienų, jų siūlių medžiagų grupėmis nustatytame būdingame intervale. Analizė parodė, kad gaunami koreliacijos koeficientai yra vidutiniškai 11% didesni nustatytame būdingame intervale, nei bendrų plienų grupėse gauti koreliacijos koeficientai. Todėl galima teigti, kad atsitiktinių, pasiskirsčiusių pagal normalųjį dėsnį plienų grupių analizavimas nustatytame būdingame intervale duoda geresnius rezultatus, kadangi nustatytame intervale gaunamas deformavimo charakteristikų ir modifikuoto plastiškumo kriterijaus stipresnis tarpusavio tiesinis ryšys kambario ir aukštesnėse temperatūrose.

Atlikus minėtus statistinius tikrinimus, pateikiamos plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų, aukštesnėje ir kambario temperatūroje, deformavimo diagramos charakteristikų tiesinės analitinės priklausomybės koeficientai.

Nustatant deformavimo diagramos charakteristikų  $A_1$ ,  $\alpha$ ,  $s_T$  reikšmes nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus  $(\sigma_u/\sigma_y)Z$  nustatytame būdingame intervale gaunami tikslesni rezultatai, nes daugumai skaičiuotų ir eksperimentinių charakteristikų rezultatų sklaida intervaluose  $\bar{x} \pm s$  ir  $\bar{x} \pm 0,675 \cdot s$  yra nuo 1% iki 35% mažesnė lyginant su bendrų plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų grupių rezultatų sklaida kambario ir aukštesnėje temperatūrose. Tuomet pasiūlytos analitinės priklausomybės rekomenduojamos ciklinėms deformavimo diagramos charakteristikoms bei ilgalaikiškumui apskaičiuoti.

## LITERATŪRA

1. Scritube Group (2013). *Plieno cheminė sudėtis* [interaktyvus] [žiūrėta 2013-05-11]. Prieiga per internetą: < <http://www.scritube.com/limba/lituaniana/Plieno-chemin-sudtis45957.php>>.
2. ŠNIUOLIS, R. *Konstruktinių medžiagų mažaciklio nuovargio charakteristikų priklausomybė nuo mechaninių savybių*: daktaro disertacijos santrauka. Kaunas, 1999. 31 p.
3. DAUNYS, M., ŠNIUOLIS, R. *Relationships Between Mechanical and Cyclic Characteristics of Structural Materials*. Material Issue in Design, Manufacturing and Operation of Nuclear Power Plants Equipment: Proceedings. – St.Petersburg: Prometey, 1998, vol.1, 284–294 p.
4. ŠNIUOLIS, R., DAUNYS, M. *Determination of low cycle loading curves parameters for structural materials by mechanical characteristics*. Mechanika. Kaunas: Technologija. ISSN 1392-1207. 1999, Nr.2(16), 16–23 p.
5. ŠNIUOLIS, R.; DAUNYS, M. *Parameters of flow cycle fatigue curves according to elastic and plastic strain*. Mechanika – 2003: tarptautinės konferencijos pranešimų medžiaga, [Kauno technologijos universitetas, Lietuva, 2003 m. balandžio 3-4d.]. Kaunas, 2003, Technologija, 46–51 p.
6. DAUNYS, M.; ŠNIUOLIS, R. *Statistical evaluation of low cycle loading curves parameters for structural materials by mechanical characteristics*. Nuclear Engineering and Design, 2006, vol. 236, no. 13, 1352–1361 p.
7. ŠNIUOLIS, R.; DAUNYS, M. *Determination of Low Cycle Straining Lifetime for Structural Materials by Mechanical Characteristics*. Mechanika. Kaunas: Technologija, 1999, no. 3 (18), 5–10 p.
8. СТЕПНОВ, М. Н. *Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник*. - Москва: Машиностроение, 1985.-232 с.
9. Empirinių duomenų ir informacijos HSM tyrimams kaupimas ir valdymas (2008). *Statistinė kiekybinių duomenų analizė su SPSS ir STATA*. [interaktyvus] [žiūrėta 2013-04-12]. Prieiga per internetą: < [http://www.lidata.eu/files/mokymai/stat/Statistika\\_galutine\\_redakcija.pdf](http://www.lidata.eu/files/mokymai/stat/Statistika_galutine_redakcija.pdf)>.
10. JANILIONIS, V. *Statistinė kiekybinių duomenų analizė su SPSS ir STATA*. . [interaktyvus] 2013 [žiūrėta 2013-05-21]. Prieiga per internetą: < [http://www.lidata.eu/index.php?file=files/mokymai/stat/stat.html&course\\_file=stat\\_II\\_1.3.2.html](http://www.lidata.eu/index.php?file=files/mokymai/stat/stat.html&course_file=stat_II_1.3.2.html)>.

