

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

Diana Kopūstienė

KOROZIJAI IR KARŠČIUI ATSPARAUS PLIENO STANDAUS
APKROVIMO CIKLINIŲ DEFORMAVIMO PARAMETRŲ
NUSTATYMAS

Magistro darbas

Vadovas

doc. R. Šniuolis

2005 06 13

ŠIAULIAI, 2005

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

lekt. Z. Ramonas

2005 06 14

KOROZIJAI IR KARŠČIUI ATSPARAUS PLIENO STANDAUS
APKROVIMO CIKLINIŲ DEFORMAVIMO PARAMETRŲ
NUSTATYMAS

Magistro darbas

Vadovas

doc. R. Šniuolis

2005 06 13

Recenzentas

KTU PI Mechanikos fakulteto

prof. habil. dr. A. Bražėnas

2005 06 14

Atliko

MM-3 gr. stud.

D. Kopūstienė

2005 06 07

ŠIAULIAI, 2005

SUMMARY

Kopūstienė D. Determination of low cycle straining parameters of stainless steel: Master thesis of mechanical engineer / research advisor associate professor dr. R. Šniuolis; Šiauliai University, Technological Faculty, Mechanical Engineering Department. – Šiauliai, 2005.-56p.

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

The low cycle loading curves parameters A , α and \bar{s}_T are used for the computation of elastic plastic strain curves. These parameters are obtained from the soft low cycle loading results in many cases. The other possible ways for the determination of parameters A , α and \bar{s}_T are shown in this work.

The most investigated materials had the initial instability in the interval $k < 10 - 20$. For more objective evaluation of stress strain curves parameters A , α and \bar{s}_T , all values of width of hysteresis loop up to $k = 10$ semicycle were rejected as insignificant in comparison with the rest lifetime in cycles range $N_f < 10^4$. The parameter α for the evaluation of hardening (softening) intensity was determined, when the values of semicycle $\bar{\delta}_1$ and $\bar{\delta}_k$ were determined from the dependences in coordinates $lg \bar{\delta}_k - lg k$. The stress proportionality limit \bar{s}_T was determined from low cycle stress strain curves, when linear approximation was used and $k = 1; 10; 1000; 2000$ and 4000. Approximate value of parameter \bar{s}_T was obtained from \bar{S}_k and $\bar{\varepsilon}$ interrelation, when the line crosses coordinate \bar{S}_k in the lowest position.

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

TURINYS

Įvadas.....	5
1. Atsparumo mažacikliam deformavimui tyrimo rezultatai.....	7
1.1. Pagrindinių mechaninių charakteristikų nustatymas	7
1.2. Ciklinių deformavimo kreivės parametrų nustatymas.....	7
2. Ciklinių deformavimo kreivės parametrų priklausomybė nuo mechaninių charakteristikų.....	20
2.1. Ryšys tarp deformavimo kreivės parametrų ir statinių charakteristikų.....	20
2.2. Atsparumo mažacikliam deformavimui tyrimo rezultatų statistinė analizė	22
2.2.1. Išsiskiriančių deformavimo kreivės parametrų atmetimas	22
2.2.2. Deformavimo kreivės parametrų ir modifikuoto plastiškumo atsitiktinumo ir nepriklausomumo statistinis tikrinimas	25
2.2.3. Tyrimo rezultatų pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį hipotezių tikrinimas.....	28
2.2.4. Deformavimo kreivės parametrų ir modifikuoto plastiškumo pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį tikrinimas	30
2.2.5. Tyrimo rezultatų koreliacinė analizė	34
2.2.6. Deformavimo kreivės parametrų ir modifikuoto plastiškumo tyrimo rezultatų regresinė analizė	37
2.2.7. Tiesinė regresinė analizė deformavimo kreivės parametrų ir modifikuoto plastiškumo atveju.....	39
3. Eksperimentinių ir skaičiavimo rezultatų palyginimas	49
Išvados.....	53
Literatūra	54
Priedai.....	56

IVADAS

Darbo aktualumas. Šiuolaikinės mašinos ir įrengimai dirba ciklinio apkrovimo sąlygomis. Pagerinti mašinų kokybės, padidinti jų patikimumo ir ilgaamžiškumo negalima detaliai neištyrus jų darbo sąlygų ir medžiagos savybių. Parenkant medžiagą konstrukcijoms, dirbančioms mažaciklio apkrovimo sąlygomis, visų pirma būtina žinoti, kokiam tipui (stiprėjanti, silpnėjanti ar cikliškai stabili) ji priklauso, kadangi deformacijos ir įtempimai eksploatacijos metu kinta priklausomai nuo medžiagos tipo. Ir tik žinant medžiagos ciklines savybes, galima pasakyti apie jos pritaikymo galimybę duotomis eksploatacijos sąlygomis.

Analitinę priklausomybę tarp įtempimų ir deformacijų bet kuriame pusciklyje k galima išreikšti apibendrinta ciklinio tampriai plastinio deformavimo diagrama. Konstrukcijų mažaciklio ilgaamžiškumo skaičiavimams ši diagrama apskaičiuojama naudojant ciklinio deformavimo diagramos parametrus A , α ir \bar{s}_T , aprašančius medžiagų ciklines savybes.

Kadangi nuo medžiagų mažaciklio nuovargio charakteristikų priklauso daugelio labai atsakingų konstrukcijų stiprumas ir ilgaamžiškumas, o šioms charakteristikoms nustatyti reikia atlikti sudėtingus ir brangius bandymus, magistro darbe mėginta surasti konstrukcinių medžiagų mažaciklio nuovargio charakteristikų (apibendrintos ciklinio deformavimo diagramos parametru) ir mechaninių savybių tarpusavio analitinius ryšius, panaudojus tik statinio bandymo rezultatus.

Tyrimo tikslas. Pagal mechanines charakteristikas apskaičiuoti (prognozuoti) konstrukcinių medžiagų mažaciklio nuovargio deformavimo charakteristikas.

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

- pagal standaus apkrovimo rezultatus nustatyti korozijai ir karščiui atsparių plienų ciklinio deformavimo diagramos parametrus A , α , \bar{s}_T kambario ir aukštesnėje temperatūroje;
- nustatyti ryšį tarp ciklinių deformavimo parametru ir mechaninių charakteristikų ir šias charakteristikų priklausomybes aproksimuojančią kreivę;
- patikrinti parinkto regresinio modelio adekvatumą;
- pasiūlyti analitines priklausomybes ciklinėms charakteristikoms nustatyti pagal mechanines savybes.

Tyrimo metodai. Magistrinio darbo tyrimai paremti eksperimentiniais ir statistiniais metodais. Plienų ciklinio deformavimo diagramos parametrams A , α , \bar{s}_T kambario ir aukštesnėje temperatūroje nustatyti ir patikslinti, buvo panaudotas „Microcal“ kompanijos programinis paketas „Origin 7.5“ ir sudarytos programos LabTalk programavimo kalba.

Mokslinis darbo naujumas. Išanalizavus 45 energetikoje naudojamų korozijai ir karščiui atsparių plienų mechanines ir ciklines deformavimo charakteristikas kambario ir aukštesnėje temperatūroje, pasiūlytos priklausomybės cikliniams deformavimo parametrams įvertinti pagal pagrindines mechanines charakteristikas σ_y , σ_u , ψ .

Ginami šie magistro darbo teiginiai:

1. Medžiagos ciklinių savybių kitimą apkrovimo pusciklių diapazone įvertina parametras α .
2. Matematinės statistikos metodais gautos išvados yra matematiškai patikimos, nes mažaciklio nuovargio charakteristikos ir modifikuotas plastiškumas yra atsitiktiniai ir nepriklausomi dydžiai, pasiskirstę pagal normalųjį dėsnį.
3. Tarp daugumos mažaciklio deformavimo parametrų ir modifikuoto plastiškumo kambario ir aukštesnėje temperatūroje yra koreliacinis ryšys, ir šie dydžiai gali būti susieti tiesine priklausomybe.

Rezultatų publikavimas. Magistro darbo tema buvo skaitytas pranešimas tarptautinėje konferencijoje „Mechanika – 2005“ ir paskelbti 3 straipsniai.

Praktinis pritaikymas. Šio darbo rezultatai gali būti panaudoti energetikos pramonės įrengimų, sunkiai apkrautų konstrukcijų ilgaamžiškumui ir patikimumui apskaičiuoti.

1. ATSPARUMO MAŽACIKLIAM DEFORMAVIMUI TYRIMO REZULTATAI

Šiame darbe išnagrinėta 30 korozijai ir karščiui atsparių plienų kambario temperatūroje bei 15 aukštesnėje temperatūroje. Nedidelė šių medžiagų dalis nebuvo panaudota ciklinių deformavimo parametrų nustatyti dėl jų didelės rezultatų sklaidos arba neturint vienos iš pagrindinių mechaninių charakteristikų.

1.1. Pagrindinių mechaninių charakteristikų nustatymas

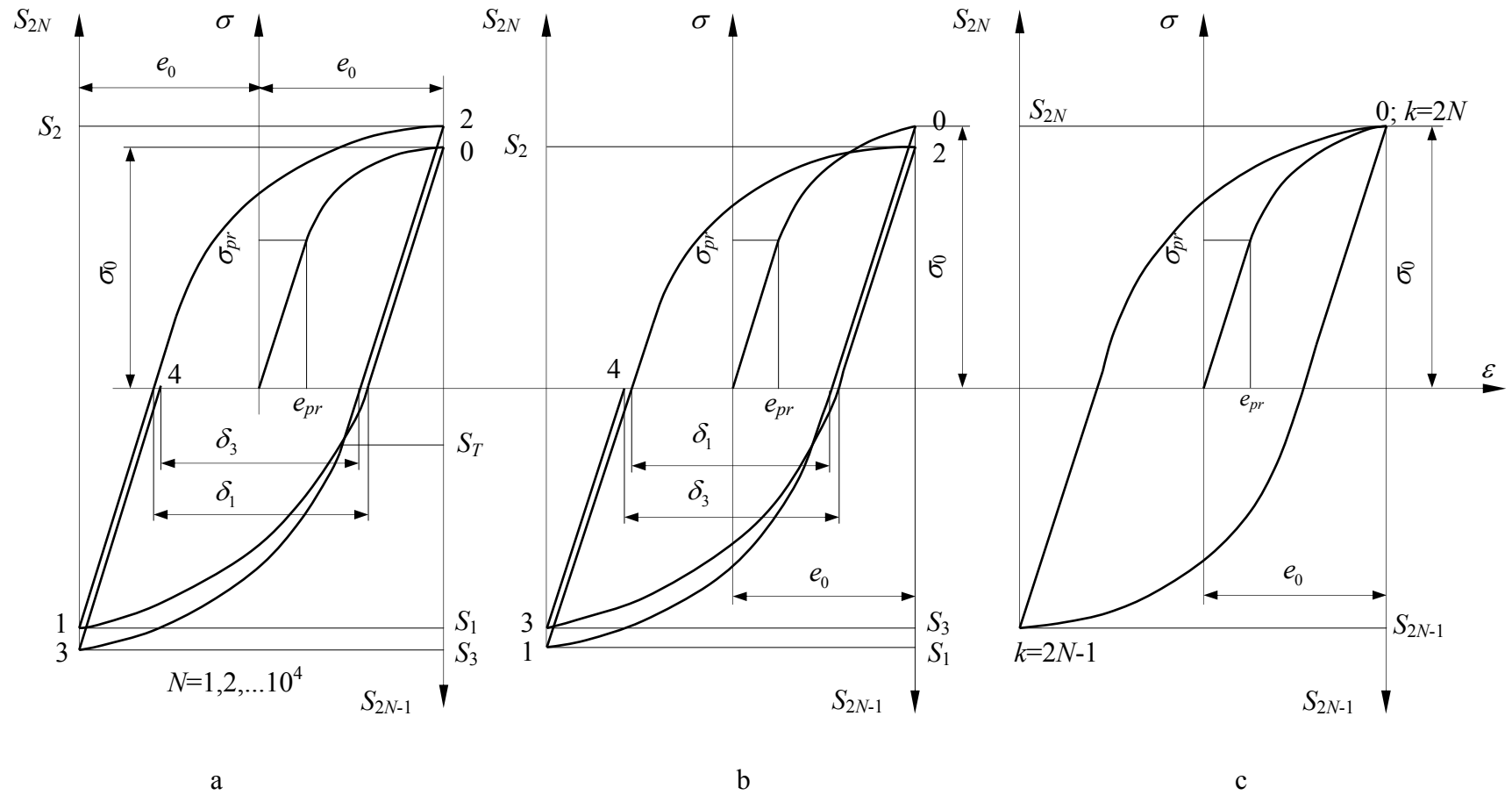
Pagrindinės mechaninės charakteristikos σ_y , σ_u ir ψ (1.1 ir 1.2 lentelės) buvo nustatytos iš tempimo bandymų rezultatų kambario ir aukštesnėje temperatūroje.

Takumo riba σ_y taip pat nustatyta atlikus ciklinį deformavimą, t.y. pagal nulinio pusciklio diagramas, panaudojus didelį bandinių skaičių, nes dėl nepakankamo kai kurių medžiagų bandinių skaičiaus mažaciklio nuovargio kreivėms sudaryti, tempimo bandymai nebuvo atlikti. Santykinis skerspjuvio sumažėjimas ψ nustatytas apskaičiavus kakliuko skerspjuvio plotą suirimo momentu. Mechaninės charakteristikos σ_u ir ψ kambario ir aukštesnėje temperatūroje dažniausiai yra trijų tempimo bandymų vidurkiai.

1.2. Ciklinių deformavimo kreivės parametrų nustatymas

Eksperimentiškai nustatyta, kad konstrukcinės medžiagos priklausomai nuo jų cheminės sudėties ir struktūrinio mechaninio būvio pagal pasipriešinimą tampriai plastiniam cikliniam deformavimui skirstomos į cikliškai stiprėjančias, silpnėjančias ir cikliškai stabilias (1.1 pav.), taip pat į cikliškai izotropines ir anizotropines.

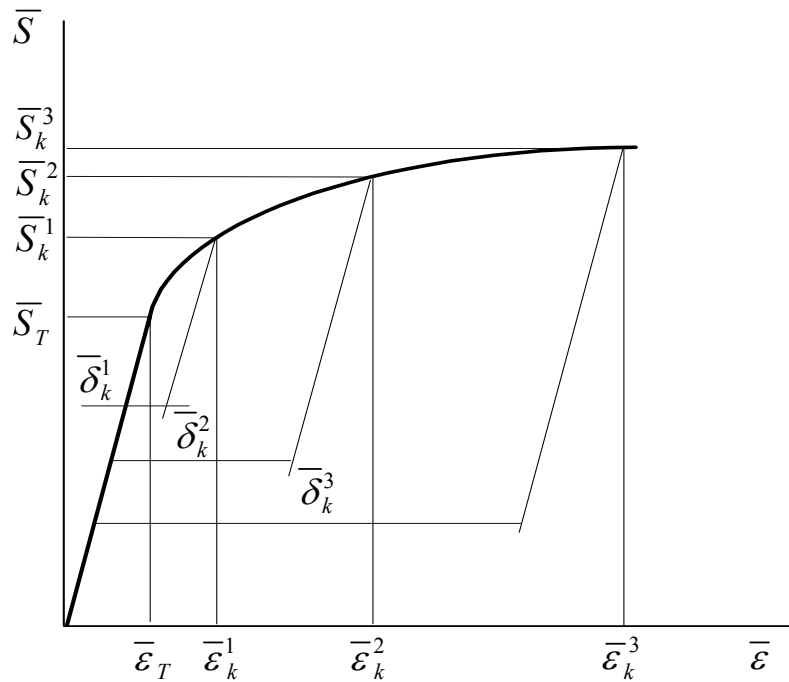
Medžiagos kitimo pobūdžiui, esant cikliniam deformavimui, turi įtakos jos struktūrinis mechaninis būvis, keičiamas terminiu apdirbimu arba plastine deformacija. Iš literatūros šaltinių žinoma, kad grūdinti, sukietinti (nestabilus būvis) plienai ciklinio deformavimo metu beveik visi linkę silpnėti, o atkaitinti, normalizuoti (stabilus būvis) minkšti plienai (HB=180...220) yra stabilūs arba stiprėja. Matyt, tai lemia plienų kristalinės sandaros ypatumai.



1.1 pav. Mažaciklio standaus deformavimo diagramos esant simetriniam ciklui:

a - stiprėjančių medžiagų; *b* - silpnėjančių medžiagų; *c* - stabilių medžiagų

Paspriešinimas deformavimui kiekviename pusciklyje apibūdinamas apibendrinta ciklinio tampriai plastinio deformavimo diagrama [1]. Diagrama sudaroma santykinėse koordinatėse $\bar{S} - \bar{\varepsilon}$, kurių pradžia kiekvieną kartą sutapdinama su to paties pusciklio deformavimo diagramos nukrovimo pradžios tašku (1.2 pav.). Šie k -ojo apkrovimo pusciklio deformavimo diagramos nukrovimo pradžios taškai nepriklausomai nuo pradinės deformacijos $\bar{\varepsilon}_0$ sudaro bendrą kreivę, kuri vadinama apibendrinta ciklinio tampriai plastinio deformavimo diagrama.



