

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

Romualdas Gedvilas

KOROZIJAI IR KARŠČIUI ATSPARAUS PLIENO STANDAUS
APKROVIMO SUIRIMO KREIVIŲ PARAMETRŲ IR
ILGAAMŽIŠKUMO NUSTATYMAS

Magistro darbas

Vadovas

doc. dr. R.Šniuolis

ŠIAULIAI, 2006

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

lekt. Z.Ramonas

2006 06 12

KOROZIJAI IR KARŠČIUI ATSPARAUS PLIENO STANDAUS
APKROVIMO SUIRIMO KREIVIŲ PARAMETRŲ IR
ILGAAMŽIŠKUMO NUSTATYMAS
Mechanikos inžinerijos magistro darbas

Vadovas

doc. dr. R.Šniuolis

2006 06 12

Recenzentas

dr. S.Rimovskis

2006 06 12

Atliko

MM4 gr. stud.
R. Gedvilas

2006 06 12

ŠIAULIAI, 2006

SUMMARY

Gedvilas R. Determination of fatigue curves parameters and lifetime at low cycle straining for stainless steels: Master thesis of mechanical engineer / research advisor associate professor dr. R. Šniuolis; Šiauliai University, Technological Faculty, Mechanical Engineering Department. – Šiauliai, 2006. - 54 p.

Cycle fracture parameters of structural materials at low cycle straining are understood as lifetime or low cycle fatigue curves that are constructed in coordinates $lg \delta - lg N$ or $lg \varepsilon - lg N$ according to the number of loading cycles N . The lifetime of material at low cycle straining in elastic plastic area is expressed by Coffin's equation. Parameter of Coffin's equation C markedly differs from the experimental, therefore high errors occur in evaluating lifetime of the material. It is noticed in many works that parameter $m = 0.5$ proposed by Coffin is close to experimental. Parameter $m = 0.5$, proposed by Coffin, is determined according the low cycle fatigue curves in coordinates $lg \delta - lg N$ for structural materials.

Parameters of low cycle fatigue curves m_p, C_p for stainless steels according to Coffin were specified and parameters m_e, C_e according to elastic strain at low cycle straining at room and elevated temperature were determined. Analytic dependences of low cycle fatigue curve parameters on modified plasticity $(\sigma_u/\sigma_y)\psi$ were proposed, lifetime for stainless steels at room and elevated temperature was calculated in this work.

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

TURINYS

SUMMARY	3
ĮVADAS	5
1. PRIEMONĖS MAŽACIKLIAM APKROVIMUI IR ILGAAMŽIŠKUMUI TIRTI	7
1.1. Eksperimentinis tyrimas esant mažacikliam apkrovimui	7
1.2. Tyrimo eiga ir rezultatų apdorojimas	8
1.3. Tyrimams panaudotos medžiagos	8
2. ATSPARUMO MAŽACIKLIAM SUIRIMUI TYRIMO REZULTATAI	9
2.1. Pagrindinių mechaninių charakteristikų nustatymas	9
2.2. Ciklinių suirimo charakteristikų nustatymas	9
3. SUIRIMO KREIVĖS PARAMETRŲ PRIKLAUSOMYBĖ NUO MECHANINIŲ CHARAKTERISTIKŲ	16
3.1. Ryšys tarp suirimo parametrų ir statinių charakteristikų	16
3.2. Atsparumo mažacikliam suirimui tyrimo rezultatų statistinė analizė	16
3.2.1. Išsiskiriančių suirimo kreivės parametrų atmetimas	17
3.2.2. Preliminarus suirimo kreivių parametrų ir mechaninių charakteristikų tarpusavio priklausomybės nustatymas	19
3.2.3. Suirimo kreivės parametrų ir modifikuoto plastiškumo atsitiktinumo ir nepriklausomumo statistinis tikrinimas	20
3.2.4. Tyrimo rezultatų pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį hipotezių tikrinimas	23
3.2.5. Suirimo kreivės parametrų ir modifikuoto plastiškumo pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį tikrinimas	28
3.2.6. Suirimo parametrų ir modifikuoto plastiškumo tyrimo rezultatų koreliacinė analizė	30
3.2.7. Koreliacijos koeficiento reikšmingumo įvertinimas. Pasikliautinis intervalas teoriniam koreliacijos koeficientui	33
3.2.8. Tyrimo rezultatų regresinė analizė	36
3.2.9. Suirimo kreivės parametrų ir modifikuoto plastiškumo tiesinė regresinė analizė	38
3.3. Eksperimentinės ir skaičiuotos deformacijos palyginimas	47
4. PROGNOZUOJAMO IR EKSPERIMENTINIO ILGAAMŽIŠKUMŲ PALYGINIMAS	50
IŠVADOS	52
LITERATŪRA	53

IVADAS

Darbo aktualumas. Mašinų patikimumo, ilgaamžiškumo padidinimas ir mašinų kokybės pagerinimas negalimas detaliai neištyrus jų darbo sąlygų ir medžiagos savybių. Dažniausiai mašinų detalėse sutinkamas standus apkrovimas, t.y. konstrukcijų realios darbo sąlygos artimos apkrovimui su apribotomis deformacijomis, kurias supa tampriai deformuojama medžiaga. Tampriai plastinės deformacijos dažniausiai susidaro įtempimų koncentracijos vietose netinkamai parinkus detalės formą, suapvalinimo spindulius, esant dideliems presavimo įtempimams ir kt. Konstrukciniai, technologiniai ir eksploataciniai faktoriai turi didelę reikšmę mašinų bei konstrukcinių elementų patvarumui ir gali net keletą kartų sumažinti jų ilgaamžiškumą esant mažacikliam apkrovimui.

Mažaciklio apkrovimo sąlygomis ilgaamžiškumas aprašomas L. F. Coffin lygtimi $\delta N^m = C$. Darbuose [2-16] pažymima, kad L. Coffin pasiūlyta konstanta $m = 0,5$ artima eksperimentinėms. Konstanta C žymiai skiriasi nuo eksperimentinės, ir tai keičia medžiagos ilgaamžiškumo skaičiavimo rezultatus.

Kadangi nuo medžiagų mažaciklio nuovargio parametrų priklauso daugelio labai atsakingų konstrukcijų stiprumas ir ilgaamžiškumas, o šioms charakteristikoms nustatyti reikia atlikti sudėtingus ir brangius bandymus, magistro darbe mėginta surasti korozijai ir karščiui atsparių plienų mažaciklio nuovargio kreivių parametrų ir mechaninių savybių tarpusavio analitinius ryšius, panaudojus tik statinio bandymo rezultatus.

Tyrimo tikslas. Pagal mechanines charakteristikas apskaičiuoti (prognozuoti) korozijai ir karščiui atsparių plienų nuovargio kreivės parametrus kambario ir aukštesnėje temperatūroje.

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

- pagal standaus apkrovimo rezultatus nustatyti korozijai ir karščiui atsparių plienų suirimo kreivių parametrus m_e , C_e , m_p , C_p kambario ir aukštesnėje temperatūroje;
- nustatyti ryšį tarp korozijai ir karščiui atsparių plienų suirimo kreivės parametrų ir mechaninių charakteristikų;
- patikrinti parinkto regresinio modelio adekvatumą;
- pasiūlyti analitinės priklausomybės korozijai ir karščiui atsparių plienų suirimo kreivių parametrams nustatyti pagal mechanines savybes.

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

Korozijai ir karščiui atsparių plienų suirimo kreivių parametrus m_e , C_e , m_p , C_p kambario ir aukštesnėje temperatūroje nustatyti ir patikslinti buvo panaudotas „Microcal“ kompanijos programinis paketas „Origin 5.1“.

Magistro darbo naujumas. Apdoroti 45 energetikoje naudojami korozijai ir karščiui atsparūs plienai ir jų suirimo kreivių parametrai kambario ir aukštesnėje temperatūroje bei pasiūlytos priklausomybės suirimo parametrus įvertinti pagal pagrindines mechanines charakteristikas.

Ginami šie magistro darbo teiginiai:

1. Korozijai ir karščiui atsparių plienų suirimo kreivės parametrų priklausomybių nuo mechaninių savybių grupavimas pagal temperatūrą patikslina analitinius ryšius.
2. Mažaciklio nuovargio charakteristikoms apskaičiuoti naudojamos mechaninių savybių priklausomybė $(\sigma_u/\sigma_y)^{1/n}$, arba modifikuotas plastiškumas.
3. Matematinės statistikos metodais gautos išvados yra matematiškai patikimos, nes mažaciklio nuovargio parametrai ir modifikuotas plastiškumas yra atsitiktiniai ir nepriklausomi dydžiai, pasiskirstę pagal normalųjį dėsnį.
4. Tarp daugumos mažaciklio nuovargio parametrų ir modifikuoto plastiškumo kambario ir aukštesnėje temperatūroje yra koreliacinis ryšys, ir šie dydžiai gali būti susieti tiesine priklausomybe.
5. Pasiūlytos analitinės korozijai ir karščiui atsparių plienų suirimo kreivės parametrų priklausomybės nuo modifikuoto plastiškumo naudotinos ilgaamžiškumui preliminariai apskaičiuoti.

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

1. PRIEMONĖS MAŽACIKLIAM APKROVIMUI IR ILGAAMŽIŠKUMUI TIRTI

1.1. Eksperimentinis tyrimas esant mažacikliam apkrovimui

Apkrovimo tipo parinkimas. Apribojus jėgą ar įtempimą, turėsime minkštą apkrovimą. Apkrovimas su apribotomis deformacijomis – tai standus apkrovimas. Mašinų detalėse ir konstrukcijose dažniausiai sutinkamas standus apkrovimas, nes plastinės deformacijos zonos yra ribojamos tampriai deformuojamos medžiagos. Todėl standus apkrovimas, esant mažacikliam deformavimui, pasirinktas kaip artimiausias realioms konstrukcijų ir sujungimų darbo sąlygoms.

Ciklo tipo parinkimas. Eksperimentai KTU mažaciklio nuovargio laboratorijoje buvo atlikti esant simetriniam apkrovimo ciklui. Šis apkrovimo ciklas yra universaliausias ir tiksliausiai apibūdina medžiagos savybes, nes, esant tampriai plastiniam cikliniam deformavimui, beveik vienodai pasireiškia tempimo ir gniuždymo deformacijos. Be to, nesunku standaus simetrinio apkrovimo rezultatus pritaikyti asimetriniam apkrovimui [2].

Apkrovimo būdo parinkimas. Nustatant medžiagų mechanines charakteristikas, dauguma statinio apkrovimo rezultatų gauta atliekant tempimą gniuždymą. Esant cikliniam deformavimui, bandiniai dažniausiai tempiami ir gniuždomi, sukami bei lenkiami, tačiau tempimas gniuždymas skiriasi nuo kitų apkrovimo būdų deformacijos vienalytiškumu visame geometriškai vienalyčio bandinio ar detalės darbiname skerspjūvyje. Magistro darbe panaudoti tyrimo rezultatai gauti tempimu gniuždymu, užtikrinant vienalytį deformavimą $N_f \leq 2 \cdot 10^4$ ciklų intervale.

Bandymo įrengimai. Magistro darbe aprašomų bandymų rezultatai buvo gauti naudojant KTU suprojektuotas ir pagamintas 5 ir 10 tonų jėgas išvystančias mechanines mažaciklio deformavimo mašinas su elektroniniu mechaniniu deformavimo diagramos užrašymu [2]. Bandymo įrenginio pagrindinės dalys: apkrovimo įrenginys, įrenginys jėgų ir deformacijų matavimui bei užrašymui, valdymo sistema.

Atliekant bandymus aukštesnėje temperatūroje, bandymo įrengimas turi papildomą kaitinimo ir bandinio temperatūros automatinę reguliavimo sistemą. Ši sistema užtikrina vienodą tiriamo bandinio darbinės dalies kaitinimą ir temperatūros palaikymą. Bandiniai dažniausiai įkaitinami praleidžiant elektros srovę, naudojant indukcinį įkaitinimą ir įkaitinimą krosnelėje. Kauno technologijos universiteto mažaciklio nuovargio laboratorijoje, tiriant įtempimų bei deformacijų būvį iki plyšio atsiradimo padidintoje temperatūroje, bandiniai buvo kaitinami (200-350)°C temperatūrų intervale, praleidžiant elektros srovę. Bandinio deformuojamos dalies

temperatūrų matavimui buvo panaudotos 0,2 mm diametro chromelio kopelio termoporos. Detalus bandymo aprašymas aukštesnėje temperatūroje pateiktas darbe [2].