11. ЗАКС Л. *Статистическое оценивание*. Пер. с нем. / Под. ред. Ю. П. Адлера, В.Г. Горского. - Москва: Статистика, 1976.-598с.
12. RUPŠYS, P.; OLSSON, U.; ENGSTRAND U. *Statistiniai metodai*. Lietuvos žemės ūkio universitetas. Akademija, 2007 m.
13. JAVTOKA, A. *Faktorinė analizė*. [interaktyvus] 2009 [žiūrėta 2013-05-02]. Prieiga per internetą: < <http://nathalija.wordpress.com/tag/statistika-pas-algirdas-javtokas/page/2/>>.
14. Kauno technologijos universiteto biblioteka. [interaktyvus]. [Kaunas]: KTU [žiūrėta 2013-03-11]. Prieiga per internetą: <<http://stud.ppf.ktu.lt/vaiciulis/paskaitos/mp/mp-02.pdf>>.
15. STULPINAITĖ, A. *Statinių mechaninių ir mažaciklio nuovargio charakteristikų tarpusavio ryšio tyrimas: daktaro disertacijos santrauka*. Kauno technologijos universitetas. Kaunas, 2009.
16. ДАУНИС, М. *Прочность и долговечность при малоцикловом нестационарном нагружении: монография*. – Вильнюс: Мокслас, 1989. 256 с. ISBN 5-420-00278-7.
17. СЕРЕНСЕНА, С.В. *Прочность при малом числе циклов нагружения*. Москва: Наука, 1969. 258 с.
18. DAUNYS, M. *Ciklinis konstrukcijų stiprumas ir ilgaamžiškumas*. Technologija. Kaunas, 2005.
19. MTS. *MTS 810 & 858 Material testing system*. [interaktyvus] 2006 [žiūrėta 2013-04-05]. Prieiga per internetą: < [http://www.upc.edu/pct/documents\\_equipament/d\\_77\\_id-412.pdf](http://www.upc.edu/pct/documents_equipament/d_77_id-412.pdf)>.
20. WETZEL, R. M; COFFIN, L. F. *Manual on low cycle fatigue testing*. [interaktyvus] 1969 [žiūrėta 2013-02-26]. Prieiga per internetą: < [http://books.google.lt/books?id=tjVHpEELitAC&printsec=frontcover&dq=low+cycle&hl=lt&sa=X&ei=s9B2UfH8KM\\_EtAa4uoGAAQ&redir\\_esc=y#v=onepage&q=low%20cycle&f=false](http://books.google.lt/books?id=tjVHpEELitAC&printsec=frontcover&dq=low+cycle&hl=lt&sa=X&ei=s9B2UfH8KM_EtAa4uoGAAQ&redir_esc=y#v=onepage&q=low%20cycle&f=false)>.
21. BAKŠTYS, A. *Skaičiavimo statistika*. Mokomoji knyga. Šiauliai, 2007.
22. MARTINĖNAS, B. *Eksperimento duomenų statistinė analizė*. Mokomoji knyga. [interaktyvus] 2004 [žiūrėta 2013-01-15]. Prieiga per internetą: < <http://www.ebiblioteka.lt/resursai/Mokslai/VGTU/Leidiniai/Leidiniai/14.pdf>>.
23. JANILIONIS, V. *Statistinė kiekybinių duomenų analizė su SPSS ir STATA*. [interaktyvus] 2013 [žiūrėta 2013-05-22]. Prieiga per internetą: < [http://www.lidata.eu/index.php?file=files/mokymai/stat/stat.html&course\\_file=stat\\_II\\_3.8.1.html](http://www.lidata.eu/index.php?file=files/mokymai/stat/stat.html&course_file=stat_II_3.8.1.html) >.