1.2 pav. Apibendrintos k -ojo pusciklio ciklinio deformavimo diagramos sudarymo schema

Analitiškai priklausomybė tarp įtempimų ir deformacijų apibendrintai ciklinio deformavimo diagramai išreiškiama lygtimis

$$\left. \begin{aligned} \bar{\varepsilon}_k &= \bar{S}_k, & \text{kai } \bar{S}_k &\leq \bar{S}_{Tk}; \\ \bar{\varepsilon}_k &= \bar{S}_k + \bar{\varepsilon}_{pk}, & \text{kai } \bar{S}_k &> \bar{S}_{Tk}, \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

čia $\bar{\varepsilon}_{pk}$ - k -ojo pusciklio plastinės deformacijos dedamoji, esant cikliniams įtempimams;

\bar{S}_{Tk} - ciklinė proporcingumo riba koordinatėse $\bar{S} - \bar{\varepsilon}$; k - pusciklio numeris.

Nekreipdami dėmesio į nukrovimo netiesiškumą ir galimą tamprumo modulio pasikeitimą, tariame, kad deformacijos plastinė dedamoji lygi histerezės kilpos pločiui, t.y. $\bar{\varepsilon}_{pk} = \bar{\delta}_k$, ir, remdamiesi (1.1) lygybe, galime užrašyti

$$\bar{\varepsilon}_k = \bar{S}_k + \bar{\delta}_k. \quad (1.2)$$

Vadinasi, apibendrintos ciklinio deformavimo diagramos geometrija bus žinoma, jei žinomas histerezės kilpos plotis, esant įvairiems pradinėms deformacijų lygiams ir įvairiems apkrovimo pusciklių skaičiams. Todėl, analitiškai aprašant deformavimo diagramą, svarbiausia yra aprašyti histerezės kilpos pločio kitimą, nes kilpos plotis - tai atitinkamo pusciklio plastinė deformacija. Patogiausia histerezės kilpos plotį nustatyti esant minkštam apkrovimui, kada maksimalūs įtempimai apriboti viename lygyje ir vienas iš deformavimo parametru yra fiksuotas.

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

Mažaciklio deformavimo k -ojo pusciklio diagrama aprašoma lygybe

$$\bar{S}_k = \bar{\varepsilon} - A \left(\bar{\varepsilon}_0 - \frac{\bar{s}_T}{2} \right) k^\alpha, \quad (1.3)$$

čia \bar{S}_k - k -ojo pusciklio cikliniai įtempimai; $\bar{\varepsilon}$ - standaus apkrovimo ciklinė deformacija (esant simetriniam ciklui, $\bar{\varepsilon} = 2\bar{\varepsilon}_0$); $\bar{\varepsilon}_0$ - pradinio (nulinio) pusciklio deformacija; \bar{s}_T - ciklinė proporcingumo riba; α ir A - ciklinio deformavimo diagramos parametrai.

Ciklinių įtempimų amplitudės \bar{S}_k apskaičiavimui pusciklyje k pagal (1.3) lygybę būtini ciklinio deformavimo diagramos parametrai A , α , \bar{s}_T . Konstrukcijų mažacikliam ilgaamžiškumui apskaičiuoti dažniausiai naudojami mažaciklio standaus deformavimo rezultatai, todėl parametrai A , α buvo apskaičiuoti iš standaus mažaciklio deformavimo diagramų.

Šiame darbe parametru A , α ir \bar{s}_T nustatymo metodai nurodyti 1.1 lentelėje.

Parametrų A , α ir \bar{s}_T nustatymo metodai

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

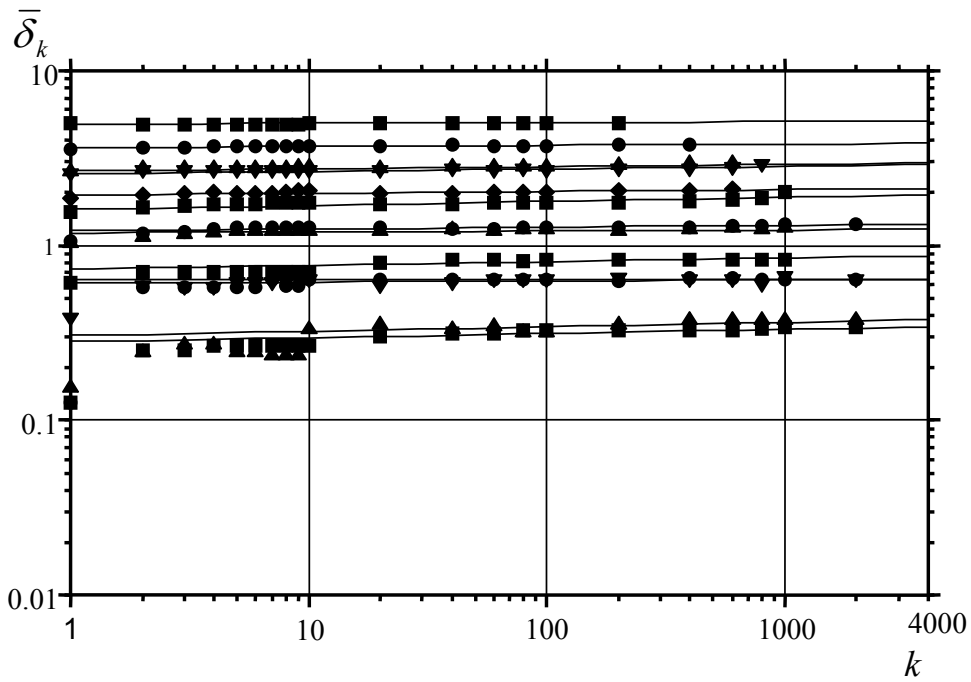
Esant standžiam apkrovimui, medžiagos elgsena nusakoma įtempimų amplitudės \bar{S}_k ir tampriai plastinės histerezės kilpos pločio $\bar{\delta}_k$ priklausomybe nuo pusciklių skaičiaus k . Darbe [2, 3] nustatyta, kad tampriai plastinės histerezės kilpos pločio $\bar{\delta}_k$ priklausomybė nuo pusciklių skaičiaus k dvigubose logaritminėse koordinatėse sudaro tiesę. Parametras α buvo apskaičiuotas atmetus histerezės kilpos pločio $\bar{\delta}_k$ reikšmes (atmestos reikšmės pažymėtos "x") puscikliuose $k = 1-9$ (1.3-1.5 pav.).

Grafiškai interpretavus tiesinę regresiją $y = a + bx$ (1.3 pav.), histerezės kilpos plotis cikliškai silpnėjančioms medžiagoms

$$\lg \bar{\delta}_k = \lg \bar{\delta}_1 + \alpha \lg k \quad (1.4)$$

arba k -ojo pusciklio tampriai plastinės histerezės kilpos plotis

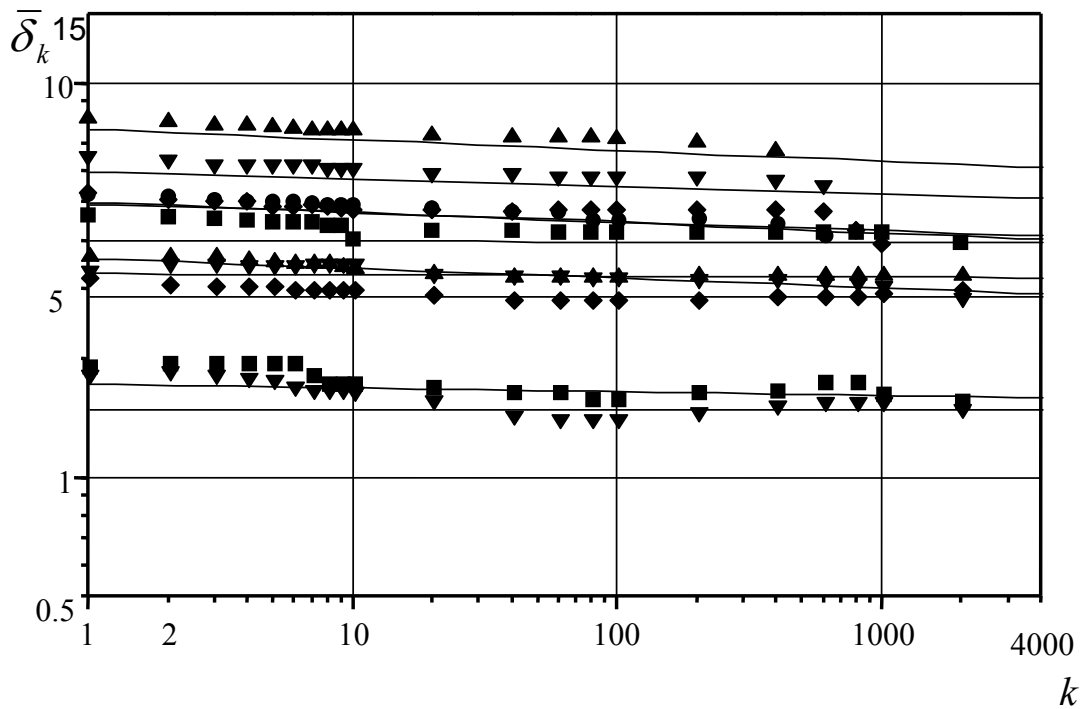
$$\bar{\delta}_k = \bar{\delta}_1 k^\alpha. \quad (1.5)$$



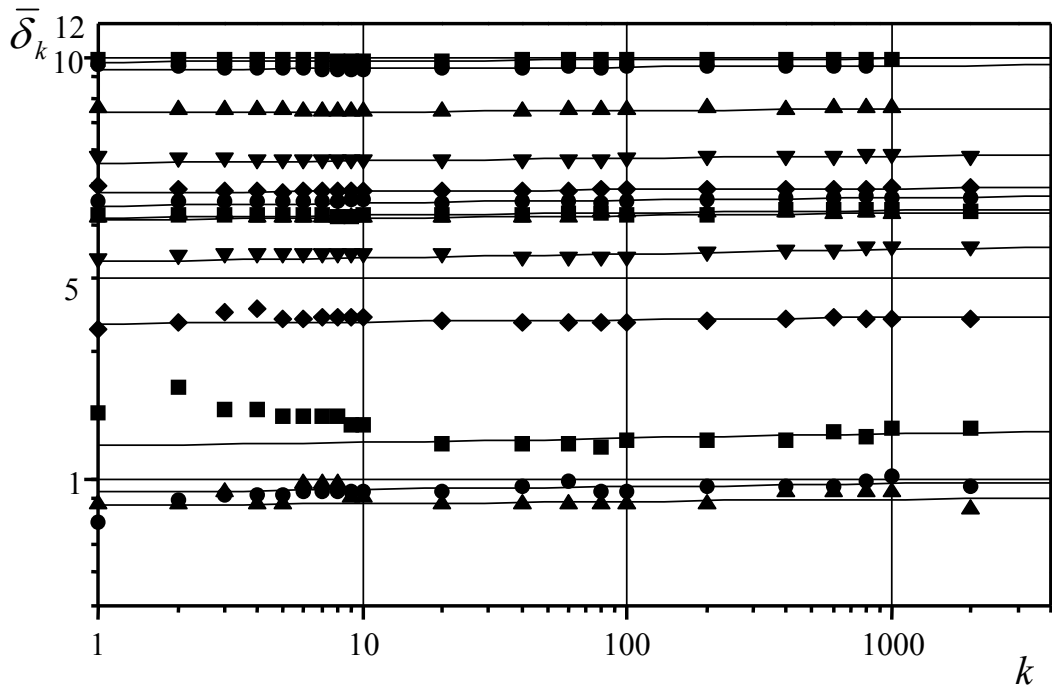
1.3 pav. Histerezės kilpos pločio priklausomybė nuo pusciklių skaičiaus stiprėjančiai medžiagai (plienas 00H14X5M3TiO)

Histerezės kilpos plotis cikliškai stiprėjančioms medžiagoms (1.4 pav.)

$$\bar{\delta}_k = \bar{\delta}_1 k^{-\alpha}. \quad (1.6)$$



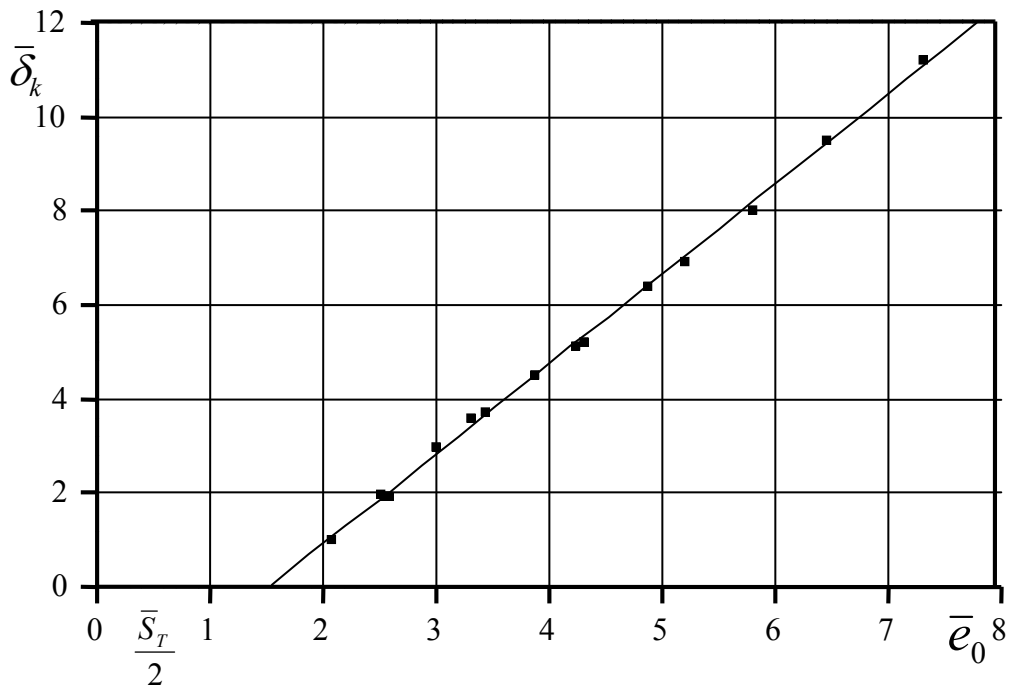
1.4 pav. Histerezės kilpos pločio priklausomybė nuo pusciklių skaičiaus stiprėjančiai medžiagai (plienas 0X18H10T)



1.5 pav. Histerzės kilpos pločio priklausomybė nuo pusciklių skaičiaus stabiliai medžiagai (pienas 04-3 (0X17H))

Cikliškai stabilioms medžiagoms (1.5 pav.) parametras $\alpha = 0$ ir histerzės kilpos plotis

$$\bar{\delta}_k = \bar{\delta}_1. \quad (1.7)$$



1.6 pav. 1-ojo pusciklio histerzės kilpos pločio priklausomybė nuo pradinės deformacijos plienui 0X18H10T

1.6 paveiksle parodyta tampriai plastinės histerezės kilpos pločio 1-ame pusciklyje $\bar{\delta}_1$ priklausomybė nuo pradinio pusciklio deformacijos \bar{e}_0 . Šiuo atveju tiesinės regresijos $y = a + bx$ koeficientai $a = 0$, $b = A$ ir nepriklausomai nuo medžiagos ciklinių savybių tampriai plastinės histerezės kilpos plotis 1-ame pusciklyje

$$\bar{\delta}_1 = A_1 \left(\bar{e}_0 - \frac{\bar{s}_{Tk}}{2} \right). \quad (1.8)$$

Iš (1.8) lygybės matyti, kad esant $\bar{s}_T/2$ reikšmei histerezės kilpa nesusidaro ($\bar{\delta}_1 = 0$). Kadangi daugumos nagrinėtų medžiagų ciklinė proporcingumo riba \bar{s}_{Tk} nežinoma, tai kiekvienos medžiagos \bar{s}_{Tk} buvo nustatyta iš grafinio vaizdo koordinatėse $\bar{\delta}_1 - \bar{e}_0$ (1.6 pav.). Ciklinė proporcingumo riba \bar{s}_{Tk} priklauso nuo medžiagos tipo ir histerezės kilpos pokyčio pusciklyje: \bar{s}_{Tk} didėja cikliškaip stiprėjančioms medžiagoms, mažėja cikliškaip silpnėjančioms ir nesikeičia cikliškaip stabilioms medžiagoms. Analitiškai aprašant apibendrintą diagramą, ciklinė proporcingumo riba priimama $\bar{s}_{T(1)} = \bar{s}_T$ [3].

Būtina pažymėti, kad ciklinės proporcingumo ribos reikšmės koordinatėse $\bar{\delta}_1 - \bar{e}_0$ (1 metodas) kinta nuo 1,32 iki 2,3 ir yra mažesnės už eksperimentines reikšmes. Todėl šiame darbe nustatytas \bar{s}_T reikšmes reikia traktuoti kaip sąlygines, t.y. skaičiuojamasias.

Korozijai ir karščiui atsparių plienų vidutinės \bar{s}_T reikšmės kambario ir aukštesnėje temperatūroje pateiktos 1.2 lentelėje.