1.2. Tyrimo eiga ir rezultatų apdorojimas

Jėgų ir deformacijų matavimas. Jėgos minėtuose bandymo įrengimuose buvo matuojamos dinamometru, pagamintu iš plieno 40X. Apvalaus skerspjūvio bandinių vienkartinio tempimo ir ciklinių deformacijų matavimui kambario ir aukštesnėje temperatūroje buvo panaudotas skersinis deformometras, nenutrūkstamai fiksuojantis tiriamojo bandinio skersmens pokyčius. Detalus aprašymas jėgoms ir deformacijoms matuoti duotas [2] literatūroje.

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

Tyrimo rezultatų apdorojimas. Mažaciklio nuovargio kreivėms sudaryti ir suirimo parametrą nustatyti Kauno technologijos universiteto mažaciklio nuovargio laboratorijoje buvo panaudota 10-15 bandinių. Eksperimentų metu buvo užrašytos standaus mažaciklinio deformavimo diagramos ir nustatytas ciklų skaičius iki plyšio susidarymo bei bandinio suirimo. Pagal ciklų skaičių iki plyšio susidarymo N_c bei ciklų skaičių iki bandinio suirimo N_f buvo sudarytos mažaciklio nuovargio kreivės santykinėse koordinatėse $lg \bar{\epsilon}_e - lg N_f$.

1.3. Tyrimams panaudotos medžiagos

2.2-2.3 lentelėse pateiktas korozijai ir karščiui atsparaus plieno, kurio tyrimų rezultatai esant mažacikliam standžiam deformavimui kambario ir aukštesnėje temperatūroje panaudoti šiame darbe, terminis apdirbimas, mechaninės charakteristikos ir nuovargio kreivės parametrai.

2. ATSPARUMO MAŽACIKLIAM SUIRIMUI TYRIMO REZULTATAI

Šiame darbe apdoroti tyrimo rezultatai 30 korozijai ir karščiui atsparaus plieno markių kambario temperatūroje ir 15 korozijai ir karščiui atsparaus plieno markių aukštesnėje temperatūroje. Deja, kai kurios medžiagos nebuvo panaudotos suirimo charakteristikoms nustatyti dėl jų didelės rezultatų sklaidos arba nesant vienai iš pagrindinių mechaninių charakteristikų (2.2-2.3 ir 3.2 lentelės).

2.1. Pagrindinių mechaninių charakteristikų nustatymas

Pagrindinės mechaninės charakteristikos e_{pr} , σ_{pr} , σ_y , σ_u , S_k ir ψ buvo nustatytos tempimo bandymu kambario ir aukštesnėje temperatūroje. Charakteristikos e_{pr} , σ_{pr} , σ_y buvo nustatytos ir pagal nulinio pusciklio diagramas, panaudojus didelį bandinių skaičių, nes dėl nepakankamo kai kurių medžiagų bandinių skaičiaus mažaciklio nuovargio kreivėms sudaryti, tempimo bandymai nebuvo atlikti.

2.2-2.3 lentelėse pateiktos mechaninės charakteristikos σ_u , S_k ir ψ kambario ir aukštesnėje temperatūroje yra trijų tempimo bandymų vidurkiai.

2.2. Ciklinių suirimo charakteristikų nustatymas

Suirimo kreivės parametrams m_e, C_e, m_p, C_p nustatyti, esant vienalyčiam įtempimų būviui, naudojamas standus apkrovimo būdas su simetriniu arba asimetriniu ciklu. Standaus apkrovimo atveju, dėl bandinio bendros deformacijos apribojimo, įvyksta cikliškai medžiagų nuovarginis suirimas. Suirimo parametrais, esant cikliniam standžiam apkrovimui, suprantamas ilgaamžiškumas arba mažaciklio nuovargio kreivės, kurios sudaromos koordinatėse $lg \delta - lg N$ arba $lg \varepsilon - lg N$ pagal ciklų skaičių iki plyšio susidarymo N_c arba suirimo N_f .

Medžiagos ilgaamžiškumas, esant mažacikliam standžiam apkrovimui tampriai plastinėje srityje, apskaičiuojamas panaudojus L. F. Coffin lygtį [2]

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

čia δ – plastinės deformacijos amplitudė arba histerezės kilpos plotis; N – ciklų skaičius iki plyšio susidarymo arba suirimo; m ir C – konstantos pagal galutinį suirimą, kur L. Coffin pasiūlyta konstanta $m=0,5$; konstantos C reikšmė nustatoma naudojant parametrą ψ :

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

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

S. S. Manson [15], apdorojęs 29 cikliškai nestabilias medžiagas, pasiūlė priklausomybę tarp pilnutinės deformacijos (tamprioji + plastinė) ir ciklų skaičiaus iki suirimo

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

B. F. Langer darbuose [16] siūloma priklausomybė

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

Šiame magistro darbe panaudota mažaciklio nuovargio kreivės lygtis [3]

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

(2.2) ir (2.3) lygybėse ε – ciklinė tampriai plastinė deformacija; ε_{ek} – ciklinė tamprioji deformacija; σ_{-1} – simetrinio ciklo patvarumo riba; E – tamprumo modulis; σ_u – stiprumo riba; m_e, C_e, m_p, C_p - suirimo kreivių parametrai įvertinus tampriąją ir plastinę deformaciją;

$C = \frac{1}{2} \ln \frac{1}{1-\psi}$ pagal L. Coffin ir B. Langer; $C = \left(\ln \frac{1}{1-\psi} \right)^{0,6}$ – pagal S. Manson.

Skaičiuodami ilgaamžiškumą esant standžiam apkrovimui pagal (2.1) lygybę, standaus apkrovimo atveju cikliškai stiprėjančių ir silpnėjančių medžiagų įtempimai bei tampriosios ir plastinės deformacijos bandymo metu kinta. Tai sunkina skaičiavimą.

Ciklinė plastinė deformacija priklauso nuo ciklų skaičiaus (išskyrus cikliškai stabilias medžiagas, kurių plastinė deformacija yra pastovi), todėl daugelyje darbų (2.1) lygybėje siūloma imti stabilizuotą histerezės kilpos plotį esant pusei ilgaamžiškumo iki nuovargio plyšio susidarymo tame apkrovimo lygyje.

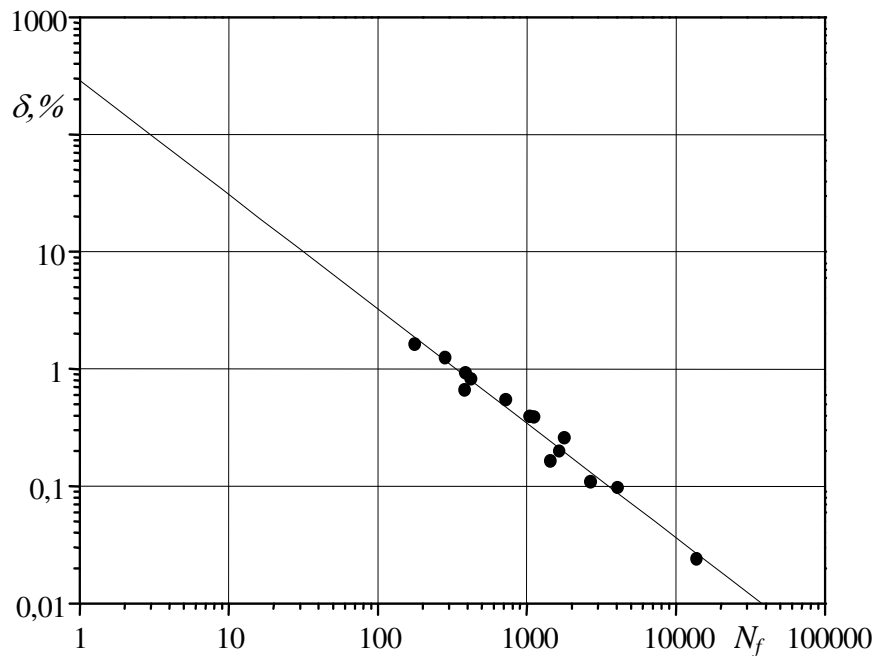
Kadangi pilnutinė deformacija ε (tamprioji + plastinė) išlieka pastovi, daug patogiau vietoje δ naudoti ε . Tuomet daugumos medžiagų ilgaamžiškumas tampriai plastinėje srityje (kai $\varepsilon \geq 3e_{pr}$) patenkinamai aprašomas lygybe

$$\varepsilon N_f^{m_p} = C_p, \quad (2.5)$$

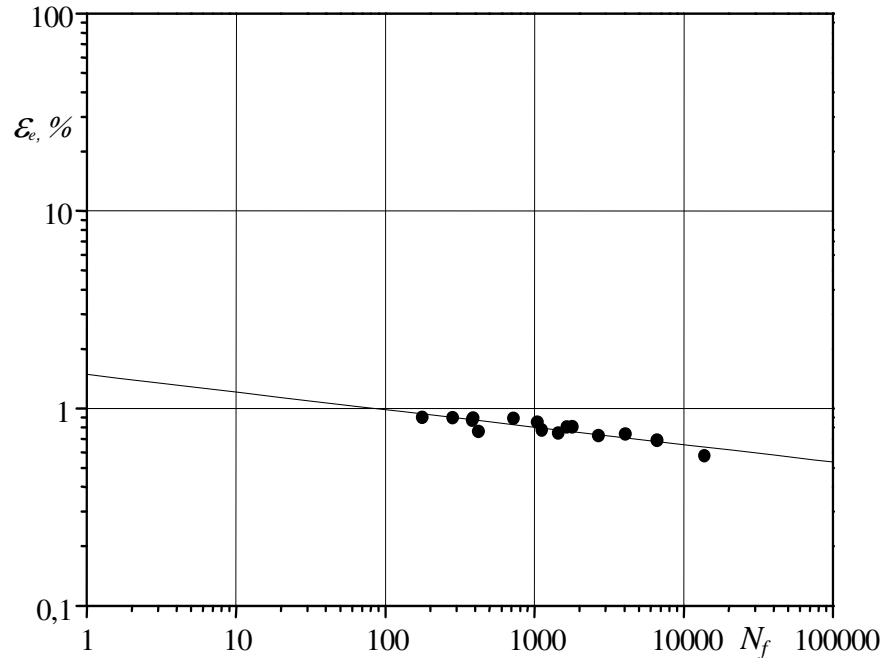
čia ε – stacionari pilnutinė ciklinė tampriai plastinė deformacija.

L. Coffin ir S. Manson darbuose parodyta, kad mažaciklio nuovargio kreivės, esant standžiam mažacikliam apkrovimui prie amplitudinių deformacijų du ir daugiau kartų viršijančių deformacijos proporcingumo ribą, logaritminėse koordinatėse $\lg \varepsilon_e - \lg N_f$ arba $\lg \delta - \lg N_f$ laikomos tiesėmis.

2.1 ir 2.2 pav. parodyta mažaciklio nuovargio kreivės koordinatėse $\lg \varepsilon_e - \lg N_f$ ir $\lg \delta - \lg N_f$. Konstantų C_e ir C_p eksperimentinės reikšmės nustatomos tęsiant mažaciklio nuovargio kreives iki $N_f = 1$ ciklo.



2.1 pav. Plieno 00H14X5M3TIO plastinės deformacijos priklausomybė nuo ciklų skaičiaus iki suirimo (mažaciklio nuovargio kreivė) esant standžiam apkrovimui



2.2 pav. Plieno 00H14X5M3TЮ tampriosios deformacijos priklausomybė nuo ciklų skaičiaus iki suirimo (mažaciklio nuovargio kreivė) esant standžiam apkrovimui

Šiame darbe išnagrinėtų korozijai ir karščiui atsparaus plieno vidutinės suirimo kreivės parametrų m_e ir m_p reikšmės kambario ir aukštesnėje temperatūroje pateiktos 2.1 lentelėje.

Palyginus 2.1 lentelėje duotų korozijai ir karščiui atsparaus plieno vidutinės m_p konstantos reikšmes su teorine konstanta $m = 0,5$ pagal L. Coffin, matyti, kad jos yra didesnės už 0,5. Matomai tai atsitiko dėl apytikrio kilpos pločio nustatymo cikliškai silpnėjančioms ir stiprėjančioms medžiagoms naudojant (2.1) lygybę. Be to, rezultatų sklaida aukštesnėje temperatūroje yra didesnė.

2.1 lentelė

Suirimo kreivės parametrų m_e ir m_p reikšmės kambario ir aukštesnėje temperatūroje

Parametras	Korozijai ir karščiui atsparus plienas			
	m_e	m_p	m_e	m_p
	kambario temperatūra		aukštesnė temperatūra	
Variavimo amplitudė	0,05 – 0,22	0,33 – 1,12	0,11 – 0,34	0,37 – 0,92
Vidutinė reikšmė	0,12	0,7	0,2	0,6

2.2-2.3 lentelėse pateikti suirimo kreivės parametrai m_e, C_e ir m_p, C_p pagal tampriąją ir plastinę deformacijas kambario ir aukštesnėje temperatūroje.