24. BOGUSLAUSKAS, V. *Ekonometrija*. Vadovėlių leidybos komisijos rekomenduotas vadovėlis aukštųjų mokyklų studentams. Kaunas: Technologija. 1999.
25. JANILIONIS, V. *Koreliacinės ir regresinės analizės pagrindai*. [interaktyvus] 2013 [žiūrėta 2013-04-12]. Prieiga per internetą: <[http://www.lidata.eu/index.php?file=files/mokymai/Janilionis\\_III/jan\\_III.html&course\\_file=jan\\_III\\_1.html](http://www.lidata.eu/index.php?file=files/mokymai/Janilionis_III/jan_III.html&course_file=jan_III_1.html)>.
26. JANILIONIS, V. *Daugialypės regresinės analizės taikymas socialiniuose tyrimuose*. [interaktyvus] 2013 [žiūrėta 2013-03-26]. Prieiga per internetą: <[http://www.lidata.eu/index.php?file=files/mokymai/Janilionis\\_IV/jan\\_IV.html&course\\_file=jan\\_IV\\_1.html](http://www.lidata.eu/index.php?file=files/mokymai/Janilionis_IV/jan_IV.html&course_file=jan_IV_1.html)>.
27. SABALIAUSKAS, Artūras; MINGAILIENĖ, Aušra; ČIKOTIENĖ, Dalia. *Magistro baigiamojo darbo rengimo metodiniai nurodymai*. Šiauliai, 2010.

## **PRIEDAI**



## 1 priedas

Legiruotųjų konstrukcinių plienų terminis apdirbimas, mechaninės, deformavimo diagramos charakteristikos kambario temp.									
Eil. Nr.	Legiruotasis konstrukcinis plienas	T, °C	Term.apdirb.	Mechaninės charakteristikos			Deformavimo diagramos charakteristikos		
				$\sigma_U$	$\sigma_Y$	$\varphi$	$s_T$	$\alpha$	$A_1$
1	22K	20	G-Atl	557	321	69,2	1,680*	5E-4*	1,780*
2	22K	20	N	541	316	69,1	1,680*	0,007*	1,540*
3	48TC	20	G-Atl	841	616	70,6	1,590*	0,023*	1,610*
4	22KЭ	20	N	505	251	62,1	1,750*	-0,018*	1,800*
5	22KIII (2)	20	N	599	309	-	1,430	-0,004	1,620
6	22KIII (3)	20	N	628	263	66,5	1,780	-0,007	1,820
7	20III (Д,П)	20	N	375	313	70,9	1,530	1E-3	1,830
8	19MN5	20	-	515	264	-	-	-	-
9	10XH1M	20	G-Atl	569	472	77	1,49	0,009*	1,59*
10	8K	20	N	753	476	75	1,62*	-0,012*	1,67*
11	BK-4	20	N	694	499	63,8	1,63*	-0,008	1,61*
12	20X2H4MBΦ(02)	20	G-Atl	-	627	66,5	1,59	0,026	1,3
13	2T (BK-2III)	20	Atkh-N-GAtl	1079	655	32	1,62	0,026	1,58
14	4Д, 4Т (BK-4III)	20	-	785	547	-	1,76	0,007	1,62
15	BK-2M (IE)	20	G-2Atl	781	513	68,4	1,64*	0,047	1,06
16	PO (BK-4)	20	G-Atl	750	480	43,3	1,72	0,007	1,56
17	BK-2III (ЛВ)	20	Atkh-N-G-Atl	1050	520	62,8	1,75	0,009	1,34
18	BK-2III (ЛП)	20	Atkh-N-G-Atl	750	520	-	1,42	0,013	1,51
19	10ГН2МФА (ГЭ)	20	N-G-Atl	600	463	78,5	1,52*	-0,004*	1,74*
20	Φ(12X1MΦ)	20	-	489	273	76,5	1,66	-0,004	1,8
21	15X2MΦ	20	Atk	594	230	63	1,81	-0,035	0,92
22	15X2MΦ	20	N	722	414	73,8	1,66	0,003	1,41

Atkh – homogeninis atkaitinimas; N- normalizavimas; G- grūdinimas; Atl- aukštas atleidimas  
 \* - duomenys naudojami nustatyto intervalo ribose 0,854 - 1,254.