1.2 lentelė

Korozijai ir karščiui atsparių plienų vidutinės skaičiuojamosios ciklinės proporcingumo ribos reikšmės

Medžiagų grupė	\bar{s}_T
I variantas	
Kambario temperatūroje	2,71
Aukštesnėje temperatūroje	2,97
II variantas	
Kambario temperatūroje	1,73
Aukštesnėje temperatūroje	1,79
III variantas	
Kambario temperatūroje	1,75
Aukštesnėje temperatūroje	1,91

Iš sudarytų priklausomybių koordinatėse $\lg \bar{\delta}_k - \lg k$ (1.3-1.4 pav.) nustačius 1-ojo ir k -ojo pusciklių $\bar{\delta}_1$ ir $\bar{\delta}_k$ reikšmes kiekvienam bandiniui, medžiagos stiprėjimo (silpnėjimo) intensyvumą įvertinantis parametras

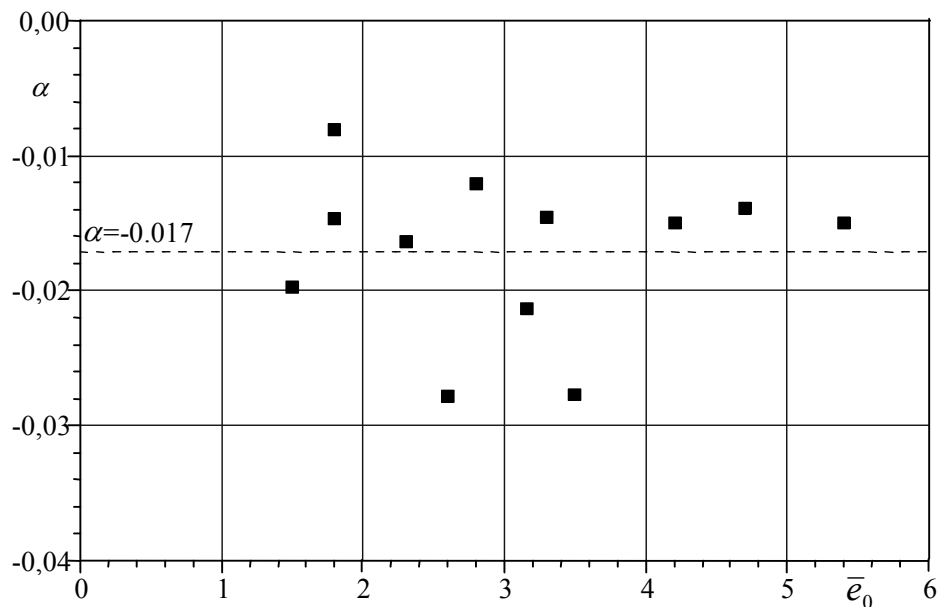
$$\alpha = \frac{\lg \bar{\delta}_k - \lg \bar{\delta}_1}{\lg k} \quad (1.9)$$

arba, panaudojus (1.3) lygybę, ciklinio deformavimo diagramos parametras

$$\alpha = \frac{1}{\lg k} \cdot \lg \frac{\bar{\varepsilon} - \bar{S}_k}{A_1 \left(\bar{\varepsilon}_0 - \bar{S}_r / 2 \right)}. \quad (1.10)$$

(1.9) ir (1.10) lygybėse parametras α įvertina medžiagos ciklinių savybių kitimą esant cikliniam tampriai plastiniam deformavimui. Jeigu α yra teigiamas, medžiaga silpnėja, jeigu α yra neigiamas - stiprėja, o jeigu $\alpha = 0$ - medžiaga yra stabili. Darbe [2] stabiliomis buvo laikomos medžiagos, kurių parametras α kito nuo $-0,01$ iki $0,01$.

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



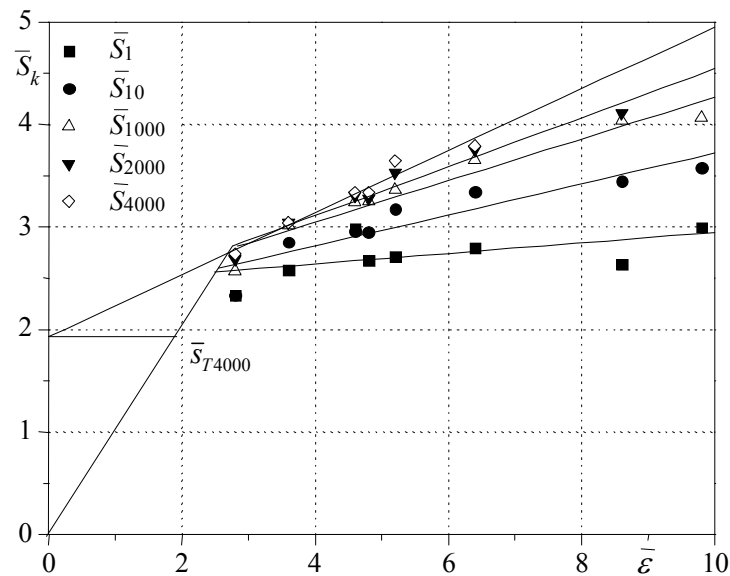
1.7 pav. Parametro α priklausomybė nuo pradinės deformacijos plienui 02X16HM

Nustatant ciklines deformavimo charakteristikas pagal 2 metodą (1.1 lentelė), parametras \bar{s}_T apskaičiuotas pagal darbe [3] pasiūlytą lygybę

$$\bar{s}_T = 2 - 0,8 \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_u} \psi. \quad (1.11)$$

Plastinę deformaciją apibūdinantis parametras A apskaičiuotas pagal (1.8) lygybę ir yra atitinkamos medžiagos bandinių aritmetinis vidurkis.

Šiame darbe ciklinė proporcingumo riba \bar{s}_{Tk} buvo nustatyta iš sudarytų ciklinio deformavimo diagramų (1.8 pav.). Apytiksliai parametro \bar{s}_T reikšmė gauta pagal \bar{S}_k ir $\bar{\varepsilon}$ tarpusavio priklausomybę, aproksimuojančiai tiesei kertant \bar{S}_k koordinatę žemiausioje padėtyje. Parametrai α ir A nustatyti prieš tai aprašytais metodais.



1.8 pav. Parametro \bar{s}_{Tk} nustatymas iš ciklinio deformavimo diagramos plienui 0X18H10T kambario temperatūroje, kai $k = 1; 10; 1000; 2000$ ir 4000

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

Daugumai šiame darbe nagrinėtų medžiagų buvo būdingas ciklinių savybių pradinis nestabilumas intervale $k < 10 - 20$. Deformavimo diagramos buvo užrašytos iki bandinio suirimo (iki 10-o pusciklio nepertraukiamai, o toliau periodiškai, norint išvengti užrašo susiliejinimo). Siekiant objektyviau įvertinti medžiagos ciklinio deformavimo diagramos parametrus A , α , \bar{s}_T , visi histerezės kilpos taškai iki $k = 10$ buvo atmesti kaip nereikšmingi, palyginti su likusiu ilgaamžiškumu $N_f < 10^4$ ciklų srityje.

(1.1)-(1.10) lygybės sudarytos simetriniam mažaciklio apkrovimo ciklui. Realiose konstrukcijose, pvz., įtempimų koncentracijos vietose, plyšių susidarymo zonose, dažnai pasireiškia asimetrinis deformavimas. Tačiau, panaudojus priklausomybes, žinomas iš darbų [3, 4, 5], nesunku standaus simetrinio apkrovimo rezultatus pritaikyti ir asimetriniam apkrovimui.

Šiame darbe konstantos A ir α bei ciklinė proporcingumo riba \bar{s}_T nustatytos iš standaus deformavimo diagramų, todėl šie dydžiai yra naudotini standaus deformavimo procesui aprašyti, nes gautos šių parametrų reikšmės verčia abejoti anksčiau teikta bendra minkšto ir standaus apkrovimo ciklinio deformavimo diagrama [6-8].

1.3 ir 1.4 lentelėse pateiktos ciklinės deformavimo charakteristikos A , α , \bar{s}_T kambario ir aukštesnėje temperatūroje yra 10-15 mažaciklio nuovargio bandymų rezultatas. Žinant šias charakteristikas, pagal (1.3) lygybę gali būti sudaryta norimos medžiagos apibendrinta ciklinio deformavimo diagrama.

1.3 lentelė

Korozijai ir karščiui atsparių plienų pagrindinės mechaninės ir ciklinės deformavimo charakteristikos kambario temperatūroje

Nr.	Medžiaga	Terminis apdirbimas	Mechaninės charakteristikos			Ciklinės charakteristikos*		
			σ_u , MPa	σ_y , MPa	ψ , %	A	α	\bar{s}_T
1	0X18H10T	vAtk	652	151	72,5	1,45	-0,013	1,94
2	0X18H10T(II.II)	vAtk	449	228	65	1,78	-0,006	1,7
3	X18H22B2T2	vAtk+Atl	777	309	40	1,39	-0,011	1,82
4	00H14X5M3TIO	S 480°C	839	609	71,6	0,93	0,037	1,72
5	00H14X5M3TIO	S 560°C	1216	788	61,5	1,08	0,013	1,72

6	1X17H2	Gr+Atl	913	441	55,3	1,13	0,033	1,8
7	1X17H2	Gr+ žAtl	1216	546	53,5	1,21	0,013	1,94
8	0X16H4Б1	Gr+Atl	918	528	64	1,23	0,032	1,62
9	0X16H4Б1	Gr+ žAtl	1067	667	59,6	1,18	0,034	1,65
10	0X13H4MJ1	hAtk+ Gr+Atl	829	360	60,9	1,21	0,024	1,81
11	04-3 (0X17H)	Gr+Atl	675	484	56,7	1,6	0,005	1,72
12	08X18H10T-III	vAtk	532	143	55,2	1,23	-0,05	1,71
13	519 (08X18H10Г3T)	vAtk	544	154	38,6	1,33	-0,033	2
14	522 (08X18H10Г3T)	vAtk	544	154	38,6	1,09	-0,019	1,79
15	156 (išilgai dendritų)	-	736	721	64,5	1,3	0,042	1,61
16	156 (skersai dendritų)	-	736	721	64,5	1,32	0,042	1,56
17	157 (skersai dendritų)	-	778	778	-	-	-	-
18	46 (20X13III)	-	819	778	59,7	1,61	0,027	1,79
19	01X16H (49)	Gr	386	275	76	1,53	-0,004	1,72
20	02X16HM	Gr+Atl	525	390	60	1,44	0,015	1,66
21	80П (XH32ΦTЮ)	vAtk+S	505	197	56,5	1,34	-0,005	1,9
22	81П (XH32ΦTЮ)	vAtk+S	505	197	56,5	1,27	-0,012	1,9
23	06X18H5Г9АБ (ЛЧ)	Gr	614	375	66,4	1,52	0,009	1,79
24	06X18H5Г9АБ (ЛЧC)	Gr+S	625	423	72,4	1,27	0,017	1,8
25	06X18H10Г3T	Gr	600	285	-	-	-	-
26	XH36TЮM3	vAtk+S	1280	776	27,8	1,18	0,027	1,62
27	XH55MBЦ	vAtk	720	265	75	1,44	-0,006	1,84
28	Бр (07X16H4Б-ЭШВ)	Gr+Atl	965	720	48,4	1,02	0,023	1,8
29	Ж (07X16H4Б-ЭШВ)	Gr+Atl	965	720	48,4	1,42	0,027	1,73
30	33 (XH55MBЦ)	vAtk	720	249	77	1,37	-0,034	1,64

* Parametrai nustatyti pagal 3 metodą

vAtk – visiškas atkaitinimas; hAtk – homogenizacinis atkaitinimas; Gr – grūdinimas;

žAtl – žemasis atleidimas; Atl – aukštasis atleidimas; S - sendinimas

Korozijai ir karščiui atsparių plienų pagrindinės mechaninės ir ciklinės deformavimo charakteristikos aukštesnėje temperatūroje

Nr.	Medžiaga	$T, ^\circ\text{C}$	Terminis apdirbimas	Mechaninės charakteristikos			Ciklinės charakteristikos*		
				σ_u , MPa	σ_y , MPa	ψ , %	A	α	\bar{s}_T
1	X18H22B2T2	350°C	vAtk+Atl	657	220	49	1,63	-0,052	1,84
2	0X18H10T	350°C	vAtk	394	95	69,3	1,65	-0,002	3,02
3	07X16H4Б (Э)	350°C	G+Atl	760	552	60	1,25	-0,016	1,82
4	08X18H10T-III	350°C	vAtk	355	154	52,2	1,11	-0,005	1,65
5	519	350°C	vAtk	336	147	45	1,01	0,022	1,9
6	522	350°C	vAtk	336	147	45	0,84	0,037	1,82
7	05X12H2M	350°C	N+Atl	417	286	71,6	1,44	-0,0003	1,62
8	06X18H5Г9АБ (33)	350°C	S	556	173	61,9	1,48	0,001	1,77
9	-,,- (400ЧС)	350°C	S	700	232	65,1	1,86	0,004	1,8
10	-,,- (ЧС1000)	350°C	S	488	191	63,2	1,43	0,034	2,02
11	-,,- (ЛЧС)	350°C	G+S	535	345	61,2	1,51	-0,014	1,73
12	08X18H10ТГ3Т	350°C	G	508	218	69,3	1,34	-0,026	1,73
13	XH55МВЦ (20)	350°C	vAtk	545	225	68,9	1,98	-0,044	1,85
14	-,,- (59)	350°C	vAtk	550	-	71,3	-	-	-
15	-,,- (5)	350°C	vAtk	565	179	65	1,96	-0,064	2,12

* Parametrai nustatyti pagal 3 metodą

vAtk – visiškas atkaitinimas; N- normalizavimas; Gr – grūdinimas; Atl – aukštasis atleidimas; S - sendinimas

2. CIKLINIŲ DEFORMAVIMO KREIVĖS PARAMETRŲ PRIKLAUSOMYBĖ NUO MECHANINIŲ CHARAKTERISTIŲ

2.1. Ryšys tarp deformavimo kreivės parametrų ir statinių charakteristikų

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

Kaip jau buvo minėta, grūdinti didelio kietumo plienai cikliška silpnėja, o atkaitinti ir normalizuoti vidutinio kietumo plienai dažniausiai yra cikliška stabilūs arba stiprėja. Tačiau kiekybinį ciklinių savybių įvertinimą, kaip parodyta šiame darbe, patikimiausiai galima atlikti pagal mechanines charakteristikas. Šis metodas jau buvo naudotas anksčiau keleto autorių.

R.W. Landgraf darbe [9] pažymima, kad medžiagos cikliška stiprėja esant $\sigma_u/\sigma_y > 1,4$; cikliška silpnėja esant $\sigma_u/\sigma_y < 1,2$ ir yra cikliška stabilios, kai $1,2 < \sigma_u/\sigma_y < 1,4$. Išbandžius 35 medžiagas (plienus, aliuminio ir titano lydinius), šios išvados pasitvirtino 26 medžiagoms. A.P. Gusenkov ir A.N. Romanov darbe [10], patikrinus 48 medžiagas (44 plienai ir 4 aliuminio lydiniai), nustatyta, kad santykis σ_u/σ_y nėra pagrindinis faktorius, nusakantis medžiagų ciklines savybes. Čia parodyta, kad ciklines savybes tiksliau nustato tolydinės tempimo deformacijos e_u santykis su statinio suirimo deformacija e_ψ , t.y. e_u/e_ψ . Tačiau norint nustatyti tolydinę deformaciją e_u iš Gusenkov ir Romanov pasiūlytos priklausomybės, reikia atlikti sudėtingus tempimo bandymus. Juos galima atlikti tikrai aukšto mokslinio ir techninio lygio laboratorijose, todėl kur kas perspektyvesnis būdas medžiagų ciklinėms savybėms ir deformavimo diagramos parametrams nustatyti - naudoti mechanines charakteristikas σ_{pr} , σ_y , σ_u , S_k ir ψ , gautas standartiniu tempimo bandymu.