Korozijai ir karščiui atsparaus plieno terminis apdirbimas, pagrindinės mechaninės charakteristikos ir suirimo parametrai kambario temperatūroje

Eil. Nr.	Korozijai ir karščiui atsparus plienas	Terminis apdirbimas	Mechaninės charakteristikos					Suirimo kreivės parametrai			
			σ_u , MPa	σ_y , MPa	S_k , MPa	ψ , %	e_{pr} , %	m_e , %	C_e , %	m_p , %	C_p , %
1	0X18H10T	Atkv	526	151	1422	72,5	0,105	-	-	-	-
2	0X18H10T (П.П.)	Atkv	449	228	1050	65,0	0,135	0,184	1,7	0,195	8,12
3	X18H22B2T2	Atkv-Atl	777	309	1177	40,0	0,186	0,07	1,15	0,692	188,02
4	00H14X5M3TЮ	S 480°C	839	609	2111	71,6	0,270	0,091	1,34	1,12	362,71
5	00H14X5M3TЮ	S 560°C	1216	788	2001	61,5	0,309	0,089	1,48	0,975	289,89
6	1X17H2	Gr-Atl	913	441	1356	55,3	0,194	0,066	1,01	0,788	181,45
7	1X17H2	Gr-Atlž	1216	546	2188	53,5	0,222	0,065	1,22	0,703	69,84
8	0X16H4Б1	Gr-Atl	918	528	1663	64,0	0,240	0,117	1,31	0,996	377,94
9	0X16H4Б1	Gr-Atlž	1067	667	1942	59,6	0,260	0,047	0,64	0,916	215,75
10	0X13H4МЛ	Atkh-Gr-Atl	829	360	1386	60,9	0,176	0,078	1,09	0,746	84,46
11	04.3 (0X17H)	Gr-Atl	675	402	-	56,7	0,146	0,066	0,57	0,797	254,09
12	08X18H10T-III	Atkv	532	110	-	55,2	0,189	0,215	3,61	0,523	95,23
13	519 (08X18H10Г3Т)	Atkv	544	104	-	38,6	0,135	0,162	2,49	0,646	80,24
14	522 (08X18H10Г3Т)	Atkv	544	101	-	38,6	0,150	0,174	1,61	0,719	8,11
15	156 (išilgai dendritų)	-	736	624	-	64,5	0,227	0,143	1,33	0,504	20,08
16	156 (skersai dendritų)	-	736	626	-	64,5	0,212	0,104	0,9	0,814	69,29
17	157 (skersai dendritų)	-	778	628	-	-	0,258	0,143	1,42	0,593	38,74
18	46 (20X13III)	-	819	642	-	59,7	0,239	0,127	1,15	0,652	229,49
19	01X16H (49)	Gr	386	230	-	76,0	0,154	0,135	1,4	0,708	134,94
20	02X16HM	Gr-Atl	525	310	-	60,0	0,178	0,078	0,87	0,586	46,89
21	80П (XH32ФТЮ)	Atkv-S	505	89	-	56,5	0,089	0,211	3,41	0,6	69,42

2.2 lentelės tęsinys

Eil. Nr.	Korozijai ir karščiui atsparus plienas	Terminis apdirbimas	Mechaninės charakteristikos					Suirimo kreivės parametrai				
			σ_u , MPa	σ_y , MPa	S_k , MPa	ψ , %	e_{pr} , %	m_e , %	C_e , %	m_p , %	C_p , %	
22	81П - " -	Atkv-S	505	89	-	56,5	0,115	0,143	1,872	0,785	222,35	
23	06X18H5Г9АБ (ЛЧ)	Gr	614	230	-	66,4	0,078	0,118	0,94	0,457	26,8	
24	06X18H5Г9АБ (ЛЧС)	Gr-S	625	308	-	72,4	0,175	-	-	-	-	
25	08X18H10Г3Т	Gr	600	170	-	-	0,102	0,132	1,17	0,326	7,03	
26	XH36TЮM3	Atkv-S	1280	588	-	27,8	0,399	0,068	1,65	0,151	15,54	
27	XH55MBЦ	Atkv	720	140	-	75,0	0,074	1,64	0,166	0,635	101,28	
28	Бр (07X16H4Б -ЭШВ)	Gr-Atl	965	520	-	48,4	0,269	0,119	1,84	0,673	161,22	
29	Ж - " -	Gr-Atl	965	520	-	48,4	0,327	-	-	-	-	
30	33 (XH55MBЦ)	Atkv	720	189	-	77,0	0,128	0,166	2,07	0,441	18	

Atkv - visiškas atkaitinimas; *Atkh* - homogenizacinis atkaitinimas; *Gr* - grūdinimas; *Atlž* - žemasis atleidimas; *Atl* - aukštasis atleidimas; *S* – sendinimas

Korozijai ir karščiui atsparaus plieno terminis apdirbimas, pagrindinės mechaninės charakteristikos ir suirimo parametrai aukštesnėje temperatūroje

Eil. Nr.	Korozijai ir karščiui atsparus plienas	$T, ^\circ\text{C}$	Terminis apdirbimas	Mechaninės charakteristikos					Suirimo kreivių parametrai			
				σ_u, MPa	σ_y, MPa	S_k, MPa	$\psi, \%$	$e_{pr}, \%$	$m_e, \%$	$C_e, \%$	$m_p, \%$	$C_p, \%$
1	X18H22B2T2	350°C	Atkv-Atl	657	220		49,0	0,193	-	-	-	-
2	0X18H10T	350°C	Atkv	394	95		69,3	0,071	0,18	0,218	0,552	95,08
3	07X16H4B (Э)	350°C	G-Atl	760	435	-	60,0	0,270	-	-	-	-
4	08X18H10T-III	350°C	Atkv	355	136	-	52,2	0,132	0,167	1,6	0,64	9,8
5	519	350°C	Atkv	336	119	-	45,0	0,106	0,216	2,35	0,916	213,07
6	522	350°C	Atkv	336	116	-	45,0	0,109	0,109	0,83	0,581	70,6
7	05X12H2M	350°C	N	417	232	-	71,6	0,140	0,302	4,02	0,849	248,27
8	06X18H5Г9АБ (33)	350°C	S	556	115	-	61,9	0,092	0,239	4,37	0,462	13,69
9	- " - (400ЧС)	350°C	S	700	158	-	65,1	0,109	0,337	5,04	0,603	48,31
10	- " - (ЧС1000)	350°C	S	488	153	-	63,2	0,085	0,132	0,62	0,457	9,71
11	- " - (ЛЧС)	350°C	S	535	157	-	61,2	0,084	0,165	1,87	0,838	207
12	08X18H10ТГ3Т	350°C	G	508	138	-	69,3	0,177	0,273	5,11	0,569	35,72
13	XH55МВЦ (20)	350°C	Atkv	545	175	-	68,9	0,112	0,194	0,95	0,368	6,99
14	- " - (59)	350°C	Atkv	550	254	-	71,3	0,142	-	-	-	-
15	- " - (5)	350°C	Atkv	565	145	-	65,0	0,094	0,143	0,68	0,421	15,29

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

3. SUIRIMO KREIVĖS PARAMETRŲ PRIKLAUSOMYBĖ NUO MECHANINIŲ CHARAKTERISTIŲ

3.1. Ryšys tarp suirimo parametrų ir statinių charakteristikų

Magistro darbe, ieškant ryšio tarp suirimo parametrų ir mechaninių charakteristikų, buvo panaudotos šios funkcijos:

$$y = f(\psi), \quad (3.1)$$

$$y = f\left(\frac{\sigma_u}{\sigma_y}\right), \quad (3.2)$$

$$y = f\left(\frac{\sigma_u}{\sigma_y} \psi\right), \quad (3.3)$$

$$y = f\left(\frac{\sigma_y}{\sigma_u}\right), \quad (3.4)$$

$$y = f\left(\frac{\sigma_y}{\sigma_u} \psi\right). \quad (3.5)$$

Kadangi S_k daugeliui medžiagų neturėjome (2.2-2.3 lentelės), skaičiavimui buvo panaudotos (3.1)-(3.5) lygybės, kadangi korozijai ir karščiui atsparaus plieno mechaninės charakteristikos σ_y , σ_u , ψ yra nurodytos literatūroje. Ieškant ryšio tarp suirimo parametrų ir mechaninių charakteristikų ir šių priklausomybių $y = f(x)$ duomenis aproksimuojančios kreivės, buvo atlikta tyrimo rezultatų statistinė analizė.

3.2. Atsparumo mažacikliam suirimui tyrimo rezultatų statistinė analizė

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

3.2.1. Išsiskiriančių suirimo kreivės parametrų atmetimas

Prieš taikant statistinius metodus, buvo patikrinta, ar tarp tyrimo duomenų nėra ryškiai išsiskiriančių. Tokia duomenų sklaida gali atsirasti dėl konstrukcinių medžiagų mechaninio nevienalytiškumo, bandymo aukštesnėje temperatūroje ir kt.

Ryškiai išsiskiriantiems duomenims atmesti buvo panaudotas N. Smirnov kriterijus [17]. Pirmiausia tyrimo rezultatai išdėstomi variacine eilute

$$x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_i \leq \dots \leq x_n. \quad (3.6)$$

Priklausomai nuo turimų duomenų skaičiaus, apskaičiuojama vidutinė reikšmė ir vidutinis kvadratinis nuokrypis. Esant nedideliam duomenų skaičiui ($n < 50$), empirinis vidurkis

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (3.7)$$

dispersijos įvertis

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right], \quad (3.8)$$

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

Esant didesniai duomenų skaičiui ($n > 50$), vidutinę reikšmę ir dispersiją paprasčiau apskaičiuoti išdėstant tyrimo rezultatus variacine eilute pagal (3.6) lygybę. Po to tyrimo rezultatai grupuojami, suskirstant nagrinėjamos charakteristikos variavimo amplitudę

$$R = x_{max} - x_{min} \quad (3.9)$$

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

Šiuo atveju empirinis vidurkis

$$\bar{x} = \frac{\sum_{j=1}^e x_j n_j}{n}, \quad (3.10)$$

dispersijos įvertis

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \left[\sum_{j=1}^e x_j^2 n_j - \frac{1}{n} \left(\sum_{j=1}^e x_j n_j \right)^2 \right], \quad (3.11)$$

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

Apskaičiuotos dydžių \bar{x} ir s^2 reikšmės pagal (3.10) ir (3.11) lygybes nėra tikslios dėl duomenų grupavimo, tačiau gaunamos paklaidos nepaisoma, kai $e \geq 7$ [17].

Vidutinis kvadratinis nuokrypis

$$s = \sqrt{s^2}. \quad (3.12)$$

Apskaičiuojama statistika

$$u_1 = \frac{\bar{x} - x_1}{s}, \quad (3.13)$$

jei abejojama dėl pirmojo variacinės eilutės nario arba

$$u_n = \frac{x_n - \bar{x}}{s}, \quad (3.14)$$

jei abejojama dėl didžiausią reikšmę turinčio variacinės eilutės nario. Gauta reikšmė lyginama su kritine reikšme u_α [17], kai reikšmingumo lygmuo α ir duomenų skaičius n .

Kai teisingos nelygybės

$$u_1 \leq u_\alpha \quad \text{arba} \quad u_n \leq u_\alpha, \quad (3.15)$$

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

$$u_1 > u_\alpha \quad \text{arba} \quad u_n > u_\alpha, \quad (3.16)$$

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 $n - 1$.

Išsiskiriančių suirimo kreivės parametrų atmetimas. Čia parodytas korozijai ir karščiui atsparaus plieno suirimo parametrų m_p kambario temperatūroje atmetimas ir nulinės hipotezės – didžiausia reikšmė y_n (arba mažiausia y_1) priklauso tai pačiai duomenų grupei ir neatmetama – tikrinimas. Duomenys skaičiavimui duoti 2.2 lentelėje.

Sudarytai variacinei eilutei (3.6) buvo nustatyta didžiausia reikšmė $y_n = 1,12$, kuri atitiko medžiagą Nr.4, duotą 2.2 lentelėje. Vidutinė reikšmė \bar{y} apskaičiuota remiantis (3.7) lygybe. Dispersija ir vidutinis kvadratinis nuokrypis s apskaičiuoti remiantis (3.8) ir (3.12) lygybėmis.