## 1 priedo tęsinys

Legiruotųjų konstrukcinių plienų terminis apdirbimas, mechaninės, deformavimo diagramos charakteristikos kambario temperatūroje									
Eil. Nr.	Legiruotasis konstrukcinis plienas	T, °C	Term.apdirb	Mechaninės charakteristikos			Deformavimo diagramos charakteristikos		
				$\sigma_U$	$\sigma_Y$	$\varphi$	$s_T$	$\alpha$	$A_1$
23	15X2MΦ	20	G-Atl	841	617	70	1,59*	0,011*	1,63*
24	12X3H1MΦC	20	G-Atl	844	584	59,2	1,67	0,028*	1,41*
25	12X3H1MΦЭ	20	N-G-Atl	814	587	63,4	1,63*	0,028*	1,43*
26	12X3H1MΦП	20	G-Atl	827	542	60,2	1,68	0,023*	1,47*
27	TC I (15XMΦA)	20	G-Atl	598	503	71,5	1,52*	0,018*	1,54*
28	TC II (15XMΦA)	20	G-Atl	652	427	73,5	1,62*	0,015*	1,53*
29	1X (BK-2)	20	G-Atl	-	447	67,6	1,51	0,015	1,59
30	4X (BK-2)	20	G-Atl	-	477	67,6	1,48	0,03	1,4
31	15X2MΦAA (TCK)	20	G-2Atl	650	510	72	1,55*	0,04*	1,27*
32	BK-2M (Г)	20	G-2Atl	835	570	60	1,62*	0,092	0,92
33	BK-2M (E)	20	G-Atl	900	775	64,4	1,56	0,028	1,2
34	15X2MΦAA	20	G-2Atl	722	365	75,2	1,7	0,008	1,62
35	15X2HMΦAA (ПТ)	20	G-Atl	765	570	65	1,6*	0,021*	1,34*
36	15X3HMΦAA (BK)	20	G-3Atl	680	520	61	1,63	0,02	1,46
37	BK-2AA	20	-	720	500	43,9	1,71	0,038	1,45
38	15X2HMΦAA (01-9)	20	G-Atl	790	570	59	1,66	0,041	1,17
39	BY (13-42)	20	G-3Atl	675	372	75,5	1,67	0,023	1,48
40	BY (55-68)	20	G-2Atl	645	394	75,5	1,63*	0,017*	1,48
41	PB	20	N-G-Atl	655	387	70,1	1,67*	0,015*	1,45*
42	ПП	20	N-G-Atl	655	499	70,1	1,57*	0,044*	1,61*
43	TM	20	-	750	430	75	1,66	0,007	1,75
44	BY (1-6)	20	G-3Atl	605	457	75,5	1,54*	0,022*	1,34*

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

\* - duomenys naudojami nustatyto intervalo ribose 0,854 - 1,254.

## 2 priedas

Legiruotųjų konstrukcinių plienų terminis apdirbimas, mechaninės, deformavimo diagramos charakteristikos aukštesnėje temp.									
Eil. Nr.	Legiruotasis konstrukcinis plienas	T, °C	Term.apdirb	Mechaninės charakteristikos			Deformavimo diagramos charakteristikos		
				$\sigma_U$	$\sigma_Y$	$\varphi$	$s_T$	$\alpha$	$A_1$
1	22K	350	G-Atl	474	230	73,7	1,68	-0,013	1,48
2	22KIII (3) 22K	350	N	463	130	-	1,76	-0,073	1,36
3	20III plieno 30	350	N	382	86	-	1,75	-0,028	1,38
4	22K-ВД (ШИ) 22K	350	N	477	149	-	1,68	-0,058	1,66
5	25JC	350	N	448	140	-	1,75	-0,024	1,13
6	Л (25Л)	350	N	545	180	40,1	1,70*	-0,055*	1,44*
7	19MN5 (K)	275	-	548	245	57	1,70	-0,002*	1,6*
8	19MN5 (K)	285	-	559	255	57	1,78*	-0,012*	1,9*
9	19MN5 (K)	350	-	480	277	64,4	1,60	-0,005*	1,67*
10	БК-1А В	350	N	598	188	66,3	1,68	-0,008	1,13
11	Г (10Г2НМФА)	350	-	665	381	-	1,80	-0,032	1,45
12	10ХН1М (А)	200	G-Atl	595	335	54,3	1,70*	0,015*	1,34*
13	20Х2Н4МВФ	300	G-Atl	825	543	61,5	1,64	0,026	1,53
14	БК-2III (9)	350	Atkh-N-G-Atl	576	360	-	1,65	0,038	1,24
15	БК-2III (H)	200	2Atkh-2N-Atl	637	459	68,9	1,64*	0,008	1,75
16	БК-2III (П) БК 2III	350	Atkh-N-G-Atl	697	348	54,8	1,75*	0,095	1,28*
17	БК-2III (Л)	350	Atkh-N-G-Atl	600	397	59,4	1,80	0,044	1,57
18	БК-2III (H)	350	G-3Atl	550	236	68	1,79	0,024	1,8
19	10ГН2МФА (ГЭ)	350	-	550	403	74,5	1,68*	0,008*	1,52*
20	15Х2МФ	350	G-Atl	574	387	72,2	1,73*	0,047*	1,65*
21	БК-2М	350	G-Atl	672	447	66,7	1,75*	0,031*	1,48*
22	БК-2М (ПВ)	350	G-3Atl	687	490	-	1,66	0,022	1,65