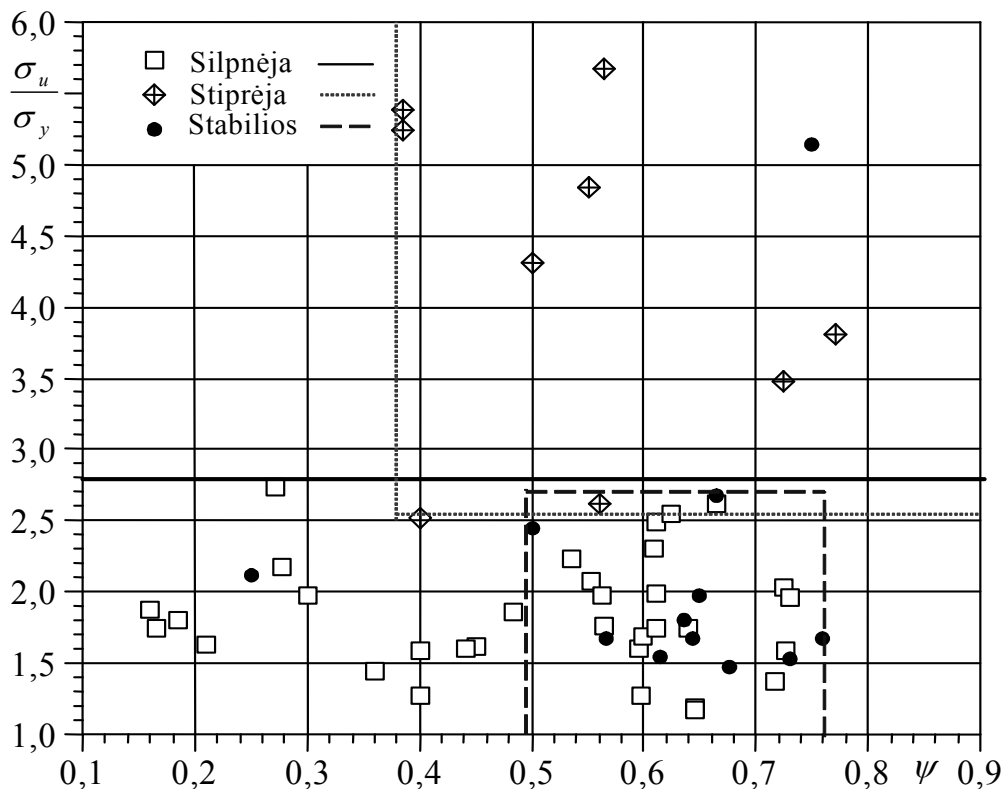
Darbe [3], ištyrus 106 medžiagas (plienus ir jų suvirinimo siūlių medžiagas), buvo išskirtos keturios ciklinių savybių išsidėstymo sritys: 1) kai $\sigma_u/\sigma_y > 1,8$, plienai, nepriklausomai nuo ψ , stiprėja; 2) kai $\sigma_u/\sigma_y < 1,4$ ir $\psi < 0,72$, plienai silpnėja; 3) kai $\sigma_u/\sigma_y < 1,4$ ir $\psi > 0,72$, visos medžiagos yra stabilios; 4) kai $1,4 < \sigma_u/\sigma_y < 1,8$, nepriklausomai nuo ψ , turime pereinamąją sritį, kuriai charakteringas nedidelis stiprėjimas, nedidelis silpnėjimas arba

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

Šiame darbe, apdorojus 66 korozijai ir karščiui atsparių plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų kambario temperatūroje tyrimo rezultatus, buvo bandyta patikslinti ciklinių savybių sritis koordinatėse $\sigma_u/\sigma_y - \psi$. Išskirtinos trys ciklinių savybių pasiskirstymo sritys (2.1 pav.): 1) kai $\sigma_u/\sigma_y < 2,8$, plienai ir jų siūlių medžiagos, nepriklausomai nuo ψ , silpnėja; 2) kai $2,5 < \sigma_u/\sigma_y < 5,5$ ir $\psi > 0,38$, plienai ir jų siūlių medžiagos stiprėja; 3) kai $\sigma_u/\sigma_y < 2,7$ ir $0,5 < \psi < 0,76$, plienai ir jų siūlių medžiagos cikliška stabilūs.

Stabiliomis buvo laikomos medžiagos, kurių parametras α kito nuo $-0,01$ iki $0,01$.

Kaip matome, medžiagų skirstymas pagal ciklines savybes į cikliška silpnėjančias, stiprėjančias arba stabilias koordinatėse $\sigma_u/\sigma_y - \psi$ nepavyko, nes cikliška stabilios medžiagos yra tuose pačiuose intervaluose, kaip ir cikliška nestabilios.



2.1 pav. Korozijai ir karščiui atsparių plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų ciklinių deformavimo ir mechaninių charakteristikų tarpusavio priklausomybė kambario temperatūroje

Ieškant ryšio tarp mechaninių ir ciklinių deformavimo charakteristikų, šiame darbe buvo panaudota funkcija $y = f\left(\frac{\sigma_u}{\sigma_y} \psi\right)$ ir atlikta tyrimo rezultatų statistinė analizė.

2.2. Atsparumo mažacikliam deformavimui tyrimo rezultatų statistinė analizė

Norint tinkamai atlikti tyrimo rezultatų analizę ir gauti matematiškai patikimas analitines priklausomybes tarp ciklinių deformavimo kreivės parametrų ir mechaninių charakteristikų, turi būti tenkinamos tam tikros sąlygos: tyrimo rezultatų stochastinis (statistinis) nepriklausomumas ir tyrimo rezultatų pasiskirstymas pagal normalųjį dėsnį. Šių sąlygų tenkinimas leidžia taikyti matematinės statistikos metodus uždaviniams spręsti ir garantuoja koreliacinės regresinės analizės metodų teorinį pagrįstumą.

2.2.1. Išsiskiriančių deformavimo kreivės parametrų atmetimas

Duomenų sklaida gali atsirasti dėl konstrukcinių medžiagų mechaninio nevienalytiškumo, bandinių gamybos paklaidų ir kitų priežasčių, todėl, prieš taikant statistinius metodus, buvo patikrinta, ar tarp tyrimo duomenų nėra ryškiai išsiskiriančių. Ryškiai išsiskiriantiems duomenims atmesti buvo panaudotas N. Smirnov kriterijus [11]. Šiuo atveju tyrimo rezultatai išdėstomi variacine eilute

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

ir apskaičiuojama vidutinė reikšmė bei vidutinis kvadratinis nuokrypis.

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

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

dispersijos įvertis

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

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

Vidutinis kvadratinis nuokrypis

$$s = \sqrt{s^2}. \quad (2.4)$$

Apskaičiuojama statistika

$$u_1 = \frac{\bar{x} - x_1}{s}, \quad (2.5)$$

jei abejojama dėl pirmojo variacinės eilutės nario arba

$$u_n = \frac{x_n - \bar{x}}{s}, \quad (2.6)$$

jei abejojama dėl didžiausią reikšmę turinčio variacinės eilutės nario. Gauta reikšmė lyginama su kritine reikšme u_α [11], kai reikšmingumo lygmuo α ir duomenų skaičius n .

Kai teisingos nelygybės

$$u_1 \leq u_\alpha \quad \text{arba} \quad u_n \leq u_\alpha, \quad (2.7)$$

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

$$u_1 > u_\alpha \quad \text{arba} \quad u_n > u_\alpha, \quad (2.8)$$

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 turi būti koreguojami, imant $n-1$.

Smirnovo kriterijaus panaudojimas korozijai ir karščiui atsparių plienų ciklinio deformavimo parametru A kambario temperatūroje atmesti.

Duomenys skaičiavimui pateikti 1.3 lentelėje. Jie buvo sugrupuoti, suskirstant ciklinio deformavimo diagramos parametro A variavimo amplitudę į 9 vienodų intervalų 0,9-1,0; 1,0-1,1; ...; 1,7-1,8. Parametro $A = y_j$ reikšmė intervalo j vidurio taške ir parametro dažnumas j intervale pateikti 2.1 lentelėje.

Skaičiavimo rezultatai pateikti 2.2 lentelėje. Bendras medžiagų skaičius ir medžiagų skaičius po ryškiai išsiskiriančių bei mažai tikėtinų reikšmių atmetimo pateikti 2.3 lentelėje.

Pagal grafinį vaizdą buvo atmestos ir mažai tikėtinos reikšmės, siekiant sumažinti dispersiją, gauti tikslesnę vidutinę reikšmę [12], taip pat siekiant koreliacinio ryšio tarp turimų duomenų, nors ir buvo teisingos (2.7) nelygybės.

Korozijai ir karščiui atsparių plienų ciklinio deformavimo diagramos parametro $A = y_j$ kambario temperatūroje reikšmė j intervalo vidurio taške ir parametro dažnumas n_j j intervale

e	1	2	3	4	5	6	7	8	9	n
y_j	0,95	1,05	1,15	1,25	1,35	1,45	1,55	1,65	1,75	
y_j^2	0,9025	1,0125	1,3225	1,5625	1,8225	2,1025	2,4025	2,7225	3,0625	
n_j	1	4	3	5	6	4	2	2	1	28
n_j	1	4	3	5	6	4	2	2	-	27
n_j	1	4	3	5	6	4	2	1	-	26
n_j	1	4	3	5	6	4	2	-	-	25

2.2 lentelė

Korozijai ir karščiui atsparių plienų ryškiai išsiskiriančių parametro A kambario temperatūroje reikšmių atmetimo sąlygos $u_i > u_\alpha$ tikrinimas

Ryškiai išsiskiriantys parametrai	y_i	$\sum_{j=1}^e y_j$	$\sum_{j=1}^e y_j^2$	\bar{y}	n	s^2	s	u_i	$u_{0,05}$	Parametro atmetimas
2	1,78	36,61	48,97	1,31	28	0,041	0,203	2,32	2,1	Atmestas
18	1,61	34,83	45,80	1,23	27	0,034	0,184	2,17	2,09	Atmestas
11	1,60	33,22	43,21	1,22	26	0,03	0,173	2,19	2,08	Atmestas
25	1,53	31,62	40,65	1,19	25	0,028	0,167	2,04	2,07	Neatmestas

Apibūdinant ciklinio deformavimo diagramos parametru A , α , \bar{s}_T ir modifikuoto plastiškumo $(\sigma_u / \sigma_y)_{\mu}$ tarpusavio priklausomybę, gautas grafinis vaizdas (atmetus ryškiai išsiskiriančias ir mažai tikėtinas reikšmes) leido manyti, jog ciklinio deformavimo diagramos parametru A , α , \bar{s}_T regresija mechaninių charakteristikų atžvilgiu yra tiesinė ($y = a + bx$) ir geriausiai nusako tiesinio ryšio stiprumą (2.3 lentelė).

2.2.2. Deformavimo kreivės parametrų ir modifikuoto plastiškumo atsitiktinumo ir nepriklausomumo statistinis tikrinimas

Konstruktinių medžiagų mechaninės ir ciklinės deformavimo charakteristikos yra atsitiktiniai dydžiai, kadangi priklauso nuo daugelio faktorių, kurių didžioji dalis yra atsitiktinio pobūdžio (temperatūriniai, mechaniniai poveikiai, nukrypimai nuo technologinio proceso ir kt.).

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

Serių kriterijus, naudojant imties medianą [13]. Surašius imties x_1, x_2, \dots, x_n elementus didėjimo tvarka, gaunama variacinė eilutė pagal (2.1) lygybę.

Medianos reikšmė, esant nelygiam tyrimo rezultatų skaičiui $n = 2m - 1$, yra lygi viduriniam variacinės eilutės nariui

$$x_{0,5} = x_m. \quad (2.10)$$

2.3 lentelė

Medžiagų skaičius n , koreliacijos koeficientas r ir individualios sklaidos apie regresijos tiesę dydis δ_y (lentelėje pažymėta $n \frac{r}{\delta_y}$), esant tiesinei ciklinių charakteristikų priklausomybei nuo modifikuoto plastiškumo

Ciklinės charakteristikos	Modifikuotas plastiškumas	Medžiagos numeris	
	$(\sigma_u / \sigma_y) \psi$	Nėra duomenų	Atmesti duomenys
KOROZIJAI IR KARŠČIUI ATSPARŪS PLIENAI			
Kambario temperatūra			Viso 30
A	$25 \frac{0,264}{0,152}$	$\psi (17; 25)$	3 (2; 11; 18)
α	$26 \frac{-0,691}{0,016}$		2 (1; 12)
\bar{s}_T	$27 \frac{0,416}{0,095}$		1 (13)

Aukštesnė temperatūra			Viso 15
A	$13 \frac{0,691}{0,265}$	(14)	1 (2)
α	$13 \frac{-0,418}{0,029}$		1 (2)
\bar{s}_T	$13 \frac{0,427}{0,129}$		1 (2)
Skliausteliuose duotas medžiagos numeris atitinka 1.3-1.4 lentelėse pateiktą medžiagos markę			

Kai $n = 2m$ yra lyginis, mediana

$$x_{0.5} = \frac{x_m + x_{m+1}}{2}. \quad (2.11)$$

Pradžioje turėtai imčiai x_1, x_2, \dots, x_n buvo sudaryta ženklų eilutė: vietoj x_i rašytas ženklas "+", jei $x_i > x_{0.5}$, ir ženklas "-", jei $x_i < x_{0.5}$. Imties nariai, lygūs medianos reikšmei, buvo praleisti. Gauta pliusų ir minusų eilutė.

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

Pasirinkus reikšmingumo lygmenį α , turi būti tenkinamos nelygybės

$$\left. \begin{aligned} \gamma_n &> \left[\frac{1}{2} (n+1 - z_\alpha \sqrt{n-1}) \right]; \\ \tau_n &< [3,3(\lg n + 1)], \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

čia z_α - normaliojo pasiskirstymo kvantilis [11]. Nelygybėje (2.12) laužtiniai skliaustai reiškia, kad imama sveikoji skaičiaus, esančio skliaustuose, dalis.

Jei bent viena iš (2.12) nelygybių netenkinama, tai hipotezė apie tyrimo rezultatų nepriklausomumą atmetama.

Ciklinių deformavimo parametro A ir modifikuoto plastiškumo atsitiktinumo ir nepriklausomumo statistinis tikrinimas. Korozijai ir karščiui atsparių plienų ciklinio deformavimo diagramos parametro A bei modifikuoto plastiškumo $(\sigma_u / \sigma_y)_{\text{kor}}$ kambario temperatūroje atsitiktinumo ir nepriklausomumo statistinis tikrinimas naudojant medianą parodytas 2.4 lentelėje. Duomenys skaičiavimui paimti iš 1.3 lentelės.

Plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų tyrimo rezultatų kambario ir aukštesnėje temperatūroje statistinis tikrinimas, naudojant serijų kriterijus, patvirtino, kad ciklinio deformavimo diagramos tos pačios grupės medžiagų deformavimo charakteristikos A_1 , α , \bar{s}_T , taip pat modifikuotas plastiškumas $(\sigma_u / \sigma_y)_{\text{kor}}$ yra atsitiktiniai ir nepriklausomi dydžiai.

2.4 Lentelė

Korozijai ir karščiui atsparių plienų ciklinio deformavimo diagramos parametro A bei modifikuoto plastiškumo $(\sigma_u / \sigma_y)_{\text{kor}}$ kambario temperatūroje atsitiktinumo ir nepriklausomumo statistinis tikrinimas, naudojant medianą

i	A_1	$x_{i+1} - x_i$	i	A_1	$x_{i+1} - x_i$	i	A_1	$x_{i+1} - x_i$
1	1,45	-	11	1,33	-	21	1,18	+
2	1,39	-	12	1,09	+	22	1,44	-
3	0,93	+	13	1,3	+	23	1,02	+
4	1,08	+	14	1,32	+	24	1,42	-
5	1,13	+	15	1,53	-	25	1,37	
6	1,21	+	16	1,44	-	26		
7	1,23	-	17	1,34	-	27		
8	1,18	+	18	1,27	+	28		
9	1,21	+	19	1,52	-	29		
10	1,23	+	20	1,27	-	30		

i	$(\sigma_u / \sigma_y) \%, \%$	$x_i - x_{0,5}$	i	$(\sigma_u / \sigma_y) \%, \%$	$x_i - x_{0,5}$	i	$(\sigma_u / \sigma_y) \%, \%$	$x_i - x_{0,5}$
1	252,55	+	11	136,35	+	21	45,86	-
2	100,58	-	12	136,35	+	22	203,77	+
3	98,64	-	13	65,84	-	23	64,87	-
4	94,90	-	14	65,84	-	24	64,87	-
5	114,49	+	15	106,68	+	25	222,65	+
6	119,15	+	16	80,77	-	26		
7	111,27	+	17	144,84	+	27		
8	95,34	-	18	144,84	+	28		
9	140,24	+	19	108,72	-	29		
10	205,36	+	20	106,97	-	30		
$x_{0,5} = 108,72; \quad \gamma = 13 > \left[\frac{1}{2}(25 + 1 - 1,64\sqrt{25 - 1}) \right] = 9; \quad \tau = 7 < [3,3(\lg 25 + 1)] = 8$								

2.2.3. Tyrimo rezultatų pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį hipotezių tikrinimas

Yra nemažai kriterijų, kuriais analitiniu būdu galima atlikti tyrimo rezultatų pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį hipotezių tikrinimą. Kadangi mūsų turimų medžiagų skaičius $n < 120$, [11-17] tai galima rasti paprastas rekomendacijas normalumo hipotezių tikrinimui:

Vidutinio absoliutinio nuokrypio (VAN) panaudojimas [12]. Esant nedideliame duomenų skaičiui n , kaip sklaidos matą nuo vidutinės reikšmės rekomenduojama naudoti vidutinį absoliutinį nuokrypį, kuris sumažina ekstremalių reikšmių įtaką. Vidutinis absoliutinis nuokrypis apskaičiuojamas pagal lygybę

$$VAN = \frac{\sum |x_i - \bar{x}|}{n}. \quad (2.13)$$

Kai tyrimo rezultatai artimi normaliajam dėsniiui, turi būti tenkinama nelygybė

$$\left| \frac{VAN}{s} - 0,7979 \right| < \frac{0,4}{\sqrt{n}}, \quad (2.14)$$

čia s - empirinis vidutinis kvadratinis nuokrypis, apskaičiuojamas pagal (2.4) lygybę, kai empirinė dispersija

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2. \quad (2.15)$$

H.A. David kriterijus, naudojant varijavimo amplitudę R . Greitas duomenų pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį hipotezės tikrinimas, kai $3 < n < 1000$, gali būti atliktas naudojant varijavimo amplitudę R .