Pagal (3.14) lygybę apskaičiuota statistika u buvo lyginama su kritine reikšme u_α . Jei tenkinta (3.15) nelygybė, konstantos m_p reikšmė nebuvo skaitoma išsiskiriančia ir neatmesta. Skaičiavimo rezultatai pateikti 3.1 lentelėje. Bendras korozijai ir karščiui atsparaus plieno markių skaičius ir skaičius n po išsiskiriančių bei mažai tikėtinų reikšmių atmetimo kambario ir aukštesnėje temperatūroje pateikti 3.2 lentelėje.

Pagal grafinį vaizdą buvo atmestos ir mažai tikėtinos reikšmės, siekiant sumažinti dispersiją, gauti tikslesnę vidutinę reikšmę [18], taip pat siekiant koreliacinio ryšio tarp turimų duomenų, nors ir buvo teisingos (3.15) nelygybės. Šių mažai tikėtinų reikšmių buvo nedaug (2-6%).

3.1 lentelė

Korozijai ir karščiui atsparaus plieno išsiskiriančių suirimo parametrų m_p kambario temperatūroje atmetimo sąlygos $u_i > u_\alpha$ tikrinimas

Išsiskiriantys parametrai	y_i	$\sum_{i=1}^n y_i$	$\sum_{i=1}^n y_i^2$	\bar{y}	n	s^2	s	u_i	$u_{0,05}$	Parametro atmetimas
4	1,12	17,39	12,91	0,696	27	0,033	0,183	2,32	2,66	Neatmestas
25	0,326	17,39	12,91	0,696	27	0,033	0,183	2,02	2,66	Neatmestas
2	0,195	17,39	12,91	0,696	27	0,033	0,183	2,74	2,66	Atmestas
26	0,151	17,19	12,82	0,688	26	0,04	0,2	2,69	2,64	Atmestas

3.2.2. Preliminarus suirimo kreivės parametrų ir mechaninių charakteristikų tarpusavio priklausomybės nustatymas

Apibūdinant suirimo kreivės parametrų m_e , C_e , m_p , C_p ir mechaninių charakteristikų ψ , σ_u / σ_y , $(\sigma_u / \sigma_y)_{\psi}$, σ_y / σ_u , $(\sigma_y / \sigma_u)_{\psi}$ tarpusavio priklausomybę, buvo atsižvelgta į taškų išsidėstymą koreliaciniame lauke ir gautas grafinis vaizdas (atmetus išsiskiriančias ir mažai tikėtinas reikšmes) leido manyti, kad suirimo kreivės parametrų regresija mechaninių charakteristikų atžvilgiu yra tiesinė, $y = a + bx$, o šių parametrų priklausomybės nuo modifikuoto plastiškumo $(\sigma_u / \sigma_y)_{\psi}$ duoda mažiausią sklaidą ir geriausiai nusako tiesinio ryšio stiprumą (3.2 lentelė).

3.2 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 suirimo parametrų priklausomybei nuo mechaninių charakteristikų

Suirimo parametrai	Mechaninės charakteristikos					Medžiagos numeris	
	ψ	σ_u / σ_y	$(\sigma_u / \sigma_y)\psi$	σ_y / σ_u	$(\sigma_y / \sigma_u)\psi$	Nėra duomenų	Atmesti duomenys
KOROZIJAI IR KARŠČIUI ATSPARUS PLIENAS							
Kambario temperatūra							
						Viso 30	
m_e	$24 \frac{0,11}{0,049}$	$26 \frac{0,62}{0,037}$	$24 \frac{0,7}{0,035}$	$26 \frac{-0,43}{0,043}$	$24 \frac{-0,33}{0,047}$	ψ (17; 25) m_e, C_e (1; 24; 29) m_p, C_p (1; 24; 29)	1 (27)
m_p	$23 \frac{0,06}{0,175}$	$25 \frac{-0,38}{0,173}$	$23 \frac{-0,44}{0,158}$	$25 \frac{0,38}{0,173}$	$23 \frac{0,37}{0,163}$		2 (2; 26)
C_e	$24 \frac{-0,16}{0,75}$	$26 \frac{0,7}{0,522}$	$24 \frac{0,71}{0,532}$	$26 \frac{-0,57}{0,599}$	$24 \frac{-0,56}{0,63}$		1 (27)
C_p	$23 \frac{0,11}{132,7}$	$25 \frac{-0,39}{113,7}$	$23 \frac{-0,39}{114,8}$	$25 \frac{0,37}{114,6}$	$23 \frac{0,39}{114,7}$		2 (22; 26)
						Viso 15	
Aukštesnė temperatūra							
m_e	$11 \frac{0,31}{0,77}$	$11 \frac{0,68}{0,06}$	$11 \frac{0,6}{0,065}$	$11 \frac{-0,62}{0,064}$	$11 \frac{-0,46}{0,072}$	m_e, C_e (1; 3; 14) m_p, C_p (1; 3; 14)	1 (7)
m_p	$12 \frac{-0,34}{0,176}$	$12 \frac{-0,52}{0,162}$	$12 \frac{-0,56}{0,155}$	$12 \frac{0,54}{0,156}$	$12 \frac{0,34}{0,176}$		-
C_e	$11 \frac{0,28}{1,748}$	$11 \frac{0,62}{1,427}$	$11 \frac{0,55}{1,519}$	$11 \frac{-0,58}{1,484}$	$11 \frac{-0,46}{1,613}$		1 (7)
C_p	$11 \frac{-0,2}{94,4}$	$11 \frac{-0,61}{76,57}$	$11 \frac{-0,61}{76,47}$	$11 \frac{0,66}{72,38}$	$11 \frac{0,5}{82,27}$		1 (4)
Skliausteliuose duotas medžiagos numeris atitinka 2.2-2.3 lentelėse pateiktą medžiagos markę							

3.2.3. Suirimo kreivės parametrų ir modifikuoto plastiškumo atsitiktinumo ir nepriklausomumo statistinis tikrinimas

Konstruktinių medžiagų mechaninės ir suirimo charakteristikos yra atsitiktiniai dydžiai, kadangi priklauso nuo daugelio faktorių, kurių didžioji dalis yra atsitiktinio pobūdžio (temperatūriniai, mechaniniai poveikiai, nukrypimai nuo technologinio proceso ir kt.). Be to, eksperimentiškai nustatant medžiagų grupės parametrus, neišvengiamos atsitiktinės paklaidos. Todėl eksperimentų rezultatai visada yra atsitiktinio pobūdžio ir jų analizė atliekama statistiniais metodais. Kadangi koreliacinės ir regresinės analizės metodai yra gauti ir taikomi nepriklausomų bandymų rezultatams, todėl, prieš pradėdant statistiškai apdoroti tyrimo

rezultatus, patikrinome, ar turimi rezultatai yra stochastiškai nepriklausomi. Minėtam uždaviniui spęsti buvo panaudoti:

Serijų kriterijus, naudojant imties medianą [19]. Surašius imties x_1, x_2, \dots, x_n elementus didėjimo tvarka, gaunama variacinė eilutė pagal (3.6) lygybę.

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

$$x_{0,5} = x_m. \quad (3.17)$$

Kai $n = 2m$ yra lyginis, mediana

$$x_{0,5} = \frac{x_m + x_{m+1}}{2}. \quad (3.18)$$

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 stochastiškai 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

$$\left. \begin{aligned} \gamma_n &> \left[\frac{1}{2}(n+1 - z_\alpha \sqrt{n-1}) \right]; \\ \tau_n &< [3,3(\lg n + 1)], \end{aligned} \right\} \quad (3.19)$$

čia z_α – normaliojo pasiskirstymo kvantilis [17]. Nelygybėje (3.19) laužtiniai skliaustai reiškia, kad imama sveikoji skaičiaus, esančio skliaustuose, dalis.

Jei bent viena iš (3.19) nelygybių netenkinama, tai hipotezė apie tyrimo rezultatų nepriklausomumą atmetama.

Kylančių ir krintančių serijų kriterijus [19]. Turimai duomenų imčiai x_1, x_2, \dots, x_n buvo sudaryta pliusų ir minusų seka: i vietoje rašytas ženklas „+“, jei $x_{i+1} - x_i > 0$, ir ženklas „-“, jei $x_{i+1} - x_i < 0$. Kai du ir daugiau vienas po kito einantys imties elementai tarpusavyje lygūs, tai imamas vienas iš jų.

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

$$\left. \begin{aligned} \gamma_n &> \left[\frac{1}{3}(2n-1) - z_\alpha \sqrt{\frac{16n-29}{30}} \right]; \\ \tau_n &< \tau_k, \end{aligned} \right\} \quad (3.20)$$

čia γ_n – serijų skaičius; τ_n – didžiausias serijos ilgis;

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

Šiame skirsnyje parodytas korozijai ir karščiui atsparaus plieno suirimo kreivės parametru m_p ir C_p kambario temperatūroje atsitiktinumo ir nepriklausomumo statistinis tikrinimas, naudojant medianą bei kylančių ir krintančių serijų kriterijų. Duomenys skaičiavimui duoti 2.2 lentelėje. Skaičiavimo rezultatai pateikti 3.3 lentelėje.

Tyrimo rezultatų statistinis tikrinimas naudojant serijų kriterijus korozijai ir karščiui atsparaus plieno kambario ir aukštesnėje temperatūroje patvirtino, kad suirimo parametrai m_e , C_e , m_p , C_p ir modifikuotas plastiškumas (σ_u/σ_y) yra atsitiktiniai ir nepriklausomi dydžiai.

3.3 lentelė

Korozijai ir karščiui atsparaus plieno suirimo kreivės parametru m_p ir C_p kambario temperatūroje atsitiktinumo ir nepriklausomumo statistinis tikrinimas, naudojant medianą bei kylančių ir krintančių serijų kriterijų

Serijų kriterijus, naudojant medianą								
i	m_p	$x_i - x_{0.5}$	i	m_p	$x_i - x_{0.5}$	i	m_p	$x_i - x_{0.5}$
1	0,692	-	9	0,797	+	17	0,586	-
2	1,12	+	10	0,523	-	18	0,6	-
3	0,975	+	11	0,646	-	19	0,785	+
4	0,788	+	12	0,719	0	20	0,457	-
5	0,703	-	13	0,504	-	21	0,635	-
6	0,996	+	14	0,814	+	22	0,673	-
7	0,916	+	15	0,652	-	23	0,441	-
8	0,746	+	16	0,708	-			
$x_{0.5} = 0,719$; $\gamma = 9 > \left[\frac{1}{2}(23+1 - 1,64\sqrt{23-1}) \right] = 8$; $\tau = 4 < \left[3,3(\lg 23+1) \right] = 5$								

3.3 lentelės tęsinys

Kylančių ir krintančių serijų kriterijus								
i	C_p	$x_{i+1} - x_i$	i	C_p	$x_{i+1} - x_i$	i	C_p	$x_{i+1} - x_i$
1	8,12	+	9	84,46	+	17	134,94	-
2	188,02	+	10	254,09	-	18	46,89	+
3	362,71	-	11	95,23	-	19	69,42	-
4	289,89	-	12	80,24	-	20	26,8	+
5	181,45	-	13	8,11	+	21	101,28	+
6	69,84	+	14	20,8	+	22	161,22	-
7	377,94	-	15	69,29	+	23	18	
8	215,75	-	16	229,49	-			
$\gamma = 12 > \left[\frac{1}{3}(2 \cdot 23 - 1) - 1,64 \sqrt{(16 \cdot 23 - 29)/30} \right] = 9; \quad \tau = 3 < \tau_k = 5$								

3.2.4. Tyrimo rezultatų pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį hipotezių tikrinimas

Tiriant duomenų išsidėstymą, reikia žinoti jų pasiskirstymo dėsnius. Yra nemažai kriterijų, kuriais analitiniu būdu galima atlikti tyrimo rezultatų pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį hipotezių tikrinimą. Kadangi mūsų turimų medžiagų skaičius grupėje $n < 120$, tai [17-21] galima rasti paprastas rekomendacijas normalumo hipotezėms tikrinti:

Vidutinio absoliutinio nuokrypio (VAN) panaudojimas [18]. 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

$$VAN = \frac{\sum |x_i - \bar{x}|}{n}. \quad (3.21)$$

Kai tyrimo rezultatai artimi normaliajam dėsniui, turi būti tenkinama nelygybė

$$\left| \frac{VAN}{s} - 0,7979 \right| < \frac{0,4}{\sqrt{n}}, \quad (3.22)$$

čia s – empirinis vidutinis kvadratinis nuokrypis, apskaičiuojamas pagal (3.12) lygybę, kai empirinė dispersija

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2. \quad (3.23)$$

Apytikris normalumo kriterijus [17]. Hipotezės apie normalųjį skirstinį tikrinimui gali būti naudojami asimetrijos ir eksceso rodikliai. Tam tikslui apskaičiuojami pradiniai pasiskirstymo momentai

$$\left. \begin{aligned} h_1 = \bar{x} &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^e x_j n_j; & h_3 &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^e x_j^3 n_j; \\ h_2 &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^e x_j^2 n_j; & h_4 &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^e x_j^4 n_j. \end{aligned} \right\} \quad (3.24)$$

Apskaičiuojami centriniai momentai

$$\left. \begin{aligned} m_3 &= h_3 - 3h_2 h_1 + 2h_1^3; \\ m_4 &= h_4 - 4h_3 h_1 + 6h_2 h_1^2 - 3h_1^4. \end{aligned} \right\} \quad (3.25)$$

Apskaičiuojami asimetrijos ir eksceso rodikliai

$$\widehat{S}_k = \frac{m_3}{s^3}; \quad (3.26)$$

$$\widehat{E}_k = \frac{m_4}{s^4} - 3 \quad (3.27)$$

ir jų vidutiniai kvadratiniai nuokrypiai

$$\sigma_{S_k} = \sqrt{\frac{3(n-1)}{(n+1)(n+3)}}; \quad (3.28)$$

$$\sigma_{E_k} = \sqrt{\frac{24(n-2)(n-3)n}{(n-1)^2(n+3)(n+5)}}. \quad (3.29)$$

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

David kriterijus, naudojant varijavimo amplitudę R . Greitas duomenų pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį hipotezės tikrinimas, kai $3 < n < 1000$, gali būti atliktas pagal [18] pateiktą metodą, naudojant varijavimo amplitudę R .