Atkh – homogeninis atkaitinimas; N- normalizavimas; G- grūdinimas; Atl- aukštas atleidimas  
 \* - duomenys naudojami nustatyto intervalo ribose 0,958 – 1,275.

## 2 priedo tęsinys

Legiruotųjų konstrukcinių plienų terminis apdirbimas, mechaninės, deformavimo diagramos charakteristikos aukštesnėje temperatūroje									
Eil. Nr.	Legiruotasis konstrukcinis plienas	T, °C	Term.apdirb	Mechaninės charakteristikos			Deformavimo diagramos charakteristikos		
				$\sigma_U$	$\sigma_Y$	$\varphi$	$s_T$	$\alpha$	$A_1$
23	15X2MΦAA (TCII)	350	G-2Atl	412	223	72,2	1,85	0,012	1,78
24	BK-2M (3E) BK-2M	350	G-2Atl-S	680	240	68,2	1,74	0,002	1,63
25	BK-2M (Д) BK-2M	350	N-G-2Atl	502	480	59,2	1,62	0,024	1,47
26	BK-2M (E) BK-2M	350	G-Atl	875	501	63,2	1,75*	- 0,016*	1,14*
27	BK-2M (Г) BK-2M	350	G-2Atl	603	254	69,2	1,72	0,023	0,59
28	BK-2M (O) BK-2M	350	G-3Atl	619	367	59	1,62*	0,005*	1,46*
29	BK-2M (ГО) BK-2M	350	G-2Atl	660	390	67	1,64*	0,028*	1,55*
30	15X2HMΦAA	350	G-Atl	580	440	69,2	1,73	0,040	1,32
31	15X3HMΦAA	350	G-3Atl	550	275	58	1,75*	0,062*	1,39*
32	15X2MΦAABY (7-12)	350	G-3Atl	530	480	75,5	1,75	0,043	1,21

Atkh – homogeninis atkaitinimas; N- normalizavimas; G- grūdinimas; Atl- aukštas atleidimas  
 \* - duomenys naudojami nustatyto intervalo ribose 0,958 – 1,275.

### 3 priedas

Legiruotųjų konstrukcinių plienų suvirinimo siūlių medžiagų terminis apdirbimas, mechaninės, deformavimo diagramos charakteristikos kamb. temp.									
Eil. Nr.	Legiruotasis konstrukcinis plienas	T, °C	Term.apdirb	Mechaninės charakteristikos			Deformavimo diagramos charakteristikos		
				$\sigma_U$	$\sigma_Y$	$\varphi$	$s_T$	$\alpha$	$A_1$
1	22III	20	-	537	421	71,35	1,55*	0,025	1,58*
2	22ПIII	20	-	519	424	76,2	1,62*	0,019*	1,66*
3	22III3	20	G-Atl	445	362	76	1,55*	0,004*	1,71*
4	5III	20	-	594	511	71,1	1,58	0,035	1,47
5	22AГ*	20	-	628	443	55,8	1,55	-0,003	1,42
6	22AГ*	20	Atk	497	393	66,9	1,67	-0,004	1,51
7	5III3T*	20	G-8Atl	439	341	80	1,67*	0,01*	1,73*
8	22IIIТ	20	G-Atl	439	397	71	1,6*	0,019	1,69
9	4III2T*	20	5Atk	417	329	78	1,74*	0,011*	1,69*
10	4III4T*	20	10Atk	400	347	76	1,61*	0,01*	1,72
11	5III1T*	20	Atk	590	319	76	1,86	-0,002	1,78
12	5III4T*	20	10Atk	540	353	79,7	1,53	0,009	1,77
13	A**	20	G-Atl	535	338	69,3	1,48	0,003	1,71
14	AT**	20	-	657	293	62,6	1,76	0,006	1,66
15	IIIA	20	-	508	340	64,5	2,14	1E-3*	1,73*
16	4III3T*	20	G-8Atl	466	319	76	1,61	0,015	1,49
17	IIIТ*	20	Atk	459	359	73	1,7*	0,007*	1,74*
18	II	20	Atk	629	458	-	2,05	0,002	1,86
19	E-B121	20	-	456	392	66,6	1,79	0,04	1,68
20	E-B121	20	Atk	430	291	75,2	1,87	1E-3	1,84
21	AЭ	20	G-Atl	603	437	72	1,87*	0,022*	1,58*
22	AO	20	G-Atl	577	466	66,1	1,6	0,029	1,46
23	AIII	20	G-Atl	604	423	68	2,22	0,027*	1,65*
24	AY	20	Atk	620	547	72,2	1,72	0,016	1,65