Šiuo atveju apskaičiuotą santykį R/s lyginame su [12] lentelėje duotomis viršutinėmis ir apatinėmis kritinėmis santykio ribomis, pasirinkus hipotezės reikšmingumo lygmenį α . Jei varijavimo amplitudės R ir standartinio nuokrypio s santykis mažesnis už atitinkančią šį lygmenį apatinę ribą arba didesnis už atitinkančią šį lygmenį viršutinę ribą, tai, esant pasirinktam reikšmingumo lygmeniui α , hipotezė apie normalųjį pasiskirstymą atmetama. Tai ypač svarbu, kai reikšmingumo lygmuo $\alpha = 0,1$, t.y. 10% (gretutinės) ribos [12].

S.S. Shapir ir M.B. Wilk suderinamumo kriterijus W [11] naudojamas hipotezės, kad tyrimo rezultatai pasiskirstę pagal normalųjį arba logaritminį normalųjį dėsnį, tikrinimui ir yra efektyvus (su didesne tikimybe atmeta neteisingą hipotezę) tikrinant normalumą, kai duomenų skaičius nedidelis ($n \leq 50$). Atliekant skaičiavimą pagal šį kriterijų, tyrimo rezultatai išdėstomi variacine eilute remiantis (2.1) lygybe.

Norint apskaičiuoti kriterijų

$$W = \frac{b^2}{S^2}, \quad (2.16)$$

nustatomi dydžiai

$$S^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{n}; \quad (2.17)$$

$$b = \sum_{i=1}^k a_{n-i+1} (x_{n-i+1} - x_i). \quad (2.18)$$

Reikšmė $a_{n-i+1} (i = 1, 2, 3, \dots, k)$ parenkama iš lentelių [11]. Be to, jeigu n - lyginis skaičius, tai $k = n/2$, jeigu n nelyginis skaičius, $k = (n-1)/2$.

Jei teisinga nelygybė

$$W \geq W_\alpha, \quad (2.19)$$

tai hipotezė apie duomenų normalųjį pasiskirstymą neatmetama. Čia W_α - kritinė Šapiro ir Vilko

2.2.4. Deformavimo kreivės parametrų ir modifikuoto plastiškumo pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį tikrinimas

Kadangi nagrinėjama ciklinių deformavimo charakteristikų A , α , \bar{s}_T priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo $(\sigma_u / \sigma_y)_{\psi}$, tai reikalaujama, kad šie atsitiktiniai dydžiai būtų pasiskirstę pagal normalųjį dėsnį.

Šiame darbe ciklinių parametrų A , α , \bar{s}_T ir modifikuoto plastiškumo $(\sigma_u / \sigma_y)_{\psi}$ pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį hipotezės buvo tikrinamos panaudojus vidutinį absoliutinį nuokrypį (VAN), variavimo amplitudę R bei Šapiro ir Vilko W suderinamumo kriterijų. Duomenys skaičiavimui pateikti 1.3-1.4 lentelėse.

Vidutinio absoliutinio nuokrypio (VAN) naudojimas. Pradiniai duomenys pateikti ir skaičiavimai atlikti 2.5 lentelėje.

Pagal 2.5 lentelės duomenis ir (2.13) lygybę

$$VAN = \frac{991}{25} = 39,64.$$

Pagal (2.15) lygybę apskaičiuojamas dispersijos įvertis

$$s^2 = \frac{66183}{25-1} = 2757,63.$$

Pagal (2.4) lygybę apskaičiuojamas vidutinis kvadratinis nuokrypis

$$s = \sqrt{2757,63} = 52,51.$$

Įstačius šias reikšmes į (2.14) nelygybę, gauta

$$\left| \frac{39,64}{52,51} - 0,7979 \right| < \frac{0,4}{\sqrt{25}}$$

arba

$$0,043 < 0,08.$$

Vadinasi, korozijai ir karščiui atsparių plienų modifikuotas plastiškumas $(\sigma_u / \sigma_y)\%$ kambario temperatūroje yra pasiskirstęs pagal normalųjį dėsnį.

Varijavimo amplitudės R naudojimas. Darbe atliktas korozijai ir karščiui atsparių plienų modifikuoto plastiškumo $(\sigma_u / \sigma_y)\%$ kambario temperatūroje pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį hipotezės tikrinimas, naudojant varijavimo amplitudę R . Pagal 2.5 lentelės duomenis buvo nustatyta didžiausia ir mažiausia modifikuoto plastiškumo $(\sigma_u / \sigma_y)\%$ reikšmė ir apskaičiuota varijavimo amplitudė $R = x_{max} - x_{min}$:

$$R = 252,55 - 45,86 = 206,69.$$

2.5 lentelė

Korozijai ir karščiui atsparių plienų modifikuoto plastiškumo $(\sigma_u / \sigma_y)\% = x$ kambario temperatūroje duomenys dydžiams \bar{x} ir s apskaičiuoti

Medž.	$(\sigma_u / \sigma_y)\%,\%$	$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})^2$	Medž.	$(\sigma_u / \sigma_y)\%,\%$	$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})^2$
1	252.55	131.28	17234.54	14	65.84	-55.43	3072.44
2	100.58	-20.69	428.06	15	106.68	-14.59	212.86
3	98.64	-22.63	512.10	16	80.77	-40.50	1640.22
4	94.9	-26.37	695.36	17	144.84	23.57	555.56
5	114.49	-6.78	45.96	18	144.84	23.57	555.56
6	119.15	-2.12	4.49	19	108.72	-12.55	157.49
7	111.27	-10.00	99.99	20	106.97	-14.30	204.48
8	95.34	-25.93	672.34	21	45.86	-75.41	5686.61
9	140.24	18.97	359.88	22	203.77	82.50	6806.32
10	205.36	84.09	7071.20	23	64.87	-56.40	3180.91
11	136.35	15.08	227.42	24	64.87	-56.40	3180.91
12	136.35	15.08	227.42	25	222.65	101.38	10277.99
13	65.84	-55.43	3072.44				
$n = 25$ $\bar{x} = 3032 / 25 = 121,27$ $\sum x_i - \bar{x} = -495,57 + 495,57 = 991$				Suma	3032	991	66183

Santykis

$$\frac{R}{s} = \frac{206,69}{52,51} = 3,94.$$

Kai $n = 25$ ir $\alpha = 0,10$, nustatytos apatinė 3,45 ir viršutinė 4,53 ribos [14]. Santykis įeina į intervalo ribas, t.y. $3,45 < 3,66 < 4,53$, ir todėl su užsiduotu statistiniu patikimumu galima teigti, kad pagal šį kriterijų hipotezė apie korozijai ir karščiui atsparių plienų modifikuoto plastiškumo (σ_u / σ_y) kambario temperatūroje pasiskirstymą pagal normalųjį dėsnį pasitvirtina.

Shapiro ir Wilk suderinamumo kriterijaus W naudojimas. Shapiro ir Wilk kriterijus panaudotas korozijai ir karščiui atsparių plienų modifikuoto plastiškumo (σ_u / σ_y) kambario temperatūroje pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį hipotezės tikrinimui. Modifikuotas plastiškumas (σ_u / σ_y) , išdėstytas variacine eilute pagal (2.1) lygybę, pateiktas 2.6 lentelėje. Pagal (2.17) lygybę apskaičiuotas dydis

$$S^2 = 433840 - \frac{3032^2}{25} = 66119.$$

Kai $n = 25$ ir $k = (n-1)/2 = 12$, buvo parinktos reikšmės a_{n-i+1} ($i = 1, 2, \dots, 25$) ir pagal (2.18) lygybę apskaičiuotas dydis b . Parinkti ir apskaičiuoti duomenys pateikti 2.7 lentelėje.

Pagal (2.16) lygybę apskaičiuotas kriterijus

$$W = \frac{244,75^2}{66119} = 0,906$$

palygintas su kritine reikšme. Kai $n = 25$ ir $\alpha = 0,05$, $W_{0,05} = 0,918$ [11].

Sąlyga (2.19) tenkinama, t.y. empirinis skirstinys (2.7 lentelė) yra pasiskirstęs pagal normalųjį dėsnį.

Korozijai ir karščiui atsparių plienų modifikuotas plastiškumas $(\sigma_u / \sigma_y)\psi$ kambario temperatūroje

i	$(\sigma_u / \sigma_y)\psi, \%$	i	$(\sigma_u / \sigma_y)\psi, \%$	i	$(\sigma_u / \sigma_y)\psi, \%$	i	$(\sigma_u / \sigma_y)\psi, \%$
1	45.86	8	95.34	15	114.49	22	203.77
2	64.87	9	98.64	16	119.15	23	205.36
3	64.87	10	100.58	17	136.35	24	222.65
4	65.84	11	106.68	18	136.35	25	252.55
5	65.84	12	106.97	19	140.24		
6	80.77	13	108.72	20	144.84		
7	94.9	14	111.27	21	144.84		
						Suma	3032
						$\sum (\sigma_u \psi / \sigma_y)^2 = 433840$	

Korozijai ir karščiui atsparių plienų modifikuoto plastiškumo $(\sigma_u / \sigma_y)\psi$ kambario temperatūroje pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį hipotezės tikrinimas naudojant Shapiro ir Wilk suderinamumo kriterijų

i	a_{n-i+1}	$(\sigma_u \psi / \sigma_y)_{n-i+1}$	$(\sigma_u \psi / \sigma_y)_i$	b
1	0,4450	252.55	45.86	91,98
2	0,3069	222.65	64.87	48,42
3	0,2543	205.36	64.87	35,73
4	0,2148	203.77	65.84	29,63
5	0,1822	144.84	65.84	14,39
6	0,1539	144.84	80.77	9,86
7	0,1283	140.24	94.9	5,82
8	0,1046	136.35	95.34	4,29
9	0,0823	136.35	98.64	3,10
10	0,0610	119.15	100.58	1,13
11	0,0403	114.49	106.68	0,31
12	0,0200	111.27	106.97	0,09
Suma				244,75

Tikrinimo rezultatai korozijai ir karščiui atsparių plienų kambario ir aukštesnėje temperatūroje pateikti 2.8 lentelėje. „+“ ženklas reiškia, kad duomenys yra pasiskirstę pagal normalųjį dėsnį, „-“ ženklas reiškia, kad normaliojo pasiskirstymo nėra. Kritinės reikšmės nustatytos pagal lenteles [11], pasirinkus $\alpha = 0,05$, o normalumas pagal santykį R/s buvo tikrintas pasirinkus reikšmingumo lygmenį $\alpha = 0,1$.

2.8 lentelė

Ciklinių deformavimo parametrų ir modifikuoto plastiškumo normalumo tikrinimas panaudojus vidutinį absoliutinį nuokrypį (VAN), varijavimo amplitudės ir dispersijos santykį R/s , Shapiro ir Wilk W kriterijų

Ciklinės harakte- ristikos	Medžiagų skaičius n	$(\sigma_u / \sigma_y)_{W}$			A, α, \bar{s}_T		
		VAN	R/s	W	VAN	R/s	W
KOROZIJAI IR KARŠČIUI ATSPARŪS PLIENAI							
Kambario temperatūra							
A_1	27	+	+	-	+	+	+
α	28	+	+	-	+	+	+
\bar{s}_T	25	+	+	-	+	+	-
Aukštesnė temperatūra							
A_1	10	+	+	+	+	+	+
α	14	+	-	+	+	+	+
\bar{s}_T	12	+	-	+	+	+	+

2.2.5. Tyrimo rezultatų koreliacinė analizė

Pagrindinis koreliacinės analizės uždavinys - surasti teorinę regresijos kreivę, analitiškai ją aprašyti ir atlikti gautų rezultatų statistinį įvertinimą [18]. Šis uždavinys gali būti išspręstas tiesinės priklausomybės ribose tarp normaliai pasiskirsčiusių atsitiktinių dydžių. Kaip kiekybinis stipraus ryšio tarp atsitiktinių dydžių X ir Y įvertinimas naudojamas koreliacijos koeficientas, kuris charakterizuoja šių atsitiktinių dydžių tiesinio priklausomumo laipsnį ir, esant atsitiktinių dydžių pasiskirstymui pagal normalųjį dėsnį, apskaičiuojamas pagal lygybę

$$r = \frac{m_{1/1}}{s_x s_y}, \quad (2.20)$$

čia $m_{1/1}$ - mišrus centrinis momentas; s_x, s_y - atsitiktinių dydžių X ir Y vidutiniai kvadratiniai nuokrypiai.

Mišrus centrinis momentas apskaičiuojamas pagal lygybę

$$m_{1/1} = \frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i \right). \quad (2.21)$$

Atsitiktinių dydžių X ir Y dispersijos įverčiai s_x^2 ir s_y^2 apskaičiuojami remiantis (2.3) lygybe.

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

Atliekant nepriklausomų dydžių, kuriems teorinė koreliacijos koeficiento reikšmė ρ lygi nuliui, analizę, empirinis koreliacijos koeficientas r gali gerokai skirtis nuo nulinės reikšmės. Todėl buvo atliktas hipotezės apie koreliacijos nebuvimą tarp atsitiktinių dydžių X ir Y tikrinimas, t.y. nulinės hipotezės tikrinimas (teorinio koreliacijos koeficiento ρ lygybė nuliui pagal esamus duomenis), panaudojus R.A. Fisher keitinį u . Šis keitinyis parodo, kad atsitiktinio dydžio pasiskirstymą

$$u = \frac{1}{2} \ln \frac{1+r}{1-r} \quad (2.21)$$

galima aproksimuoti normaliuoju dėšniu su matematine viltimi

$$M\{U\} = a_u = \frac{1}{2} \ln \frac{1+\rho}{1-\rho} + \frac{\rho}{2(n-1)} \quad (2.22)$$

ir dispersija

$$D\{U\} = \sigma_u^2 = \frac{1}{n-3}. \quad (2.23)$$

Nulinės hipotezės tikrinimas $\rho = 0$, esant alternatyvai $\rho \neq 0$, atliktas pagal (2.21) ir (2.23) lygybes apskaičiavus u , σ_u ir palyginus parametą u su kritiniu, esant tikimybei $P = 1 - \alpha / 2$. Jei tenkinama sąlyga

$$|u| \leq z_{1-\alpha/2} \sigma_u, \quad (2.24)$$

atsitiktiniai dydžiai yra tiesiškai vienas nuo kito nepriklausomi, t.y. buvo priimta nulinė hipotezė $\rho = 0$. Kai $|u| > z_{1-\alpha/2} \sigma_u$ - nulinė hipotezė atmesta, nes tarp ciklinių deformavimo charakteristikų ir modifikuoto plastiškumo yra koreliacinė priklausomybė. Čia $z_{1-\alpha/2}$ - standartinio normaliojo pasiskirstymo kvantilis parenkamas pagal lentelę [11], pasirinkus tikimybės $P = 1 - \alpha / 2$ reikšmę; α - reikšmingumo lygmuo (klaidos tikimybė).

Koreliacijos koeficiento pasikliautinieji intervalai nustatyti panaudojus (2.21) lygybę. Nustatant pasikliautinuosius intervalus, buvo priimtas 0,9 pasikliautinosios tikimybės lygis.

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

$$u - z_{1-\alpha/2} \sigma_u < a_u < u + z_{1-\alpha/2} \sigma_u \quad (2.25)$$

arba

$$u_1 < a_u < u_2, \quad (2.26)$$

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

Ribinėms reikšmėms u_1 ir u_2 panaudojus (2.21) lygybę pagal

$$r = \frac{e^{2u} - 1}{e^{2u} + 1} \quad (2.27)$$

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

$$r_1 < \rho < r_2. \quad (2.28)$$

Skaičiavimo rezultatai korozijai ir karščiui atsparių plienų kambario ir aukštesnėje temperatūroje pateikti 2.9 lentelėje. Kai tenkinama sąlyga $|u| \leq z_{1-\alpha/2} \sigma_u$, priimama nulinė hipotezė $\rho = 0$. Tada sakoma, kad atsitiktiniai dydžiai yra nekoreliuoti, t.y. ciklinės

deformavimo parametrai A , α , \bar{s}_T ir modifikuotas plastiškumas (σ_u / σ_y) tiesiškai vienas nuo kito nepriklausomi.