Šiuo atveju apskaičiuotą santykį R/s lyginame su [18] 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 [18].

Shapiro ir Wilk suderinamumo kriterijus W [17] naudojamas hipotezės, kad tyrimo rezultatai pasiskirstę pagal normalųjį arba logaritminį normalųjį dėsnį, tikrinimui ir yra efektyvus (su didesne tikimybe atmeta neteisingą hipotezę) tikrinant normalumą, kai duomenų skaičius nedidelis ($n \leq 50$). Atliekant skaičiavimą pagal šį kriterijų, tyrimo rezultatai išdėstomi variacine eilute remiantis (3.6) lygybe.

Norint apskaičiuoti kriterijų

$$W = \frac{b^2}{S^2}, \quad (3.30)$$

nustatomi dydžiai

$$S^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{n}; \quad (3.31)$$

$$b = \sum_{i=1}^k a_{n-i+1} (x_{n-i+1} - x_i). \quad (3.32)$$

Reikšmė a_{n-i+1} ($i = 1, 2, 3, \dots, k$) parenkama iš lentelių [17]. Be to, jeigu n – lyginis skaičius, tai $k = n/2$, jeigu n nelyginis skaičius, $k = (n-1)/2$.

Jei teisinga nelygybė

$$W \geq W_\alpha, \quad (3.33)$$

tai hipotezė apie duomenų normalųjį pasiskirstymą neatmetama. Čia W_α – kritinė Shapiro ir Wilk kriterijaus reikšmė [17], esant pasirinktam reikšmingumo lygmeniui α .

Pearson (χ^2) suderinamumo kriterijus. Teorinio dėsnio atitikimą eksperimentiniam hipotezės tikrinimas pagal χ^2 suderinamumo kriterijų numato normaliojo dėsnio savybių panaudojimą [18]. Standartinio normaliojo pasiskirstymo kreivė

$$\varphi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-z^2/2} \approx 0,4 e^{-z^2/2}, \quad (3.34)$$

$z = (x-a)/\sigma$ – normuotas atsitiktinis dydis su nuline vidutine reikšme ir vienetiniu standartiniu nuokrypiu. Čia a ir σ – normaliojo pasiskirstymo parametrai (teorinė matematinė viltis,

nusakanti pasiskirstymo kreivės padėtį Ox ašies atžvilgiu ir standartinis nuokrypis – teorinė atsitiktinio dydžio x dispersija. Jis nusako kreivės formą: didėjant σ kreivė tampa lėkštesnė).

Naudojant χ^2 kriterijų, variavimo amplitudė sudalinama į intervalus e ir nustatomas stebėjimų dažnis.

Kriterijus χ^2 apskaičiuojamas pagal lygybę

$$\chi^2 = \sum (n_j - n_{pj})^2 / n_{pj}, \quad (3.35)$$

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

Hipotezė, kad stebėjimų dažnis turi normalųjį pasiskirstymą, tikrinama χ^2 kriterijų, apskaičiuotą pagal (3.35) lygybę, lyginant su kritine reikšme χ_α^2 [17], kai reikšmingumo lygmuo α ir laisvės laipsnių skaičius $k = e_1 - m - 1$. Čia e_1 – intervalų skaičius po jų sujungimo; m – įvertinamų parametru skaičius ($m = 2$, kai įvertinami du parametrai: \bar{x} ; s). Jei teisinga nelygybė

$$\chi^2 \leq \chi_\alpha^2, \quad (3.36)$$

tai rezultatų duomenys neprieštarauja normaliojo pasiskirstymo dėsniui.

Kriterijaus χ^2 privalumas yra jo universalumas. Kriterijus taikomas visų rūšių funkcijoms $F(x)$, netgi nežinant jas charakterizuojančių parametru (matematinės vilties, standartinio nuokrypio ir kt.). Kriterijaus χ^2 trūkumas – pradinės informacijos praradimas dėl būtinumo grupuoti duomenis į intervalus ir juos sujungti, kai $n_j < 5$. Todėl rekomenduojama normalumo tikrinimą pagal χ^2 kriterijų papildyti kitais kriterijais. Tai būtina atlikti esant duomenų skaičiui $n \leq 100$ [17, 18].

χ^2 kriterijus, naudojant asimetrijos ir eksceso rodiklius [17], leidžia objektyviau, nei apytikris normalumo kriterijus, nagrinėti empirinio pasiskirstymo dėsnį kaip normalųjį pasiskirstymą. Šiuo atveju abu rodikliai sujungiami į vieną statistiką

$$\chi^2 = \frac{\widehat{S}_k^2}{\sigma_{S_k}^2} + \frac{\widehat{E}_k^2}{\sigma_{E_k}^2}, \quad (3.37)$$

kuri lyginama su kritine reikšme [17], pasirinkus reikšmingumo lygmenį α ir esant laisvės laipsnių skaičiui $k = 2$.

Jei teisinga (3.36) nelygybė, tai hipotezė apie duomenų pasiskirstymą pagal normalųjį dėsnį neatmetama.

Kolmogorov ir Smirnov suderinamumo kriterijus [18]. Kai eksperimentinis pasiskirstymo dėsnis yra pasiskirstymo funkcijos pavidalo, tai, pasirinkus teorinę pasiskirstymo funkcijos išraišką, tikrinamas jos tinkamumas eksperimentiniams rezultatams aprašyti. Šis kriterijus gerai nustato nukrypimus nuo normaliojo pasiskirstymo dėsnio, esant nedideliam duomenų skaičiui, ir yra galingesnis už χ^2 kriterijų. Remiantis Kolmogorov ir Smirnov kriterijumi, nesutapimas tarp teorinio ir eksperimentinio dėsnio D siūlomas skaičiuoti taip:

$$D = \frac{\max |F_{n_j} - F_{n_{pj}}|}{n}, \quad (3.38)$$

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

Jei teisinga nelygybė

$$D \leq D_\alpha, \quad (3.39)$$

tai hipotezė apie duomenų pasiskirstymą pagal normalųjį dėsnį neatmetama.

Tikslios Kolmogorov ir Smirnov kriterijaus ribos, kai $n > 30$, nustatomos pagal H. W. Lilliefors pasiūlytas priklausomybes: $0,805/\sqrt{n}$ ($\alpha = 0,10$) ir $0,886/\sqrt{n}$ ($\alpha = 0,05$) arba pagal [18] pateiktą metodiką.

Naudojantis šiuo kriterijumi, būtina žinoti ne tik teorinio dėsnio analitinę išraišką, bet ir dėsnį charakterizuojančius parametrus. Jeigu dėsnio parametrus surandame iš tyrimo rezultatų, mažėja priimto sprendimo patikimumas. Tai Kolmogorov ir Smirnov kriterijaus trūkumas [17].

Suderinamumo kriterijus ω^2 [17] naudojamas esant duomenų skaičiui $50 \leq n \leq 200$ ir yra galingesnis už χ^2 kriterijų, tačiau jo taikymą apsunkina ilgas skaičiavimas. Skiriamos dvi statistikos:

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

$$\omega^2 = \frac{1}{12n} + \sum_{i=1}^n \left[W(x_i) - \Phi\left(\frac{x_i}{\bar{x}_i}\right) \right]^2. \quad (3.40)$$

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

$$\omega^2 \left(1 + \frac{1}{2n}\right) \leq W_\alpha^2, \quad (3.41)$$

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

T. W. Anderson ir D. A. Darling suderinamumo kriterijus, esant toms pačioms sąlygoms, apskaičiuojamas pagal lygybę

$$\omega^2 = -n - 2 \sum_{i=1}^n \{W(x_i) \ln \Phi(\bar{z}_i) + [1 - W(x_i)] \ln [1 - \Phi(\bar{z}_i)]\}; \quad (3.42)$$

$$\left(\omega^2 - \frac{0,7}{n}\right) \left(1 + \frac{3,6}{n} - \frac{8}{n^2}\right) \leq A_\alpha, \quad (3.43)$$

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

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

3.2.4 poskyryje buvo pateikti kriterijai, kuriais tikrinamas tyrimo rezultatų pasiskirstymas pagal normalųjį dėsnį. Kadangi toliau nagrinėjama suirimo kreivės parametrų m_e , C_e , m_p , C_p priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo $(\sigma_u / \sigma_y)_{\mu}$, pagal žemiau pateiktą skaičiavimo metodiką reikalaujama, kad šie atsitiktiniai dydžiai būtų pasiskirstę pagal normalųjį dėsnį. Regresinės analizės atveju šis reikalavimas reiškia, kad kiekvienai fiksuotai argumento x reikšmei priklausomas kintamasis Y būtų pasiskirstęs pagal normalųjį dėsnį.

Praktiniame darbe rekomenduojamos dvi metodikos [20]: pagal varijavimo amplitudę R ir pagal χ^2 kriterijų, kur pirmoji naudojama greitai normalumui tikrinti, o antroji – nuodugniam duomenų pasiskirstymui pagal normalųjį dėsnį tikrinti. Šiame darbe, be tikrinimo pagal varijavimo amplitudę R , atliktas suirimo kreivės parametrų ir modifikuoto plastiškumo normalumo tikrinimas panaudojus vidutinį absoliutinį nuokrypį bei Shapiro ir Wilk W kriterijų. Skaičiavimo rezultatai duoti 3.4 lentelėje.

Tyrimo rezultatų pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį hipotezės buvo tikrinamos panaudojus (3.22), (3.33) ir (3.36) nelygybes. Kritinės reikšmės nustatytos iš lentelių [17], pasirinkus $\alpha = 0,05$, o normalumas buvo patikrintas pagal santykį R/s , kai reikšmingumo lygmuo $\alpha = 0,1$. „+“ ženklas reiškia, kad duomenys yra pasiskirstę pagal normalųjį dėsnį, „-“ ženklas reiškia, kad normaliojo pasiskirstymo nėra.

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

Suirimo para- metrai	Medžiagų skaičius <i>n</i>	$(\sigma_u/\sigma_y)\psi$			m_e, C_e, m_p, C_p		
		<i>VAN</i>	<i>R/s</i>	<i>W</i>	<i>VAN</i>	<i>R/s</i>	<i>W</i>
KOROZIJAI IR KARŠČIUI ATSPARUS PLIENAS							
Kambario temperatūra							
m_e	24	+	-	+	-	+	+
C_e	24	+	+	+	+	+	+
m_p	23	+	-	+	-	+	-
C_p	23	+	+	+	-	+	+
Aukštesnė temperatūra							
m_e	11	-	+	-	-	+	+
C_e	11	-	+	-	-	+	+
m_p	12	-	+	-	+	+	-
C_p	11	-	+	-	+	+	+

Shapiro ir Wilk suderinamumo kriterijaus *W* panaudojimas normalumui tikrinti.