Atkh – homogeninis atkaitinimas; N- normalizavimas; G- grūdinimas; Atl- aukštas atleidimas  
 \* - duomenys naudojami nustatyto intervalo ribose 0,875 – 1,095.

### 3 priedo tęsinys

Legiruotųjų konstrukcinių plienų suvirinimo siūlių medžiagų terminis apdirbimas, mechaninės, deformavimo diagramos charakteristikos kambario temperatūroje										
Eil. Nr.	Legiruotasis konstrukcinis plienas	T, °C	Term.apdirb	Mechaninės charakteristikos			Deformavimo diagramos charakteristikos			
				$\sigma_U$	$\sigma_Y$	$\varphi$	$s_T$	$\alpha$	$A_1$	
25	BP	20	-	625	440	52,4	1,83	0,036	1,39	
26	23	20	G-2Atl	685	593	71,4	1,38	0,026	1,69	
27	X	20	G-Atl	543	427	62	1,59	0,017	1,58	
28	1T, 2T, 3T	20	N	659	425	70	1,82*	0,012*	1,57	
29	A	20	-	681	421	63,1	1,84*	0,019*	1,59*	
30	A1	20	Atk	626	389	69,1	1,52	0,002	1,38	
31	Э1-Э1	20	N	592	435	69,5	1,64*	0,002*	1,54*	
32	ПТ	20	-	616	491	69,7	1,57	0,012	1,57	
33	BT	20	G-Atl	598	346	66	1,88	0,024	1,48	
34	P	20	-	682	455	74	1,97	0,042	1,39	
35	ИБ1	20	-	-	549	65,9	1,85	0,021	1,73	
36	P	20	G-Atl	825	587	-	2,05	0,024	2,07	
37	H (BK-2III)	20	G-4Atl	770	530	73,5	1,46	0,028*	1,49	
38	Л1Т	20	Atk	698	490	49,2	1,64	0,012	1,50	
39	PH	20	G-Atl	675	400	70,8	1,76	-0,001	1,65	
40	РЛ	20	G-Atl	695	375	69,9	2,11	-0,002	1,78	
41	H3	20	G-Atl	590	460	71	2,02	0,031	1,54*	
42	X1	20	2Atk	560	410	77	2,05*	0,002*	1,73*	
43	X3	20	2Atk	460	445	55,6	1,78	0,008	1,46	
44	1Г (33-50)	20	G-2Atl	650	454	65,5	1,41*	0,003*	1,60*	
45	1Г (51-64)	20	G-2Atl	650	447	65,5	1,78*	0,008*	1,42*	
46	C	20	-	560	393	67	1,83*	0,028*	1,35	
47	H1	20	2Atk	496	408	-	2,00	0,031	1,42	
48	TCA*	20	Atk	574	383	64,1	2,01*	-	0,003*	1,77*

Atkh – homogeninis atkaitinimas; N- normalizavimas; G- grūdinimas; Atl- aukštas atleidimas  
 \* - duomenys naudojami nustatyto intervalo ribose 0,875 – 1,095.