2.9 lentelė

Skaičiavimo rezultatų lentelė, tikrinant nulinę hipotezę $\rho = 0$ tarp ciklinių deformavimo parametrų A , α , \bar{s}_T ir modifikuoto plastiškumo (σ_u / σ_y) pagal sąlygą $|u| \leq z_{1-\alpha/2} \sigma_u$, kai $z_{0,975} = 1,96$ ($\alpha = 0,05$, $P = 1 - \alpha / 2 = 0,975$). 90% pasikliautinąjį intervalo ribos $[r_1, r_2]$ teoriniam koreliacijos koeficientui

Ciklinės charakteristikos	n	\bar{x}	\bar{y}	s_x	s_y	r	u	$z_{0,975} \sigma_u$	$ u \leq z_{1-\alpha/2} \sigma_u$	$r_1 < \rho < r_2$	
										r_1	r_2
KOROZIJAI IR KARŠČIUI ATSPARŪS PLIENAI											
Kambario temperatūra											
A	25	121,27	1,26	52,51	0,165	0,264	0,27	0,529	$\rho = 0$	0,207	0,319
α	26	109,38	0,011	41,68	0,022	-0,691	-0,849	0,409	$\rho \neq 0$	-0,719	-0,658
\bar{s}_T	27	117,23	1,75	52,17	0,103	0,416	0,443	0,4	$\rho \neq 0$	0,367	0,462
Aukštesnė temperatūra											
A	13	141,9	1,45	43,09	0,351	0,691	0,851	0,62	$\rho \neq 0$	0,661	0,721
α	13	141,9	-0,011	43,09	0,031	-0,418	-0,445	0,62	$\rho = 0$	-0,466	-0,367
\bar{s}_T	13	141,9	1,82	43,09	0,37	0,427	0,457	0,62	$\rho = 0$	0,38	0,474

2.2.6. Deformavimo kreivės parametrų ir modifikuoto plastiškumo tyrimo rezultatų regresinė analizė

Koreliacinė analizė parodė, kad tarp daugumos plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų ciklinių deformavimo charakteristikų A , α , \bar{s}_T ir modifikuoto plastiškumo (σ_u / σ_y) kambario ir aukštesnėje temperatūroje yra koreliacinis ryšys (2.9 lentelė), t.y. egzistuoja tiesinė priklausomybė, kurią galima aprašyti empirine regresijos tiesės lygtimi

$$Y = a + bx, \quad (2.29)$$

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

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

$$s_{y/x}^2 = s_y^2 \frac{(1-r^2)(n-1)}{n-2}. \quad (2.30)$$

Individualios sklaidos apie regresijos tiesę dydis, t.y. Y nustatymo pagal (2.29) lygybę grynoji klaida

$$\delta_y = \sqrt{s_{y/x}^2}. \quad (2.31)$$

Teorinei regresijos tiesei yra nustatomi pasikliautiniai intervalai ir pasikliautinoji sritis. Šiam tikslui pagal (2.29) lygybę buvo apskaičiuotas dydis Y ir nustatyta jo dispersija

$$s_{\hat{Y}/x}^2 = s_{y/x}^2 \left[\frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{(n-1)s_x^2} \right]. \quad (2.32)$$

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

$$Y - s_{Y/x} t_{\alpha,k} < a_y < Y + s_{Y/x} t_{\alpha,k}, \quad (2.33)$$

čia $t_{\alpha,k}$ - Stjudento (Student) kriterijaus reikšmė, nustatoma pagal pasirinktą reikšmingumo lygmenį $\alpha = 0,05$ ir laisvės laipsnių skaičių $k = n - 2$ [11].

Regresijos lygties adekvatumo tikrinimas. Suradus regresijos linijos parametrų įverčius a ir b , buvo patikrinta, ar gautoji lygtis pakankamai tiksliai aprašo tyrimo rezultatus (buvo patikrintas lygties $y = a + bx$ adekvatumas) [13]. Tam panaudotas Fišerio kriterijus

$$F = \frac{s_y^2}{\delta_y^2}, \quad (2.34)$$

čia s_y^2 - dispersija, apibūdinanti duomenų nukrypimą nuo vidurkio; $\delta_y^2 = s_{y/x}^2$ - liekamoji dispersija, apibūdinanti duomenų nukrypimą nuo regresijos linijos taškų.

Jei pasirinktam reikšmingumo lygmeniui α dydis F yra ne mažesnis už reikšmę $F_{\alpha(k_1-1, k_2-2)}$ [12], regresijos lygtis yra adekvati. Priešingu atveju manoma, kad nėra tiesinės priklausomybės tarp tikrinamų dydžių ir reikia nagrinėti sudėtingesnes priklausomybes.

Tyrimo rezultatų aprašymo tikslumui nustatyti, t.y. F kriterijaus reikšmingumui nustatyti (kai $\alpha > 0,1$), panaudota aproksimacija, kurią pasiūlė E.S. Paulson [12]

$$\bar{z} = \left\{ \left(1 + \frac{2}{9k_2} \right) F^{1/3} - \left(1 - \frac{2}{9k_1} \right) \right\} / \sqrt{\frac{2}{9k_2} F^{2/3} + \frac{2}{9k_1}}; \quad (2.35)$$

(2.35) lygybė teisinga esant laisvės laipsnių skaičiui $k > 3$. Klaidos tikimybė α nustatyta kaip plotas pagal z kriterijų [12] atitinkamai F kriterijaus reikšmei.

2.2.7. Tiesinė regresinė analizė deformavimo kreivės parametrų ir modifikuoto plastiškumo atveju

Šiame skirsnyje atlikta tiesinės ciklinio deformavimo diagramos parametrų A , α , \bar{s}_T regresijos modifikuoto plastiškumo (σ_u / σ_y) atžvilgiu analizė korozijai ir karščiui atspariems plienams kambario ir aukštesnėje temperatūroje ir nustatytos 95% pasikliautiniosios srities ribos regresijos tiesei, panaudojus (2.29)-(2.35) lygybes.

Regresijos koeficientų įvertinimas. Regresijos tiesialiniškumas buvo tikrinamas grafiškai, atidėjus koordinatėse $x = (\sigma_u / \sigma_y)$ ir $y = (A, \alpha, \bar{s}_T)$ tyrimo rezultatų duomenis (2.2-2.7 pav.). Kadangi buvo manyta, kad gauti taškai grupuojasi apie tiesę, tiesiniam ryšiui nusakyti buvo panaudota (2.29) lygybė. Empirinės tiesinės regresijos parametrai pateikti 2.9 lentelėje.

Regresijos lygties $y = a + bx$ koeficientų a ir b reikšmės korozijai ir karščiui atspariems plienams kambario ir aukštesnėje temperatūroje pateiktos 2.12 lentelėje.

Plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų **tiesinės regresijos** $y = a + bx$ **adekvatumo tikrinimas** parodė (2.10 lentelė), kad tiesinės ciklinių deformavimo charakteristikų priklausomybės nuo modifikuoto plastiškumo patikimumas yra 70-80%, esant koreliaciniam ryšiui tarp minėtų charakteristikų (2.9 lentelė). Kai koreliacinio ryšio nėra, tiesinės ciklinių charakteristikų regresijos $y = a + bx$ modifikuoto plastiškumo atžvilgiu patikimumas yra apie 50%.

Fišerio pasiskirstymo α eilės kvantilio $F_{\alpha(k_1-1, k_2-2)}$ tarpinės reikšmės, kai medžiagų skaičius $n \leq 30$, buvo nustatytos interpoliuojant. Pavyzdžiui, korozijai ir karščiui atsparių plienų

aukštesnėje temperatūroje ciklinio deformavimo diagramos parametrai A medžiagų skaičius $n = 25$, $k_1 = 25 - 1 = 24$, $k_2 = 25 - 2 = 23$. Pasirinkus $\alpha = 0,1$, nustatytos ribos $20 < k_1 = 24 < 25$, kurios atitinka 1,76 ir 1,73 [12], esant vardikliui $k_2 = 23$. Ieškomą reikšmę pažymėjus x , sudaryta lygybė $(1,76 - x)/(1,76 - 1,73) = (1/20 - 1/24)/(1/20 - 1/23)$. Iš čia $x = F_{0,1} = 1,72$.

Kai F kriterijaus reikšmingumui nustatyti, kai $\alpha > 0,1$ ir $k < 30$, buvo panaudota Paulson pasiūlyta (2.35) lygybė.

2.10 lentelė

Ciklinių deformavimo parametrai A , α ir \bar{s}_T tiesinės regresijos $y = a + bx$ modifikuoto plastiškumo $(\sigma_u / \sigma_y)_{\psi}$ atžvilgiu adekvatumo tikrinimas naudojant Fišerio kriterijų.

Adekvatumo sąlyga $F \geq F_{\alpha(k_1, k_2)}$, $k_1 = n - 1, k_2 = n - 2$

Ciklinės charakteristikos	Medžiagų skaičius n	$y = a + bx$			
		F	$F_{0,3}$	$F_{0,1}$	F_{α}
KOROZIJAI IR KARŠČIUI ATSPARŪS PLIENAI					
Kambario temperatūra					
A	25	1	-	1,68	$F'_{0,5}$
α	26	0,96	-	1,66	1,89 _{0,05}
\bar{s}_T	27	1,03	-		2,95 _{0,005}
Aukštesnė temperatūra					
A	13	1,57	-	2,56	$F'_{0,2}$
α	13	0,95	-	2,13	$F'_{0,5}$
\bar{s}_T	13	2,44	-	2,23	$F'_{0,5}$
F'_{α} - apytikslės reikšmės, atitinkančios F kriterijų					

Kadangi ciklinių deformavimo parametrai A , α , \bar{s}_T priklausomybę nuo modifikuoto plastiškumo $(\sigma_u / \sigma_y)_{\psi}$ galima apibūdinti tiesine regresija $y = a + bx$, 2.12 lentelėje pateiktos analitinės šių charakteristikų tarpusavio priklausomybės.

Pasikliautinosios srities ribos teorinei regresijos tiesei. Čia parodytas korozijai ir karščiui atsparių plienų tiesinės regresijos $A_1 = 1,19 + 0,0005(\sigma_u / \sigma_y) \psi$ kambario temperatūroje pasikliautinosios srities ribų nustatymas su 0,95 pasikliovimo tikimybe.

Teorinei regresijos tiesei įvertinti nustatoma pasikliautinoji sritis. Šiam tikslui pagal (2.30) lygybę įvertinta atsitiktinio dydžio Y sąlyginė dispersija

$$s_{y/x}^2 = 0,165^2 (1 - 0,169^2) \frac{25-1}{25-2} = 0,027144$$

ir pagal (2.31) lygybę apskaičiuotas individualios sklaidos apie regresijos tiesę dydis

$$\delta_y = \sqrt{s_{y/x}^2} = \sqrt{0,027144} = 0,165.$$

95% pasikliautinosios srities ribų (punktirinės linijos) skaičiavimo eiliškumas regresijos tiesei pagal (2.32) ir (2.33) lygybes parodytas 2.11 lentelėje.

2.11 lentelė

95% pasikliautinosios srities ribų (punktirinės linijos) skaičiavimo rezultatai tiesinei regresijai $Y = 1,19 + 0,0005x$, kai $(n-1)s_x^2 = 66125$, $t_{\alpha,k} = 1,96$, $\alpha = 0,05$ ir $k = 23$

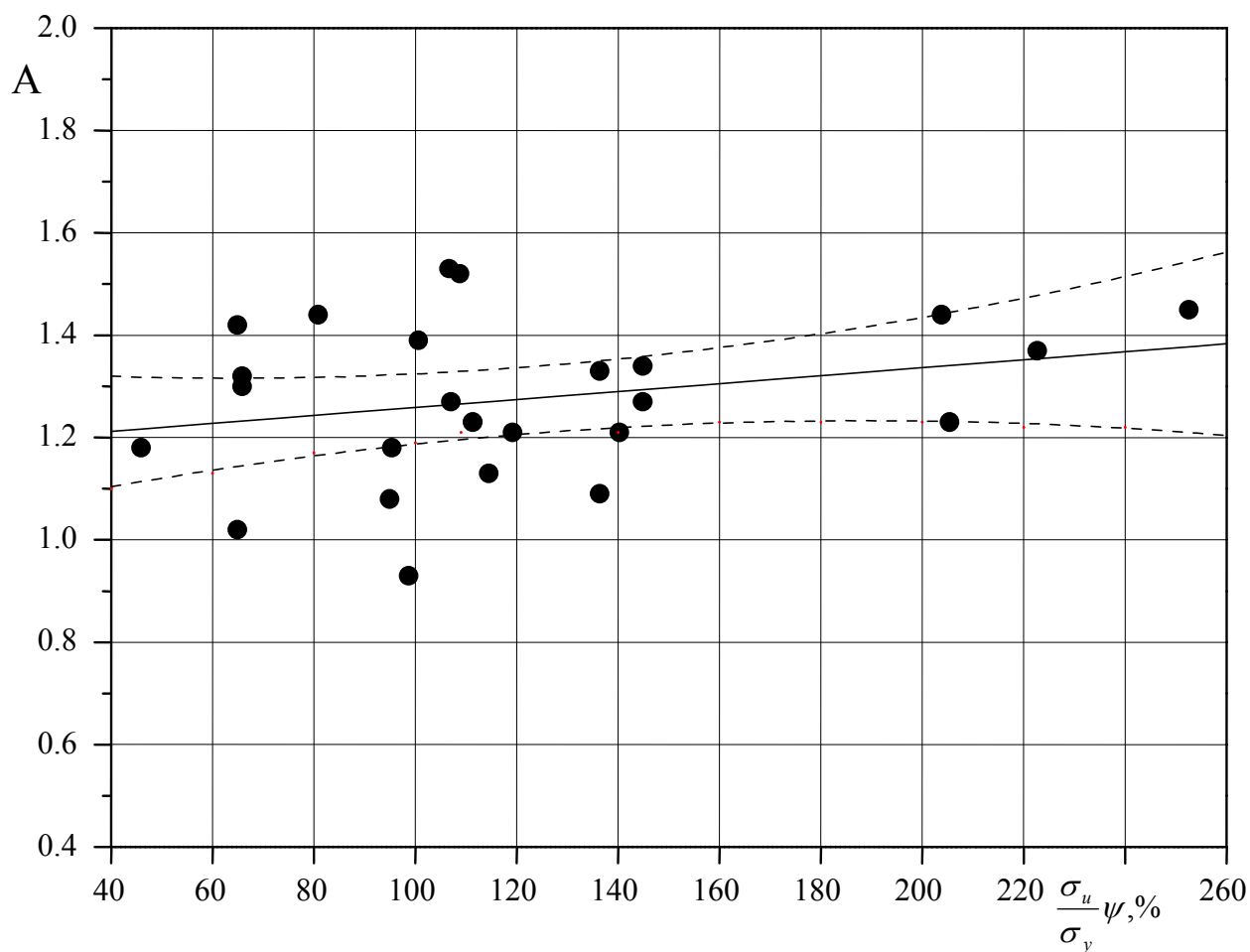
$x = \frac{\sigma_u}{\sigma_y} \psi$	0,000776 x	$Y = 1,19 +$ $+ 0,0005x$	$x - \bar{x}$	$(x - \bar{x})^2$	$\frac{(x - \bar{x})^2}{(n-1)s_x^2}$	$s_{Y/x}^2$	$s_{Y/x}$	$s_{Y/x} t_{\alpha,k}$	$Y - s_{Y/x} t_{\alpha,k}$	$Y + s_{Y/x} t_{\alpha,k}$
40	0.03	1.21	-81	6561	0.09913	0.0032	0.057	0.11	1.10	1.32
60	0.05	1.23	-61	3721	0.05622	0.0022	0.047	0.09	1.13	1.32
80	0.06	1.24	-41	1681	0.02540	0.0015	0.039	0.08	1.17	1.32
100	0.08	1.26	-21	441	0.00666	0.0011	0.033	0.06	1.19	1.32
120	0.09	1.27	-1	1	0.00002	0.0009	0.030	0.06	1.21	1.33
121	0.09	1.27	0	0	0	0.0009	0.030	0.06	1.21	1.33
160	0.12	1.30	39	1521	0.02298	0.0015	0.038	0.07	1.23	1.38
180	0.14	1.32	59	3481	0.05260	0.0021	0.046	0.09	1.23	1.41
200	0.16	1.34	79	6241	0.09430	0.0031	0.056	0.11	1.23	1.44
220	0.17	1.35	99	9801	0.14809	0.0043	0.066	0.13	1.22	1.48
240	0.19	1.37	119	14161	0.21397	0.0059	0.077	0.15	1.22	1.52
260	0.20	1.38	139	19321	0.29193	0.0077	0.088	0.17	1.21	1.55

Empirinė regresijos tiesė, esant tiesinei legiruotųjų konstrukcinių plienų ciklinių deformavimo charakteristikų A , α , \bar{s}_T priklausomybei nuo modifikuoto plastiškumo $(\sigma_u / \sigma_y)_{\psi}$ kambario ir aukštesnėje temperatūroje, ir 95% pasikliautiniosios srities ribos (punkttyrinės linijos) teorinei regresijos tiesei parodytos 2.2-2.7 paveiksluose.