Šis kriterijus panaudotas korozijai ir karščiui atsparaus plieno modifikuoto plastiškumo $(\sigma_u/\sigma_y)\psi$ kambario temperatūroje normalumui tikrinti. Modifikuotas plastiškumas $(\sigma_u/\sigma_y)\psi$, išdėstytas variacine eilute pagal (3.6) lygybę, pateiktas 3.5 lentelėje. Pagal (3.31) lygybę apskaičiuotas dydis

$$S^2 = 785589 - \frac{3691^2}{23} = 193264.$$

Kai $n = 23$ ir $k = (n-1)/2 = 11$, buvo parinktos reikšmės a_{n-i+1} ($i = 1, 2, \dots, 33$) ir pagal (3.32) lygybę apskaičiuotas dydis b . Parinkti ir apskaičiuoti duomenys pateikti 3.6 lentelėje.

Pagal (3.30) lygybę apskaičiuotas kriterijus

$$W = \frac{395,1^2}{193264} = 0,808.$$

palygintas su kritine reikšme. Kai $n = 23$ ir $\alpha = 0,05$, $W_{0,05} = 0,914$ [17].

Sąlyga (3.33) netenkinama, t.y. empirinis skirstinys (3.6 lentelė) nepasiskirstęs pagal normalųjį dėsnį.

3.5 lentelė

Korozijai ir karščiui atsparaus plieno modifikuotas plastiškumas $(\sigma_u/\sigma_y)\%$ kambario temperatūroje

i	$(\sigma_u/\sigma_y)\%,\%$	i	$(\sigma_u/\sigma_y)\%,\%$	i	$(\sigma_u/\sigma_y)\%,\%$	i	$(\sigma_u/\sigma_y)\%,\%$
1	75,82	7	95,33	13	119,1	19	267,13
2	76,06	8	98,58	14	127,55	20	293,33
3	76,22	9	100,57	15	140,22	21	320,59
4	89,82	10	101,61	16	177,26	22	320,59
5	94,97	11	111,35	17	202,1	23	385,71
6	95,15	12	114,41	18	207,99	Suma	3691
							$\Sigma(\sigma_u/\sigma_y)\% = 785589$

3.6 lentelė

Korozijai ir karščiui atsparaus plieno modifikuoto plastiškumo $(\sigma_u/\sigma_y)\%$ kambario temperatūroje pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį hipotezės tikrinimas, naudojant Shapiro ir Wilk suderinamumo kriterijų

i	a_{n-i+1}	$(\sigma_u/\sigma_y)\%_{n-i+1}$	$(\sigma_u/\sigma_y)\%_i$	b
1	0,4542	75,82	385,71	140,75
2	0,3126	76,06	320,59	76,44
3	0,2563	76,22	320,59	62,63
4	0,2139	89,82	293,33	43,47
5	0,1787	94,97	267,13	30,76
6	0,1480	95,15	207,99	16,7
7	0,1201	95,33	202,1	12,82
8	0,0941	98,58	177,26	7,4
9	0,0696	100,57	140,22	2,76
10	0,0459	101,61	127,55	1,19
11	0,0228	111,35	119,1	0,18
Suma				395,1

3.2.6. Suirimo parametrų ir modifikuoto plastiškumo tyrimo rezultatų koreliacinė analizė

Pagrindinis koreliacinės analizės uždavinys – surasti teorinę regresijos kreivę, analitiškai ją aprašyti ir atlikti gautų rezultatų statistinį įvertinimą [22]. Šis uždavinys gali būti išspręstas tiesinės priklausomybės ribose tarp normaliai pasiskirsčiusių atsitiktinių dydžių. Konstrukcinių medžiagų patikimumui įvertinti eksploatacijos sąlygomis reikalingas kiekybinis ryšys tarp medžiagų mechaninių ir ciklinių charakteristikų. 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

$$r = \frac{m_{1/1}}{s_x s_y}, \quad (3.44)$$

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

$$m_{1/1} = \frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i \right). \quad (3.45)$$

Atsitiktinių dydžių X ir Y dispersijos įverčiai s_x^2 ir s_y^2 apskaičiuojami remiantis (3.8) arba (3.11) lygybėmis.

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.

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

Koreliacijos koeficientas, kaip ir kitos charakteristikos, yra atsitiktinis dydis ir gali turėti skirtingas reikšmes, esant pakartotiniams bandymams. Atliekant nepriklausomų dydžių, kuriems teorinė koreliacijos koeficiento reikšmė 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. Fisher keitinį u . Šis keitinys parodo, kad atsitiktinio dydžio pasiskirstymą

$$u = \frac{1}{2} \ln \frac{1+r}{1-r} \quad (3.46)$$

galima aproksimuoti normaliuoju dėsnio su matematine viltimi

$$M\{U\} = a_u = \frac{1}{2} \ln \frac{1+\rho}{1-\rho} + \frac{\rho}{2(n-1)} \quad (3.47)$$

ir dispersija

$$D\{U\} = \sigma_u^2 = \frac{1}{n-3}. \quad (3.48)$$

Antrasis dėmuo (3.47) lygybėje visada mažas, lyginant su vidutiniu kvadratinu nuokrypiu σ_u , ir jį galima atmesti.

Nulinės hipotezės tikrinimas $\rho=0$, esant alternatyvai $\rho \neq 0$, atliktas pagal (3.46) ir (3.48) lygybes apskaičiavus u , σ_u ir palyginus parametą u su kritiniu, esant tikimybei $P = 1 - \alpha / 2$. Jei tenkinama sąlyga

$$|u| \leq z_{1-\alpha/2} \sigma_u, \quad (3.49)$$

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 [17], pasirinkus tikimybės $P = 1 - \alpha / 2$ reikšmę; α – reikšmingumo lygmuo (klaidos tikimybė).

Koreliacijos koeficiento pasikliautiniai intervalai nustatyti panaudojus (3.46) lygybę. Nustatant pasikliautinuosius intervalus, buvo priimtas 0,9 pasikliautinosios tikimybės lygis.

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

$$u - z_{1-\alpha/2} \sigma_u < a_u < u + z_{1-\alpha/2} \sigma_u \quad (3.50)$$

arba

$$u_1 < a_u < u_2, \quad (3.51)$$

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 (3.47) lygybę pagal

$$r = \frac{e^{2u} - 1}{e^{2u} + 1} \quad (3.52)$$

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

$$r_1 < \rho < r_2. \quad (3.53)$$

3.2.7. Koreliacijos koeficiento reikšmingumo įvertinimas. Pasikliautinis intervalas teoriniam koreliacijos koeficientui

Skaičiavimo rezultatai ir koreliacijos koeficiento reikšmingumo įvertinimas korozijai ir karščiui atspariam plienui kambario ir aukštesnėje temperatūroje ir 90% pasikliautinojo intervalo ribų nustatymas koreliacijos koeficientui pateikti 3.7 ir 3.8 lentelėse.

3.7 lentelė

Skaičiavimo rezultatai koreliacijos koeficiento apskaičiavimui tarp modifikuoto plastiškumo $(\sigma_u / \sigma_y)_{\%} = x$ ir suirimo kreivės parametro $m_p = y$ korozijai ir karščiui atspariam plienui kambario temperatūroje

Medž.	x_i	y_i	x_i^2	y_i^2	$x_i y_i$	Medž.	x_i	y_i	x_i^2	y_i^2	$x_i y_i$
3	100,57	0,692	10114	0,479	69,59	15	76,06	0,504	5785	0,254	38,33
4	98,58	1,12	9718	1,125	110,4	16	75,82	0,814	5784	0,663	61,72
5	94,97	0,975	9019	0,951	92,59	18	76,22	0,652	5809	0,425	49,69
6	114,41	0,788	13090	0,621	90,16	19	127,55	0,708	16269	0,501	90,31
7	119,1	0,703	14185	0,494	83,73	20	101,61	0,586	10325	0,343	59,54
8	111,35	0,996	12399	0,992	110,9	21	320,59	0,6	102778	0,36	192,35
9	95,33	0,916	9088	0,839	87,32	22	320,59	0,785	102778	0,616	251,66
10	140,22	0,746	19662	0,557	104,6	23	177,26	0,457	31421	0,209	81,01
11	95,15	0,797	9053	0,635	75,83	27	385,71	0,635	148772	0,403	244,9
12	267,13	0,523	71358	0,274	139,7	28	89,82	0,673	8068	0,453	60,45
13	202,1	0,646	40844	0,417	130,56	30	293,33	0,441	86042	0,194	129,36
14	207,99	0,719	43260	0,517	149,5						
$n = 23; \sum_{i=1}^n x_i = 3691; \sum_{i=1}^n y_i = 16,48; \sum_{i=1}^n x_i^2 = 785589; \sum_{i=1}^n y_i^2 = 12,41; \sum_{i=1}^n x_i y_i = 2490$											

Šiame darbe parodytas koreliacijos koeficiento reikšmingumo įvertinimas tarp suirimo kreivės parametro m_p ir modifikuoto plastiškumo $(\sigma_u / \sigma_y)_{\%}$ korozijai ir karščiui atspariam plienui kambario temperatūroje ir 90% pasikliautinojo intervalo ribų koreliacijos koeficientui nustatymas, panaudojus (3.44)-(3.53) lygybes. Bandymų rezultatų reikšmės duotos 2.2 lentelėje, o jų statistinis apdorojimas pateiktas 3.7 lentelėje.

Remiantis (3.7) lygybe ir 3.7 lentelės duomenimis, apskaičiuotos vidutinės reikšmės

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{3691}{23} = 160,48.$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} = \frac{16,48}{23} = 0,717.$$

Remiantis (3.8) ir (3.12) lygybėmis, apskaičiuoti dispersijos įverčiai ir jų vidutiniai kvadratiniai nuokrypiai

$$s_x^2 = \frac{1}{23-1} \left(785589 - \frac{3691^2}{23} \right) = 8785; \quad s_x = \sqrt{8785} = 93,73.$$

$$s_y^2 = \frac{1}{23-1} \left(12,41 - \frac{16,48^2}{23} \right) = 0,028; \quad s_y = \sqrt{0,028} = 0,167.$$

Pagal (3.45) lygybę apskaičiuotas mišrus centrinis momentas

$$m_{III} = \frac{1}{23-1} \left(2490 - \frac{3691 \cdot 16,48}{23} \right) = -7,045.$$

Pagal (3.44) lygybę apskaičiuotas koreliacijos koeficientas

$$r = \frac{-0,045}{93,73 \cdot 0,167} = -0,46.$$

Tikrinant nulinę hipotezę $\rho = 0$, pagal (3.46) lygybę apskaičiuotas dydis

$$u = \frac{1}{2} \ln \frac{1-0,46}{1+0,46} = -0,497.$$

Pagal (3.48) lygybę apskaičiuotas vidutinis kvadratinis nuokrypis

$$\sigma_u = \frac{1}{\sqrt{23-3}} = 0,224.$$

Pasirinkus reikšmingumo lygmenį $\alpha = 0,05$, tikimybei $P = 1 - \alpha / 2 = 0,975$ buvo surastas kvantilis $z_{0,975} = 1,96$ [17] ir apskaičiuota $z_{0,975} \cdot \sigma_u = 1,96 \cdot 0,224 = 0,439$. Šiuo atveju (3.49) sąlyga netenkinama, kadangi $|u| = |-0,497| > z_{0,975} \cdot \sigma_u = 0,439$, t.y. nulinė hipotezė atmetama, ir tai rodo, kad tarp suirimo kreivės parametro m_p ir modifikuoto plastiškumo (σ_u / σ_y) yra koreliacinis ryšys.

Pasikliautinasis intervalas koreliacijos koeficientui su pasiklovimo tikimybe $P = 1 - \alpha = 0,9$ nustatytas radus kvantilį $z_{1-\alpha/2} = z_{0,95} = 1,64$ [17] ir pagal (3.50) lygybę apskaičiuotus intervalo ribas statistikai a_u :

$$-0,497 - 1,64 \cdot 0,224 < a_u < -0,497 + 1,64 \cdot 0,224$$

arba

$$-0,864 < a_u < -0,13.$$

3.8 lentelė

Skaičiavimo rezultatų suvestinė lentelė, tikrinant nulinę hipotezę $\rho = 0$ tarp suirimo kreivės parametrų ir modifikuoto plastiškumo 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% pasikliautinojo intervalo ribos $[r_1, r_2]$ teoriniam koreliacijos koeficientui

Suirimo parametrai	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 ATSPARUS PLIENAS											
Kambario temperatūra											
m_e	24	145,61	0,118	80,24	0,049	0,702	0,871	0,427	$\rho \neq 0$	0,469	0,839
m_p	23	160,48	0,717	93,73	0,167	-0,46	-0,497	0,439	$\rho \neq 0$	-0,695	-0,128
C_e	24	145,61	1,55	80,24	0,74	0,715	0,897	0,427	$\rho \neq 0$	0,49	0,77
C_p	23	152,12	138,9	87,1	121,52	-0,384	-0,411	0,439	$\rho = 0$	-0,65	-0,04
Aukštesnė temperatūra											
m_e	11	218,27	0,204	64,74	0,08	0,6	0,7	0,694	$\rho \neq 0$	0,113	0,778
m_p	12	210,75	0,605	67	0,178	-0,558	-0,629	-0,655	$\rho = 0$	-0,823	-0,08
C_e	11	218,27	2,33	64,74	1,726	0,551	0,619	0,694	$\rho = 0$	0,04	0,815
C_p	11	217,55	87,61	65,79	91,46	-0,608	-0,705	0,694	$\rho \neq 0$	-0,855	-0,123

Pasinaudojus (3.51) priklausomybėje priimtu žymėjimu $u_1 = -0,864$ ir $u_2 = -0,13$, pagal (3.52) lygybę nustatytos intervalo ribos koreliacijos koeficientui. Šiuo atveju $r_1 = -0,695$ ir $r_2 = -0,128$, t.y. $-0,695 < \rho < -0,128$.