### 3 priedo tęsinys

Legiruotųjų konstrukcinių plienų suvirinimo siūlių medžiagų terminis apdirbimas, mechaninės, deformavimo diagramos charakteristikos kambario temperatūroje									
Eil. Nr.	Legiruotasis konstrukcinis plienas	T, °C	Term.apdirb	Mechaninės charakteristikos			Deformavimo diagramos charakteristikos		
				$\sigma_U$	$\sigma_Y$	$\varphi$	$s_T$	$\alpha$	$A_1$
49	H10	20	G-Atl	635	491	72	1,69*	0,020*	1,66*
50	H3	20	Atk	622	491	68,4	1,67	0,007	1,74
51	TCЭ	20	G-Atl	675	563	69,5	1,83	0,026	1,63
52	TCIII	20	G-Atl	673	455	68	1,77*	0,02*	1,63*
53	TЭH	20	N-G-Atl	628	531	67,7	1,74	0,03	1,50
54	ЭП*	20	Atk	497	363	66,7	1,84*	-7E-4*	1,73*
55	TCT**	20	G-Atl	674	491	66,8	1,93*	0,018*	1,63*
56	ЭТ**	20	G-Atl	710	405	69	2,25	0,03	1,66
57	ЭП	20	-	538	385	74	1,61*	0,029*	1,68*
58	H	20	Atk	770	391	53,6	1,93*	0,002*	1,57*
59	III	20	-	618	423	67,5	1,72*	0,026*	1,55*
60	AB	20	G-2Atl	577	420	69,1	1,60*	0,026*	1,50*
61	TT**	20	G-Atl	652	447	61	1,97	0,029	1,49*
62	ИТ**	20	G-Atl	679	459	-	2,02	0,026	1,83
63	BЭ	20	G-3Atl	783	584	40,6	1,69	0,026	1,54
64	B8	20	-	849	426	-	1,86	0,011	1,72
65	1	20	Atk	678	439	68,8	2,02*	0,005*	1,52
66	2	20	Atk	685	413	67,1	2,20	0,013	1,64
67	51	20	G-Atl	-	557	15	1,97	0,012	1,66
68	1КП	20	G-Atl	746	476	74	1,66	0,023	1,43
69	15X3HMΦAA**	20	Atk	725	435	59,6	1,60*	-0,021	1,12
70	CIII	20	G-2Atl	680	465	75	1,96*	0,028*	1,59
71	IIIП (16-30)	20	3G-2Atl	765	500	70,7	1,41	0,045*	1,85*
72	IIIП (1-8)	20	G-2Atl	755	329	70,3	2,03	0,055	1,75

Atkh – homogeninis atkaitinimas; N- normalizavimas; G- grūdinimas; Atl- aukštas atleidimas  
\* - duomenys naudojami nustatyto intervalo ribose 0,875 – 1,095.

### 3 priedo tęsinys

Legiruotųjų konstrukcinių plienų suvirinimo siūlių medžiagų terminis apdirbimas, mechaninės, deformavimo diagramos charakteristikos aukštesnėje temperatūroje									
Eil. Nr.	Legiruotasis konstrukcinis plienas	T, °C	Term.apdirb	Mechaninės charakteristikos			Deformavimo diagramos charakteristikos		
				$\sigma_U$	$\sigma_Y$	$\varphi$	$s_T$	$\alpha$	$A_1$
73	1	20	Atk	735	500	65	-	-	-
74	41	20	Atk	665	370	65	1,85	0,042	1,31
75	C3	20	N-G-2Atl	670	461	75	1,83*	0,023*	1,59

Atkh – homogeninis atkaitinimas; N- normalizavimas; G- grūdinimas; Atl- aukštas atleidimas  
\* - duomenys naudojami nustatyto intervalo ribose 0,875 – 1,095.

### 4 priedas

Legiruotųjų konstrukcinių plienų suvirinimo siūlių medžiagų terminis apdirbimas, mechaninės, deformavimo diagramos charakteristikos aukš. temp.									
Eil. Nr.	Legiruotasis konstrukcinis plienas	T, °C	Term.apdirb	Mechaninės charakteristikos			Deformavimo diagramos charakteristikos		
				$\sigma_U$	$\sigma_Y$	$\varphi$	$s_T$	$\alpha$	$A_1$
1	22III	350	-	517	269	67,5	1,72	-0,005	1,63
2	22III	350	G-Atl	427	261	73,2	1,64	-0,009	1,69
3	ЭIII	350	N	427	192	65	1,77	-0,036	1,51
4	22AIII*	350	-	417	188	54,5	1,80*	-0,06	1,64
5	E-B121	200	Atk	506	314	-	1,75	-0,011	
6	E-B121	250	Atk	477	257	-	1,83	0,003	
7	E-B121	350	Atk	393	222	-	1,70	-0,038	
8	E	325	G-2Atl	371	185	-	1,65	-0,044	
9	Э	350	-	640	210	56,1	1,85	-0,02	1,52
10	K	200	Atk	510	254	72	1,71	0,004	1,43
11	IIT	300	-	593	380	-	1,75	-0,028	1,95
12	P	200	-	825	350	42,1	1,75	-0,013*	1,33*

Atkh – homogeninis atkaitinimas; N- normalizavimas; G- grūdinimas; Atl- aukštas atleidimas  
\* - duomenys naudojami nustatyto intervalo ribose 0,965 – 1,243.