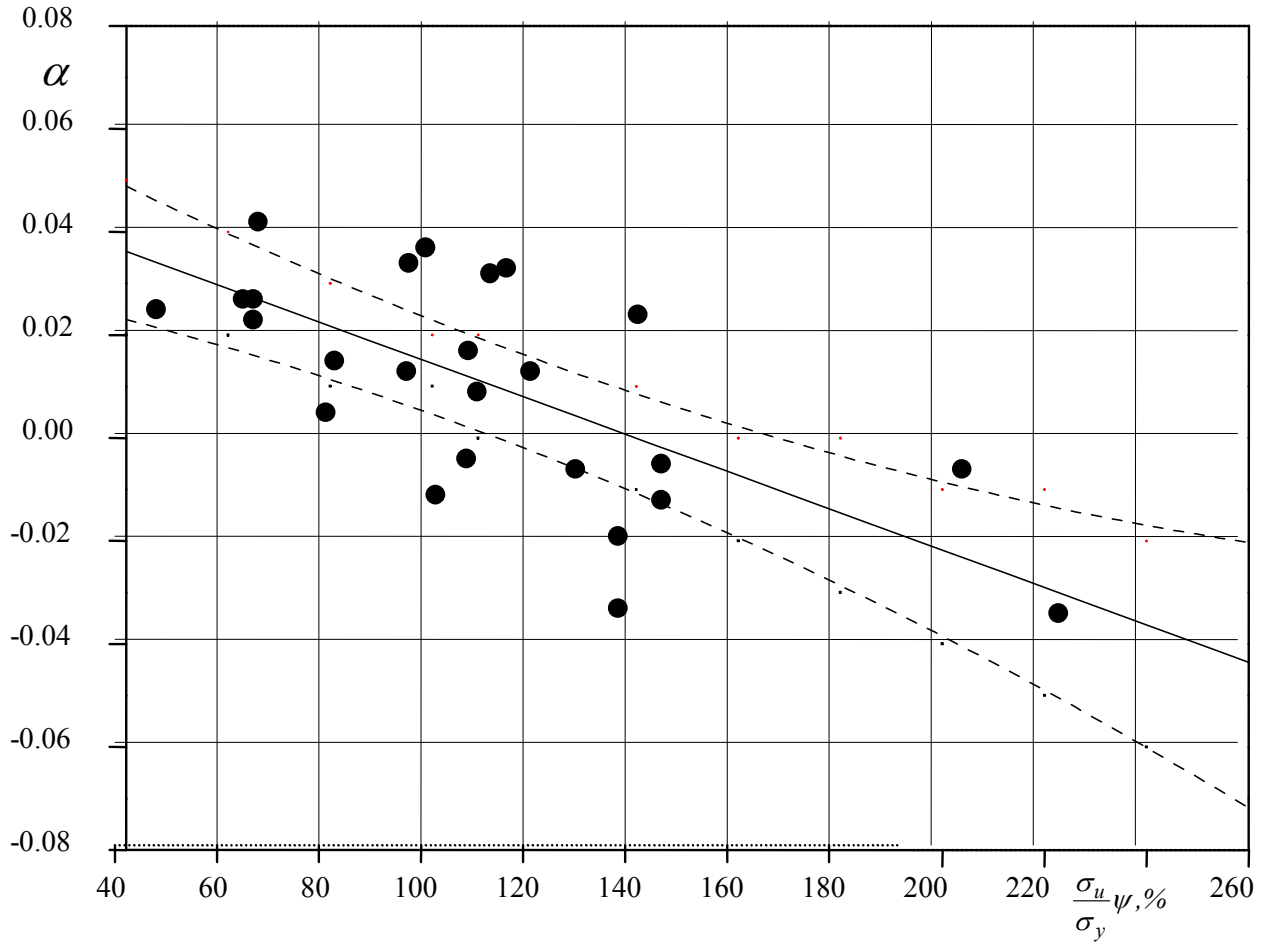
2.12 lentelė

Ciklinių deformavimo charakteristikų A , α , \bar{s}_T analitinės priklausomybės nuo modifikuoto plastiškumo $(\sigma_u / \sigma_y)_{\psi}$ korozijai ir karščiui atspariems plienams kambario ir aukštesnėje temperatūroje

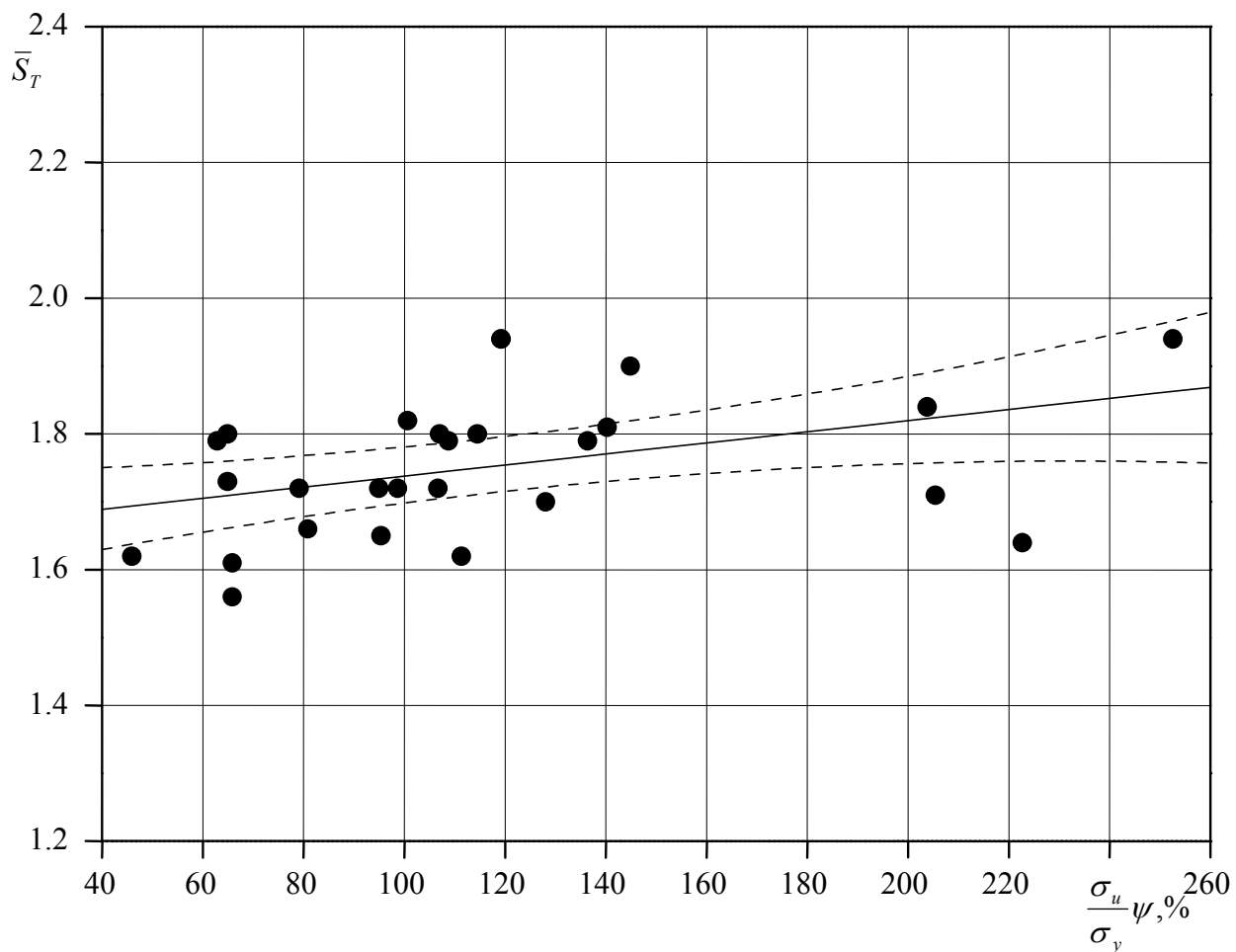
KOROZIJAI IR KARŠČIUI ATSPARŪS PLIENAI	
Kambario temperatūra	$A_1 = 1,18 - 0,0008(\sigma_u / \sigma_y)_{\psi}$ $\alpha = 0,051 - 0,00037(\sigma_u / \sigma_y)_{\psi}$ $\bar{s}_T = 1,66 + 0,0008(\sigma_u / \sigma_y)_{\psi}$
Aukštesnė temperatūra	$A_1 = 0,65 + 0,0056(\sigma_u / \sigma_y)_{\psi}$ $\alpha = 0,031 - 0,0003(\sigma_u / \sigma_y)_{\psi}$ $\bar{s}_T = 1,63 + 0,0014(\sigma_u / \sigma_y)_{\psi}$



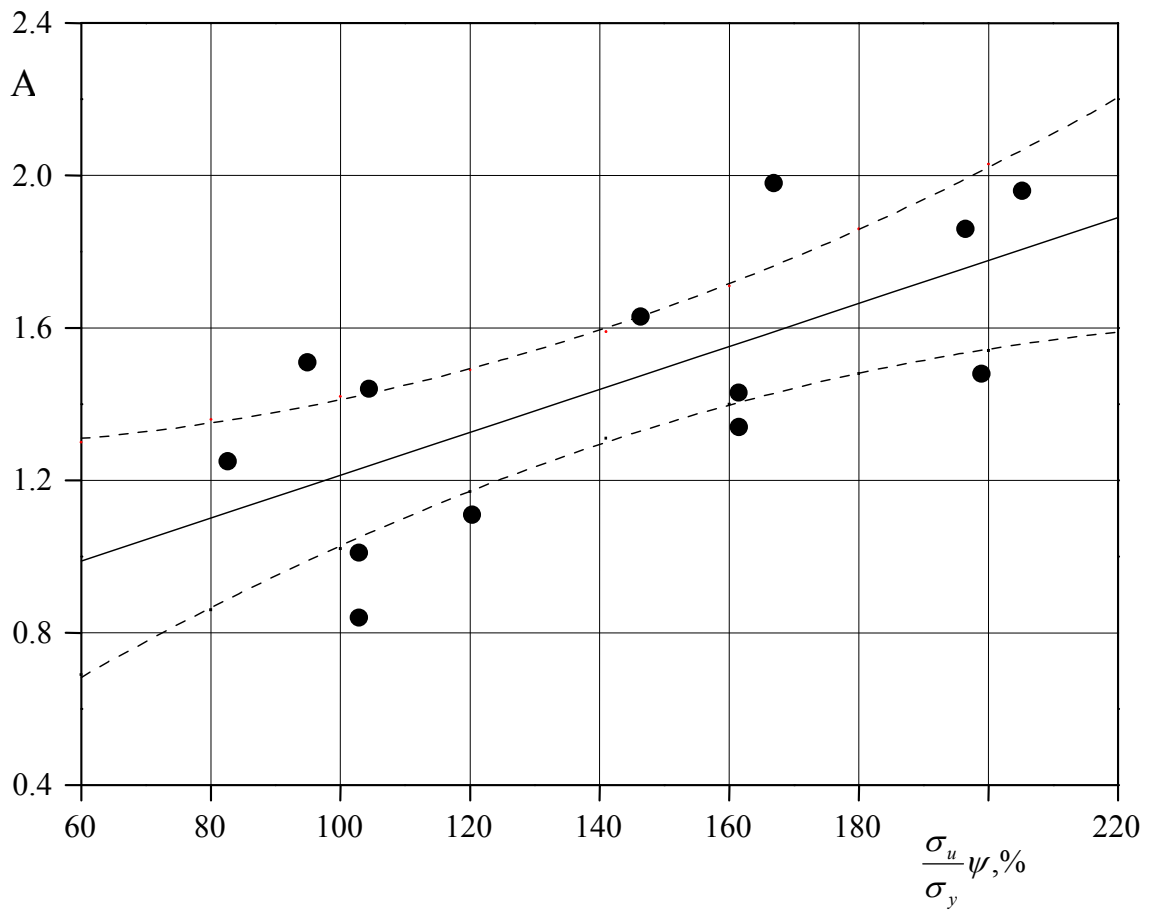
2.2 pav. Parametro A priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo $(\sigma_u / \sigma_y) \psi$ korozijai ir karščiui atspariems plienams kambario temperatūroje ir 95% pasikliautinosios srities ribos (punktūrinės linijos) teorinei regresijos tiesei



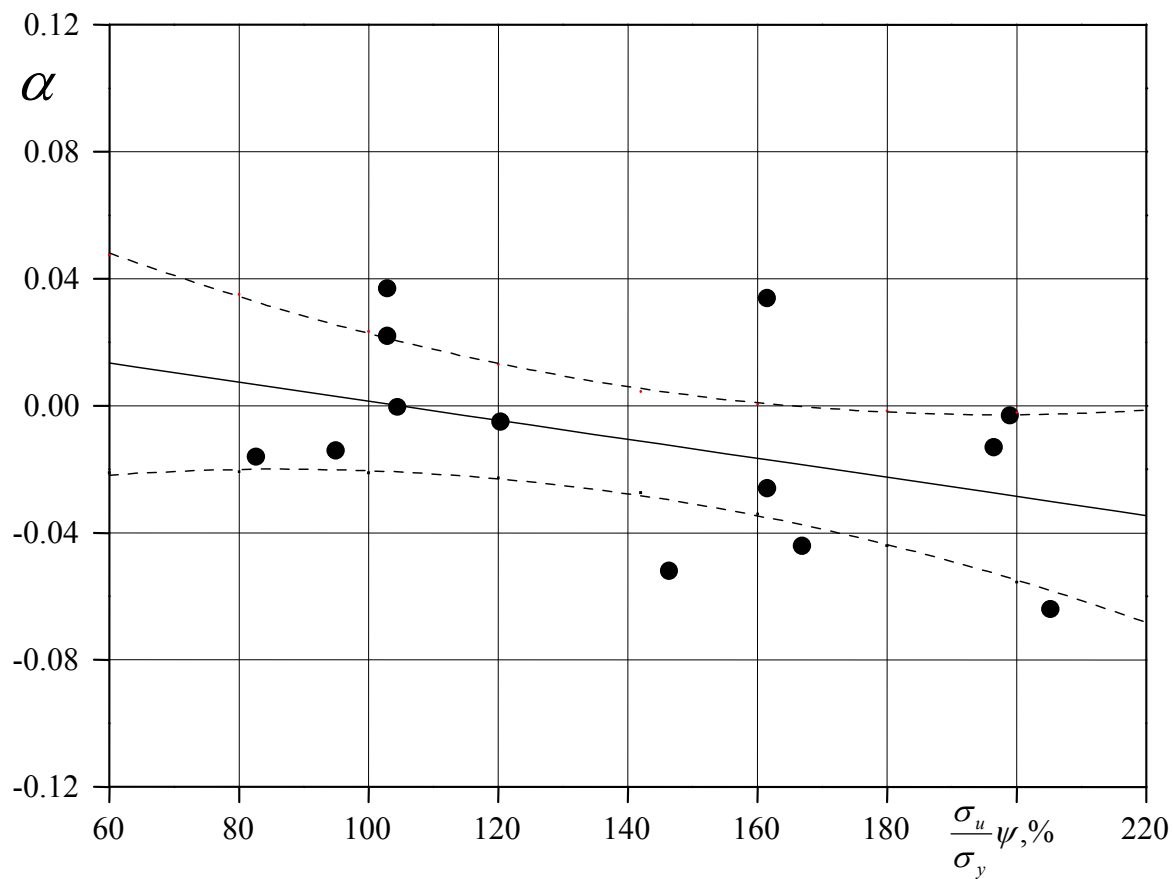
2.3 pav. Parametro α priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo $(\sigma_u / \sigma_y) \psi$ korozijai ir karščiui atspariems plienams kambario temperatūroje ir 95% pasikliautinosios srities ribos (punktyrinės linijos) teorinei regresijos tiesei



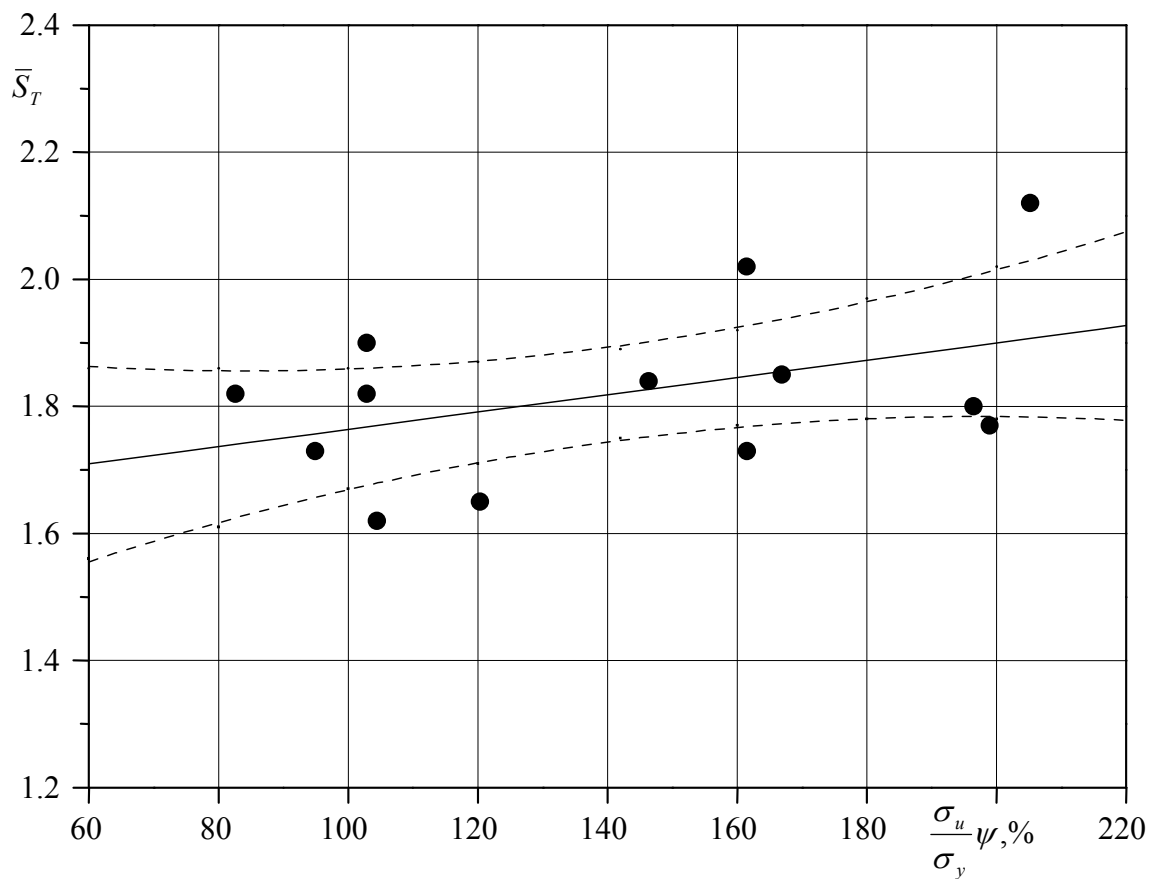
2.4 pav. Parametro \bar{s}_T priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo $(\sigma_u / \sigma_y) \psi$ korozijai ir karščiui atspariems plienams kambario temperatūroje ir 95% pasikliautinosios srities ribos (punktyrinės linijos) teorinei regresijos tiesei