Kai $|u| \leq z_{1-\alpha/2}\sigma_u$, atsitiktiniai dydžiai yra tiesiškai vienas nuo kito nepriklausomi (nekoreliuoti), t.y. priimama nulinė hipotezė $\rho = 0$. Kai $|u| > z_{1-\alpha/2}\sigma_u$ – nulinė hipotezė atmetama, t.y. tarp suirimo parametrų m_e , C_e , m_p , C_p ir modifikuoto plastiškumo (σ_u/σ_y) yra koreliacinė priklausomybė. Kuo koreliacijos koeficientas didesnis, tuo stipresnė tiesinė atsitiktinių dydžių priklausomybė.

3.2.8. Tyrimo rezultatų regresinė analizė

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

Šiuo atveju teorinės regresijos tiesės lygtis

$$M(Y/x) = a_{y/x} = MY + \rho \frac{\sigma_y}{\sigma_x} (x - MX), \quad (3.54)$$

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

Teorinės tiesės įvertis yra empirinė regresijos tiesė, kuri išreiškiamą lygybe

$$Y = \bar{y} + r \frac{s_y}{s_x} (x - \bar{x}) \quad (3.55)$$

arba

$$Y = a + bx, \quad (3.56)$$

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

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

$$s_{y/x}^2 = s_y^2 \frac{(1-r^2)(n-1)}{n-2}. \quad (3.57)$$

Individualios sklaidos apie regresijos tiesę dydis, t.y. Y nustatymo pagal (3.55) lygybę grynoji klaida

$$\delta_y = \sqrt{s_{y/x}^2}. \quad (3.58)$$

Teorinei regresijos tiesei (3.54) yra nustatomi pasikliautiniai intervalai ir pasikliautinoji sritis. Šiam tikslui pagal (3.55) ir (3.56) lygybes buvo apskaičiuotas dydis Y ir nustatyta jo dispersija

$$s_{Y/x}^2 = s_{y/x}^2 \left[\frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{(n-1)s_x^2} \right]. \quad (3.59)$$

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

$$Y - s_{Y/x} t_{\alpha,k} < a_y < Y + s_{Y/x} t_{\alpha,k}, \quad (3.60)$$

čia $t_{\alpha,k}$ – Student kriterijaus reikšmė, nustatoma pagal pasirinktą reikšmingumo lygmenį $\alpha = 0,05$ ir laisvės laipsnių skaičių $k = n - 2$ [17].

Regresijos lygties adekvatumo tikrinimas. Suradus regresijos linijos parametru įverčius a ir b , buvo patikrinta, ar gautoji lygtis pakankamai tiksliai aprašo tyrimo rezultatus, t.y. buvo patikrintas regresijos lygties $y = a + bx$ adekvatumas [19]. Tam panaudotas Fisher kriterijus

$$F = \frac{s_y^2}{\delta_y^2}, \quad (3.61)$$

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 $F_{\alpha(k_1-1, k_2-2)}$ [18], regresijos lygtis yra adekvati. Priešingu atveju manoma, kad nėra tiesinės priklausomybės tarp tikrinamų dydžių ir reikia nagrinėti sudėtingesnes priklausomybes.

Tarpinėms F_{α} reikšmėms, kai k_1 ir k_2 daugiau už 30, teisinga tokia aproksimacija [18]:

$$\left. \begin{aligned} g &= 1/k_1 - 1/k_2; \quad h = 2/(1/k_1 - 1/k_2); \\ \lg F_{0,5} &= -0,29g; \quad \lg F_{0,3} = \frac{0,4555}{\sqrt{h-0,55}} - 0,329g; \quad \lg F_{0,1} = \frac{1,1131}{\sqrt{h-0,77}} - 0,527g; \\ \lg F_{0,05} &= \frac{1,4287}{\sqrt{h-0,95}} - 0,681g; \quad \lg F_{0,01} = \frac{2,0206}{\sqrt{h-1,4}} - 1,073g. \end{aligned} \right\} \quad (3.62)$$

Tyrimo rezultatų aprašymo tikslumui nustatyti, t.y. F kriterijaus reikšmingumui nustatyti (kai $\alpha > 0,1$), panaudota aproksimacija, kurią pasiūlė E. S. Paulson [18]:

$$\bar{z} = \left\{ \left(1 + \frac{2}{9k_2} \right) F^{1/3} - \left(1 - \frac{2}{9k_1} \right) \right\} / \sqrt{\frac{2}{9k_2} F^{2/3} + \frac{2}{9k_1}}; \quad (3.63)$$

(3.63) lygybė teisinga esant laisvės laipsnių skaičiui $k > 3$. Klaidos tikimybė α nustatyta kaip plotas pagal z kriterijų [18] atitinkamai F kriterijaus reikšmei.

3.2.9. Suirimo kreivės parametrų ir modifikuoto plastiškumo tiesinė regresinė analizė

Šiame darbe parodyta suirimo kreivės parametrų m_e , C_e , m_p , C_p tiesinės regresijos analizė modifikuoto plastiškumo (σ_u/σ_y) atžvilgiu korozijai ir karščiui atspariam plienui kambario temperatūroje ir nustatytos 95% pasikliautiniosios srities ribos regresijos tiesei pagal (3.54)-(3.63) lygybes.

Regresijos koeficientų įvertinimas. Kadangi tyrimo rezultatai koordinatėse $x = (\sigma_u/\sigma_y)$ ir $y = (m_e, C_e, m_p, C_p)$ grupuojasi apie tiesę (3.1-3.8 pav.), preliminariam tiesiniam ryšiui nusakyti buvo panaudota (3.55) lygybė. Duomenys skaičiavimui duoti 2.2-2.3 lentelėse. Empirinės tiesinės regresijos parametrai duoti 3.8 lentelėje.

Tiesinės regresijos $y = a + bx$ adekvatumo tikrinimas. Skaičiavimo rezultatai pagal (3.61) lygybę korozijai ir karščiui atspariam plienui kambario ir aukštesnėje temperatūroje pateikti 3.9 lentelėje.

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 atspariam plienui kambario temperatūroje suirimo kreivės parametrai m_e medžiagų skaičius $n = 24$, $k_1 = 24 - 1 = 23$, $k_2 = 24 - 2 = 22$. Pasirinkus $\alpha = 0,1$, nustatytos ribos $20 < k_1 = 23 < 24$, kurios atitinka 1,76 ir 1,73 [18], esant vardikliui $k_2 = 22$. Ieškomą reikšmę pažymėjus x , sudaryta lygybė $(1,76 - x)/(1,76 - 1,73) = (1/20 - 1/23)/(1/20 - 1/24)$. Iš čia $x = F_{0,1} = 1,74$.

Adekvatumo tikrinimas parodė, kad tiesinės regresijos $y = a + bx$ patikimumas 70-85%, esant koreliaciniam ryšiui tarp minėtų parametrų. Kai koreliacinio ryšio nėra, tiesinės ciklinių charakteristikų regresijos $y = a + bx$ modifikuoto plastiškumo atžvilgiu patikimumas yra apie 50%.

3.9 lentelė

Suirimo kreivės parametrų m_e, C_e, m_p, C_p tiesinės regresijos $y = a + bx$ modifikuoto plastiškumo atžvilgiu adekvatumo tikrinimas pagal Fisher kriterijų

Suirimo parametrai	Medžiagų skaičius n	$y = a + bx$			
		F	$F_{0,3}$	$F_{0,1}$	F_{α}
KOROZIJAI IR KARŠČIUI ATSPARUS PLIENAS					
Kambario temperatūra					
m_e	24	1,85	-	1,74	$F'_{0,1}$
C_e	24	1,94	-	1,74	$F'_{0,1}$
m_p	23	1,12	-	1,76	$F'_{0,3}$
C_p	23	1,12	-	1,76	$F'_{0,3}$
Aukštesnė temperatūra					
m_e	11	1,62	-	2,42	$F'_{0,2}$
C_e	11	1,29	-	2,42	$F'_{0,3}$
m_p	12	1,33	-	2,33	$F'_{0,3}$
C_p	11	1,43	-	2,42	$F'_{0,2}$
F'_{α} – apytikslės reikšmės, atitinkančios F kriterijų.					
Adekvatumo sąlyga $F \geq F_{\alpha(k_1, k_2)}$, $k_1 = n - 1, k_2 = n - 2$					

Netiesinės regresijos parinkimas ir jos adekvatumo tikrinimas. Netiesinėmis regresijomis buvo mėginta rasti tiksliau aprašančias tyrimo rezultatus lygtis, t.y. buvo ieškota kitų, mažesnę liekamąją dispersiją $s_{y/x}^2$ turinčių lygčių. Optimalią (tiksliai aprašančią tyrimo rezultatus) regresijos lygtį surasti sunku, todėl skaičiavimams buvo panaudotos dažniausiai pasitaikančios netiesinės regresijos (parabolinė, hiperbolinė, eksponentinė ir kt.) [17-20]. Skaičiavimo rezultatai korozijai ir karščiui atspariam plienui kambario temperatūroje parodyti 3.10 lentelėje.

Grafinės analizės pagrindu pagal [18] rekomendacijas suirimo kreivės parametrus m_p, C_p buvo parinkta netiesinė regresija $y = a + b/x$, tiksliau aproksimuojanti modifikuoto plastiškumo $(\sigma_u/\sigma_y)_{\psi}$ ir minėtų suirimo parametrų tarpusavio priklausomybę (3.10 lentelė).

3.10 lentelė

Koreliacijos koeficientas r (skaitiklyje) ir liekamoji dispersija $s_{y/x}^2$ (vardiklyje), atitinkantys pasirinktą funkciją. Suirimo kreivės parametrai m_e , C_e , m_p , C_p pažymėti y , modifikuotas plastiškumas (σ_u/σ_y) pažymėtas x

Suirimo parametras	Medžiagų skaičius n	Netiesinė regresija					
		$y = a + \frac{b}{x}$	$y = \frac{a}{b+x}$	$y = \frac{ax}{b+x}$	$y = \frac{x}{a+bx}$	$y = ab^x$	$y = ax^b$
KOROZIJAI IR KARŠČIUI ATSPARUS PLIENAS							
Kambario temperatūra							
m_e	24	$\frac{-0,62}{0,00103}$	-	-	$\frac{0,692}{0,00129}$	$\frac{0,691}{0,00129}$	$\frac{0,699}{0,00126}$
C_e	24	$\frac{-0,6}{0,34101}$	-	-	$\frac{0,691}{0,30234}$	$\frac{0,719}{0,27896}$	$\frac{0,703}{0,29252}$
m_p	23	$\frac{0,406}{0,02413}$	-	-	$\frac{0,386}{0,02629}$	$\frac{0,443}{0,02484}$	$\frac{0,443}{0,02483}$
C_p	23	$\frac{0,398}{12429,61}$	-	-	$\frac{0,315}{13935,42}$	$\frac{0,424}{12687,21}$	$\frac{0,403}{12948,49}$
Suirimo parametras	Medžiagų skaičius n	Netiesinė regresija					
		$y = ae^{bx}$	$y = ae^{\frac{b}{x}}$	$y = a + b \lg x$	$y = a + bx + cx^2$	$y = a + bx + c\sqrt{x}$	
m_e	24	$\frac{0,691}{0,00129}$	$\frac{0,692}{0,00129}$	$\frac{0,683}{0,0013}$	$\frac{0,688}{0,00132}$	$\frac{0,701}{0,00128}$	
C_e	24	$\frac{0,719}{0,27896}$	$\frac{0,682}{0,30929}$	$\frac{0,665}{0,32221}$	$\frac{0,722}{0,27588}$	$\frac{0,71}{0,28737}$	
m_p	23	$\frac{0,443}{0,02484}$	$\frac{0,433}{0,02512}$	$\frac{-0,446}{0,02561}$	$\frac{-0,405}{0,02546}$	$\frac{-0,439}{0,02454}$	
C_p	23	$\frac{0,424}{12687,22}$	$\frac{0,389}{13133,75}$	$\frac{-0,412}{12896,08}$	$\frac{-0,343}{13671,09}$	$\frac{-0,39}{13144,08}$	

3.11 lentelėje patikrintas netiesinės regresijos $y = a + b/x$ adekvatumas korozijai ir karščiui atspariam plienui kambario temperatūroje parodė, kad suirimo kreivės parametru m_p ir C_p regresijos modifikuoto plastiškumo (σ_u/σ_y) atžvilgiu aproksimacija iš esmės nepagerėjo, t.y. netiesinėmis regresijomis tyrimo rezultatai buvo aprašomi panašiai kaip ir tiesinėmis regresijomis.