#### 4 priedo tęsinys

Legiruotųjų konstrukcinių plienų suvirinimo siūlių medžiagų terminis apdirbimas, mechaninės, deformavimo diagramos charakteristikos aukš. Temperatūroje									
Eil. Nr.	Legiruotasis konstrukcinis plienas	T, °C	Term.apdirb	Mechaninės charakteristikos			Deformavimo diagramos charakteristikos		
				$\sigma_U$	$\sigma_Y$	$\varphi$	$s_T$	$\alpha$	$A_1$
13	T11	350	G-2Atl	534	379	70,5	1,60*	0,016	1,58*
14	ИВ1	200	-	594	343	60,4	1,72*	0,007*	1,40*
15	МН	200	Atk	590	374	64	1,68*	-0,003*	1,70*
16	A1	350	-	1000	363	34	1,67	-0,022	1,10
17	Л1Т	350	Atk	508	253	24,3	1,64	-0,034	1,35
18	H1	350	G-Atl	665	375	60	1,73*	-0,008*	1,29*
19	H3	350	G-Atl	590	376	71	1,64*	0,003*	1,12*
20	МГ	200	-	685	360	53,1	1,78	0,006*	1,45*
21	МН	200	-	750	425	39,4	1,70	-0,072	1,71
22	1Г	350	G-Atl	585	335	64,5	1,70*	0,018*	1,11*
23	ТСИИ*	350	G-Atl	643	432	58	1,69	0,016	1,42
24	1В-8В	350	G-Atl	661	461	63,8	1,64	0,016	1,73
25	1Р-7Р	350	G-2Atl	593	400	61,3	1,67	0,012	1,57
26	8	350	-	566	273	-	1,80	0,059	1,82
27	1	350	Atk	554	289	56,2	1,77*	0,018*	1,21*
28	2	350	Atk	552	268	52,6	1,80	0,0007*5	1,37*
29	ВМ	350	G-2Atl	511	390	63,9	1,61	0,009	1,64
30	К	350	G-2Atl	680	332	56	1,78*	0,024*	1,36*
31	1КП	350	G-Atl	569	320	67,1	1,70*	0,022*	1,36*
32	8МП	350	Atk	530	320	62,6	1,70*	0,004*	1,62*
33	СИИ	350	G-2Atl	500	230	70	1,74	0,042	1,23
34	ИП (17-25)	350	3G-2Atl	-	325	70,4	1,70	0,029	1,79
35	ИП (9-14)	350	G-2Atl	625	300	72,3	1,72	0,026	1,45
36	18	350	Atk	585	340	68,5	1,68*	0,028*	1,29*

Atkh – homogeninis atkaitinimas; N- normalizavimas; G- grūdinimas; Atl- aukštas atleidimas  
\* - duomenys naudojami nustatyto intervalo ribose 0,965 – 1,243.

#### 4 priedo tęsinys

Legiruotųjų konstrukcinių plienų suvirinimo siūlių medžiagų terminis apdirbimas, mechaninės, deformavimo diagramos charakteristikos aukš. Temperatūroje									
Eil. Nr.	Legiruotasis konstrukcinis plienas	T, °C	Term.apdirb	Mechaninės charakteristikos			Deformavimo diagramos charakteristikos		
				$\sigma_U$	$\sigma_Y$	$\varphi$	$s_T$	$\alpha$	$A_1$
37	30	350	Atk	600	397	66,5	1,65*	0,022	1,24
38	41	350	Atk	550	280	65	1,74	0,009	1,34
39	A54, A52, A53	350	Atk	785	570	61	1,65	0,023	1,48
40	C3	350	N-G-2Atl	570	287	70	1,72	0,018	1,16

Atkh – homogeninis atkaitinimas; N- normalizavimas; G- grūdinimas; Atl- aukštas atleidimas  
 \* - duomenys naudojami nustatyto intervalo ribose 0,965 – 1,243.