2.5 pav. Parametro A priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo $(\sigma_u / \sigma_y) \psi$ korozijai ir karščiui atspariems plienams aukštesnėje temperatūroje ir 95% pasikliautinosios srities ribos (punktyrinės linijos) teorinei regresijos tiesei



2.6 pav. Parametro α priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo $(\sigma_u / \sigma_y) \psi$ korozijai ir karščiui atspariems plienams aukštesnėje temperatūroje ir 95% pasikliautiniosios srities ribos (punktyrinės linijos) teorinei regresijos tiesei

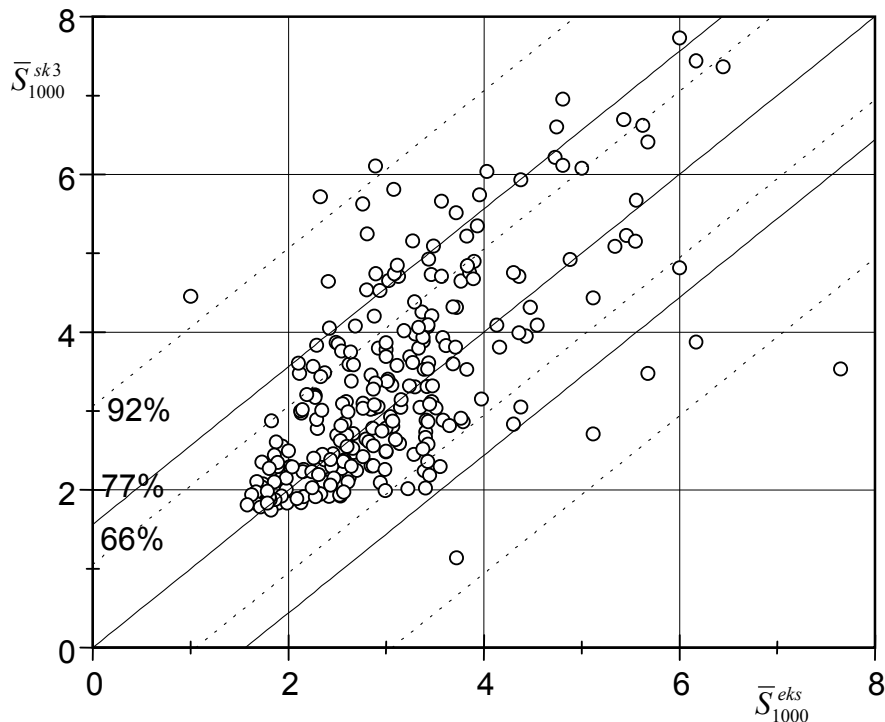


2.7 pav. Parametro \bar{S}_T priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo $(\sigma_u / \sigma_y) \psi$ korozijai ir karščiui atspariems plienams aukštesnėje temperatūroje ir 95% pasikliautiniosios srities ribos (punktutinės linijos) teorinei regresijos tiesei

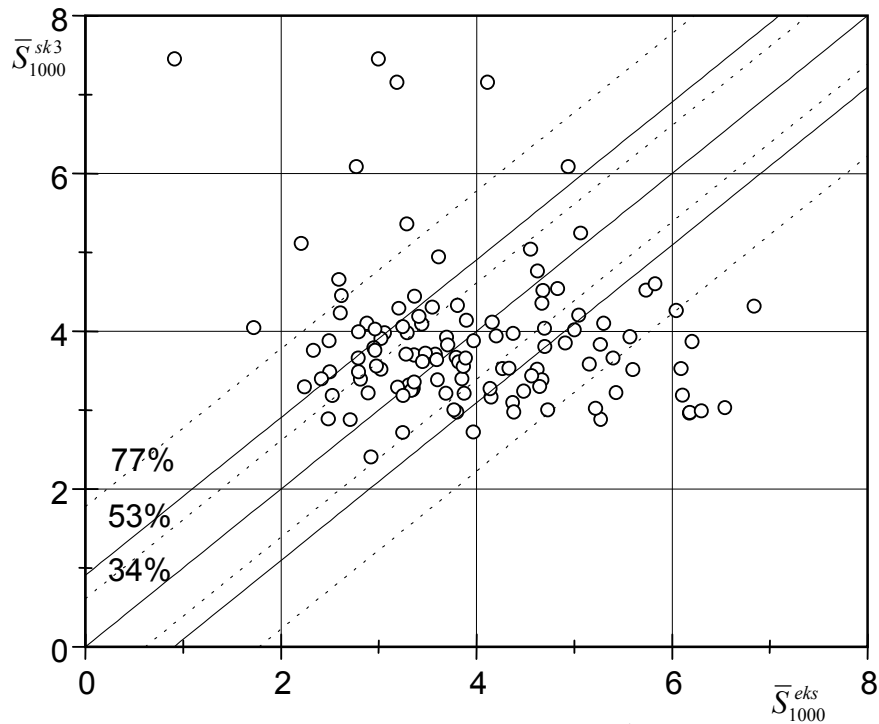
3. Eksperimentinių ir skaičiavimo rezultatų palyginimas

Ciklinio deformavimo diagramų parametrai A , α ir \bar{s}_T nustatyti pagal 1.1 lentelėje nurodytus metodus. Remiantis gautomis apibendrintosios kreivės parametru reikšmėmis ir (1.3) lygybe, visoms medžiagoms apskaičiavome ciklinius įtempimus, kai $k=1; 10; 100; 1000$ ir 2000. Eksperimentinių ir pagal (1.3) lygybę apskaičiuotų ciklinių įtempimų palyginimas parodytas 3.1 lentelėje ir 3.1-3.3 paveiksluose.

Skaičiavimo ir eksperimentiniams rezultatams palyginti buvo nustatytos ribos, kuriose tikimybė $P \approx 0,50$, kad pagal normalųjį dėsnį pasiskirstę reikšmės yra intervale $\bar{x} \pm 0,675 \cdot s$ (tikėtinas nuokrypis), intervale $\bar{x} \pm s$ $P \approx 0,68$ ir intervale $\bar{x} \pm 1,96s$ $P \approx 0,95$ (95% normaliosios kreivės ploto) [12], čia $\bar{x} = \bar{S}_k$ - vidutinė eksperimentinė ciklinių įtempimų reikšmė; s - standartinis nuokrypis.



3. 1 pav. Korozijai ir karščiui atsparių plienų eksperimentinių \bar{S}_{1000}^{eks} ir apskaičiuotų \bar{S}_{1000}^{sk1} ciklinių įtempimų palyginimas kambario temperatūroje, kai parametrai A , α ir \bar{s}_T nustatyti pagal 2.12 lentelę



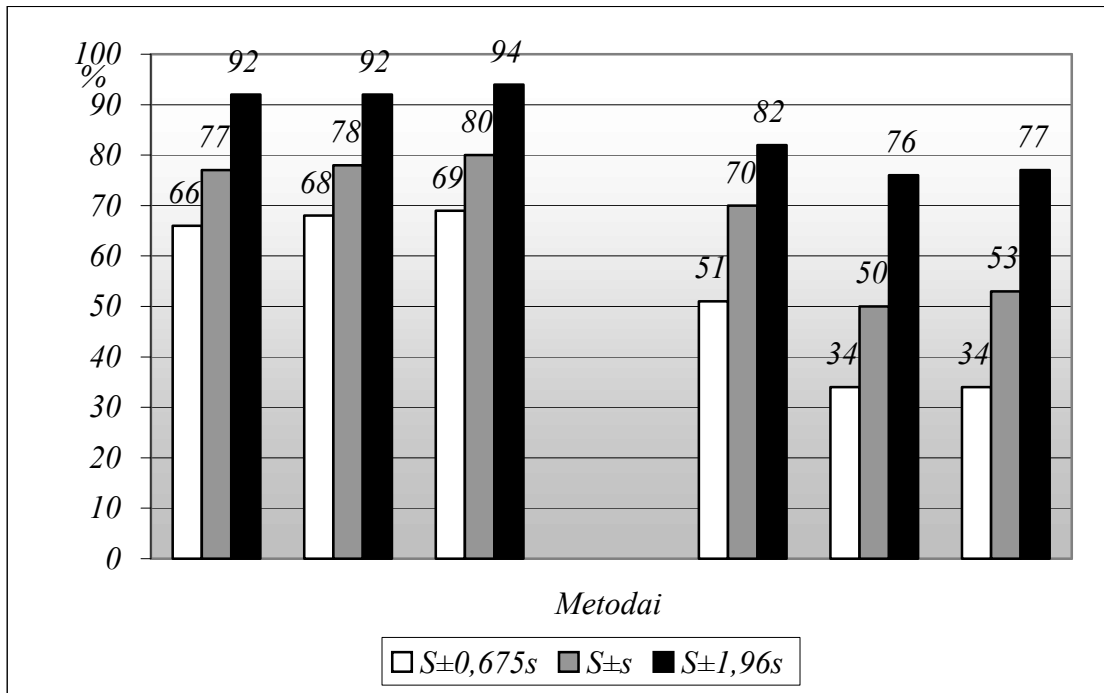
3.2 pav. Korozijai ir karščiui atsparių plienu eksperimentinių \bar{S}_{1000}^{eks} ir apskaičiuotų \bar{S}_{1000}^{sk1} ciklinių įtempimų palyginimas aukštesnėje temperatūroje, kai parametrai A , α ir \bar{s}_T nustatyti pagal 2.12 lentelę

3.1 lentelė

Korozijai ir karščiui atsparių plienu eksperimentinių ir apskaičiuotų k -ojo pusciklio ciklinių įtempimų \bar{S}_k palyginimas, kai ciklinio deformavimo parametrai A , α ir \bar{s}_T nustatyti pagal modifikuotą plastiškumą (2.12 lentelė)

Bandinių skaičius	Metodai	Bandinių skaičius, kai rezultatų sklaida tarp eksperimentinių ir apskaičiuotų ciklinių įtempimų yra intervale					
		$x \pm 0,675s$		$x \pm s$		$x \pm 1,96s$	
		vnt.	%	vnt.	%	vnt.	%
Kambario temperatūra							
\bar{S}_1							
310	1	173	56	218	70	283	91
	2	206	66	242	78	287	93
	3	202	65	236	76	286	92

\bar{S}_{10}							
310	1	194	48	198	64	274	88
	2	206	66	242	78	288	93
	3	202	65	237	76	208	92
\bar{S}_{100}							
311	1	162	52	203	65	269	86
	2	209	67	244	78	289	93
	3	204	66	238	77	288	93
\bar{S}_{2000}							
219	1	158	72	186	85	210	96
	2	145	66	170	78	205	94
	3	142	65	164	75	204	93
Aukštesnė temperatūra							
\bar{S}_1							
142	1	35	25	58	41	108	78
	2	73	51	90	63	123	87
	3	73	51	90	63	122	86
\bar{S}_{10}							
143	1	25	24	60	42	109	76
	2	65	45	88	62	123	86
	3	43	30	71	49	120	84
\bar{S}_{100}							
137	1	38	28	66	48	118	86
	2	65	47	83	61	117	85
	3	67	49	83	61	116	85
\bar{S}_{2000}							
101	1	57	56	80	79	100	99
	2	49	49	64	63	85	84
	3	48	48	63	62	86	85



3.3 Korozijai ir karščiui atsparių plienų eksperimentinių \bar{S}_{100}^{eks} ir apskaičiuotų \bar{S}_{100}^{sk1} ciklinių įtempimų palyginimas

IŠVADOS

Išanalizavus 45 korozijai ir karščiui atsparius plienus kambario ir aukštesnėje temperatūroje, galima padaryti tokias išvadas:

1. Patikslintas medžiagos stiprėjimo (silpnėjimo) intensyvumą įvertinantis parametras α kambario ir aukštesnėje temperatūroje pagal standaus apkrovimo rezultatus, atmetus $k = 10$ pusciklius (1.3 ir 1.4 lentelės).
2. Korozijai ir karščiui atsparių plienų ir jų siūlių medžiagų skirstymas pagal ciklines savybes į cikliškai silpnėjančias, stiprėjančias arba cikliškai stabilias koordinatėse $(\sigma_u / \sigma_y)_{\text{c}} //$ nepavyko, kadangi cikliškai stabilios medžiagos yra tuose pačiuose intervaluose kaip ir cikliškai nestabilios.
3. Tyrimo rezultatų statistinis tikrinimas plienams ir jų suvirinimo siūlių medžiagoms kambario ir aukštesnėje temperatūroje patvirtino, kad medžiagų ciklinio deformavimo diagramos tos pačios grupės medžiagų parametrai A , α , \bar{s}_T , taip pat modifikuotas plastiškumas $(\sigma_u / \sigma_y)_{\text{c}} //$ yra atsitiktiniai ir nepriklausomi dydžiai, pasiskirstę pagal normalųjį dėsnį.
4. Koreliacinė ir regresinė analizė parodė, kad tarp daugumos plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų ciklinių deformavimo charakteristikų A , α , \bar{s}_T ir modifikuoto plastiškumo $(\sigma_u / \sigma_y)_{\text{c}} //$ kambario ir aukštesnėje temperatūroje yra koreliacinis ryšys ir deformavimo charakteristikų regresija modifikuoto plastiškumo atžvilgiu gali būti aproksimuota tiesine regresija $y = a + bx$.
5. Ciklinio deformavimo diagramos parametrai A , α , \bar{s}_T yra artimi eksperimento rezultatams, kai jie apskaičiuoti pagal 3-ąjį metodą.
6. Eksperimentinių ir apskaičiuotų k -ojo pusciklio ciklinių įtempimų neatitikimas yra mažiausias, kai ciklinių deformavimo parametrų priklausomybės nuo modifikuoto plastiškumo apskaičiuotos pagal šiame darbe pasiūlytą 1-ąjį metodą.

LITERATŪRA

1. Прочность при малом числе циклов нагружения / Под. ред. С. В. Серенсена. Москва: Наука, 1969. 258 с.
2. Šniuolis, R. Dependence of Low Cycle Fatigue Parameters on Mechanical Characteristics of Structural Materials. Doctoral Dissertation (in Lithuanian). Kaunas, 1999.-117p.
3. Даунис М. Прочность и долговечность при малоцикловом нагружении.-Вильнюс: Мокслас, 1989.-254с.
4. Медекша Г., Шнейдерович Р.М. Обобщенная диаграмма циклического деформирования при асимметричном цикле нагружения.- Машиноведение, 1967, №3,с.55-62.
5. Медекша Г. Характеристики деформирования и разрушения при асимметричном упругопластическом нагружении. Диссертация. Каунас, 1967.
6. Гусеньков А.П., Ларионов В.В., Шнейдерович Р.М. Сопоставление кривых малоциклового усталости при испытаниях с мягким и жестким нагружением.-Заводская лаборатория, 1965, No12, с. 1494-1497.
7. Гусеньков А.П., Паршинцева Т.С., Шнейдерович Р.М., Некоторые свойства кривых повторного деформирования при симметричном цикле нагружения.-Известия АН СССР. ОТН. Механика и машиностроение, 1961, No2, с.150-152.
8. Гусеньков А.П., Шнейдерович Р.М. О свойствах кривых циклического деформирования в диапазоне мягкого и жесткого нагружений.- Известия АН СССР. ОТН. Механика и машиностроение, 1961, No3, с.150-152.
9. How to pick up the right alloy to resist low cycle fatigue / Materials Engineering.-1969.- Vol.70, N 1. –P. 16-33.
10. Гусенков А.П., Романов А.Н. Характеристики сопротивления малоциклового деформированию и разрушению в связи с выбором материалов при конструировании.- Доклад на Всесоюзном рабочем симпозиуме по вопросам малоциклового усталости.- Каунас: КПИ, 1971.-45с.
11. Степнов М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. Москва: Машиностроение, 1985. 232 с.
12. Закс Л. Статистическое оценивание. Пер. с нем. / Под. Ред. Ю. П. Адлера, В. Г. Горского. Москва: Статистика, 1976. 598 с.

13. Kaminskienė B. Matematinės statistikos elementai. Mokymo priemonė 2 d. Vilnius: MA Fizikos ir matematikos institutas, 1976. 124 p.
14. Львовский Е. Н. С статистические методы построения эмпирических формул: Учеб. Пособие. Москва: Высшая школа, 1982. 224 с.
15. Хан Г. Шапиро С. Статистические модели в инженерных задачах. Пер. с нем. / Под. Ред. В. В. Налимова. Москва: Мир, 1969. 395 с.
16. Mišeikis F. Statistika ir ekonometrija. Vilnius: Technika, 1997. 276 p.
17. Ван дер Вардер Б. Л. Математическая статистика. Пер. с нем. / Под. Ред. Н. В. Смирнова. Москва: Изд – во иностр. лит. 1960. 434 с.
18. Grigas A. Radioelektroninės aparatūros inžinerinė sintezė ir analizė. – Kaunas: Technologija, 1992. – 214 p.

PRIEDAI