Tyrimo rezultatai parodė, kad koreliacijos koeficientas r ir liekamoji dispersija $s_{y/x}^2$, esant suirimo kreivės parametrų m_e , C_e , m_p , C_p priklausomybei nuo modifikuoto plastiškumo $(\sigma_u/\sigma_y)\psi$, kito nežymiai (3.2 lentelė), todėl buvo pasiūlyta tiesinė regresija $y = a + bx$. Kadangi suirimo kreivės parametrų priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo duoda mažiausią sklaidą ir geriausiai nusako tiesinio ryšio stiprumą, 3.13 lentelėje pateiktos analitinės šių parametrų tarpusavio priklausomybės. Pasiūlytos priklausomybės sugrupuotos pagal temperatūrą (kambario, aukštesnė), nes tai patikslina suirimo parametrų ir mechaninių charakteristikų analitinius ryšius.

3.11 lentelė

Suirimo kreivės parametrų m_p , C_p netiesinių regresijų modifikuoto plastiškumo atžvilgiu adekvatumo tikrinimas pagal Fisher kriterijų.

Suirimo parametras	Medžiagų skaičius n	$y = a + b/x$		
		F	$F_{0,1}$	F_α
KOROZIJAI IR KARŠČIUI ATSPARUS PLIENAS				
Kambario temperatūra				
m_p	23	1,2	1,76	$F'_{0,3}$
C_p	23	1,19	1,76	$F'_{0,3}$
F'_α – apytikslės reikšmės, atitinkančios F kriterijų				
Adekvatumo sąlyga $F \geq F_{\alpha(k_1, k_2)}$, $k_1 = n - 1, k_2 = n - 2$				

Apskaičiuotos suirimo kreivės parametrų m_e , C_e , m_p , C_p reikšmės naudojamos medžiagos ilgaamžiškumui prognozuoti pagal (2.1) lygybę.

Pasikliautiniosios srities ribos teorinei regresijos tiesei. Darbe parodytas korozijai ir karščiui atsparaus plieno tiesinės regresijos $m_p = 0,056 + 0,042(\sigma_u / \sigma_y)\psi$ kambario temperatūroje pasikliautiniosios srities ribų nustatymas su 0,95 pasikliovimo tikimybe.

Teorinei regresijos tiesei (3.54) įvertinti nustatoma pasikliautinioji sritis. Šiam tikslui pagal (3.57) lygybę įvertinta atsitiktinio dydžio Y sąlyginė dispersija

$$s_{y/x}^2 = 0,0024^2(1 - 0,7^2) \frac{24 - 1}{24 - 2} = 0,0013$$

ir pagal (3.58) lygybę apskaičiuotas individualios sklaidos apie regresijos tiesę dydis

$$\delta_y = \sqrt{s_{y/x}^2} = \sqrt{0,0013} = 0,036.$$

95% pasikliautiniosios srities ribų skaičiavimo eiliškumas regresijos tiesei pagal (3.59) ir (3.60) lygybes parodytas 3.12 lentelėje.

Empirinė regresijos tiesė korozijai ir karščiui atspariam plienui kambario ir aukštesnėje temperatūroje ir 95% pasikliautiniosios srities ribos teorinei regresijos tiesei (punktyrinės linijos) parodytos 3.1-3.8 paveiksluose.

3.12 lentelė

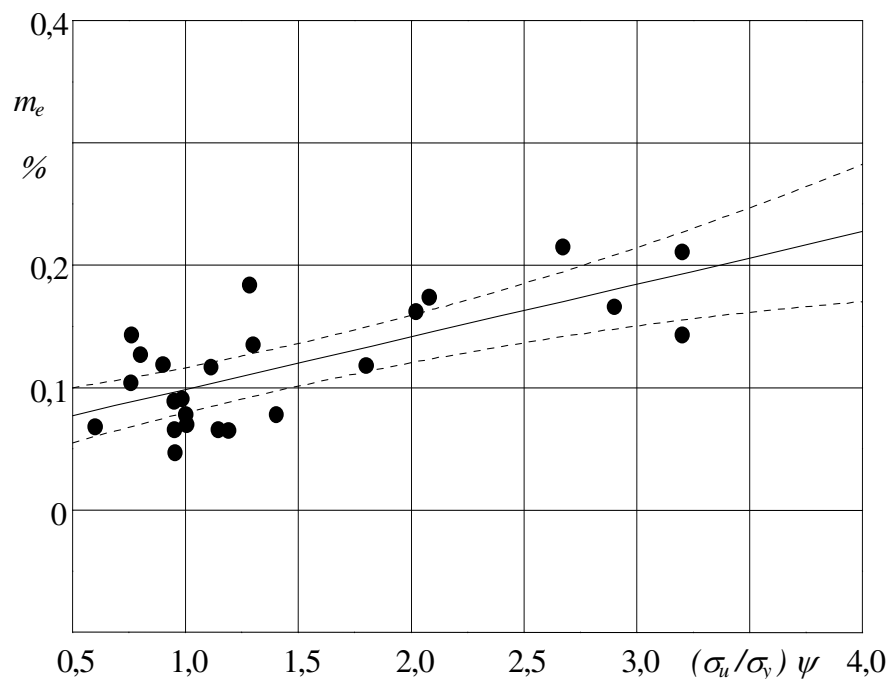
95% pasikliautiniosios srities ribų (punktyrinės linijos) skaičiavimo rezultatai tiesinei regresijai $Y = 0,056 + 0,042x$, kai $(n-1)s_x^2 = 14,72$, $t_{\alpha,k} = 2,064$, $\alpha = 0,05$ ir $k = 23$

$x = \frac{\sigma_u}{\sigma_y} \psi$	0,042x	$Y = 0,056 + 0,042x$	$x - \bar{x}$	$(x - \bar{x})^2$	$\frac{(x - \bar{x})^2}{(n-1)s_x^2}$	$s_{Y/x}^2$	$s_{Y/x}$	$s_{Y/x} t_{\alpha,k}$	$Y - s_{Y/x} t_{\alpha,k}$	$Y + s_{Y/x} t_{\alpha,k}$
0,5	0,021	0,077	-0,95	0,903	0,061	0,00013	0,011	0,023	0,054	0,1
1	0,042	0,098	-0,45	0,203	0,014	0,00007	0,009	0,019	0,079	0,117
$\bar{x} = 1,45$	0,061	0,117	0	0	0	0,00005	0,007	0,015	0,102	0,132
2	0,084	0,14	0,55	0,303	0,021	0,00008	0,009	0,019	0,121	0,159
2,5	0,105	0,161	1,05	1,103	0,075	0,00015	0,012	0,025	0,136	0,186
3	0,126	0,182	1,55	2,403	0,163	0,00027	0,016	0,033	0,149	0,215
3,5	0,147	0,203	2,05	4,203	0,286	0,00043	0,021	0,043	0,16	0,246
4	0,168	0,224	2,55	6,503	0,442	0,00063	0,025	0,052	0,172	0,276

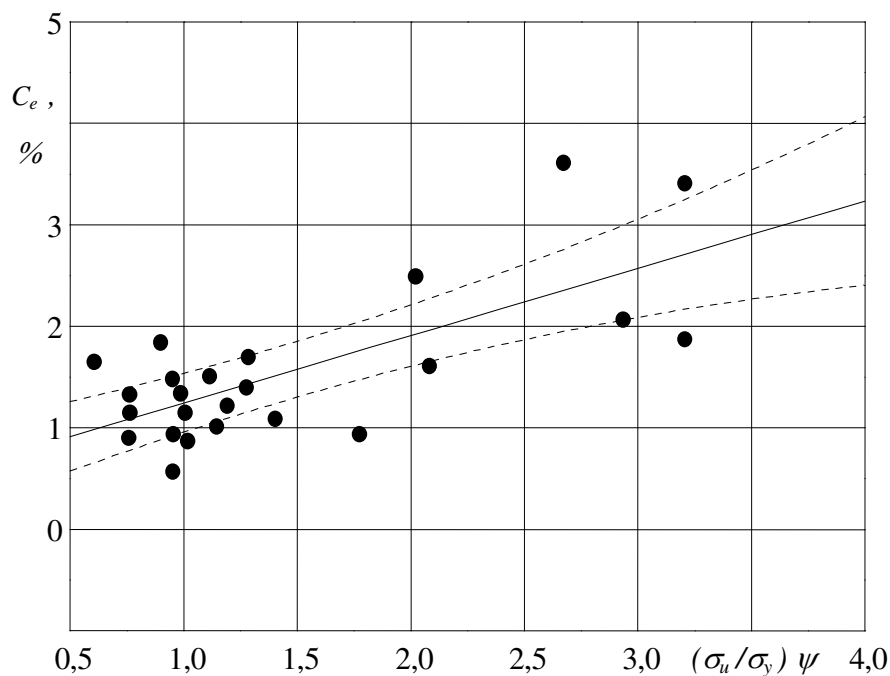
3.13 lentelė

Suirimo kreivės parametrų m_e , C_e , m_p , C_p analitinės priklausomybės nuo modifikuoto plastiškumo $(\sigma_u / \sigma_y) \psi$ korozijai ir karščiui atspariam plienui kambario ir aukštesnėje temperatūroje

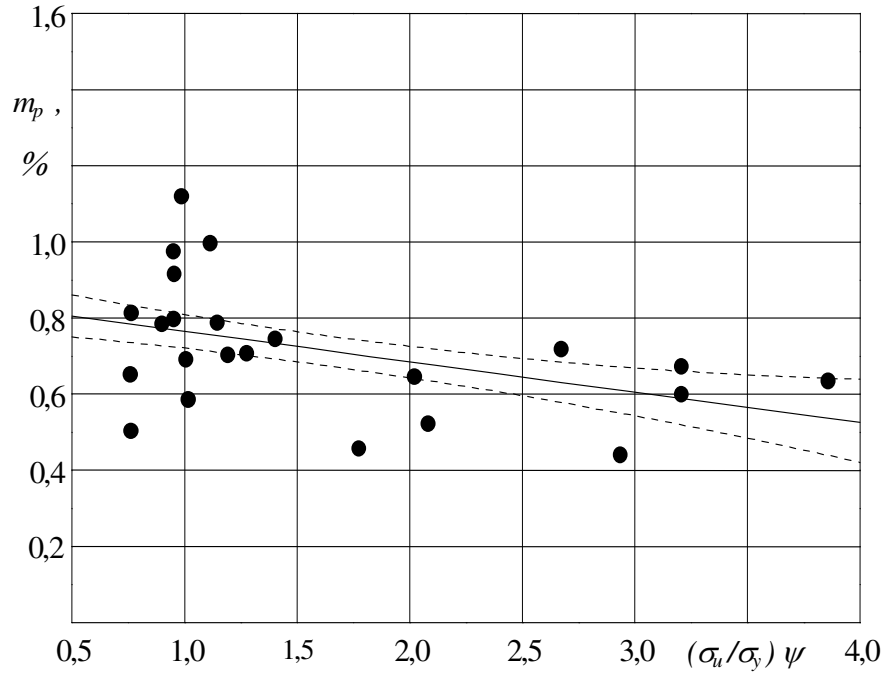
KOROZIJAI IR KARŠČIUI ATSPARUS PLIENAS	
Kambario temperatūra	Aukštesnė temperatūra
$m_e = 0,056 + 0,042(\sigma_u / \sigma_y) \psi$;	$m_e = 0,048 + 0,072(\sigma_u / \sigma_y) \psi$;
$C_e = 0,583 + 0,663(\sigma_u / \sigma_y) \psi$;	$C_e = -0,878 + 1,468(\sigma_u / \sigma_y) \psi$;
$m_p = 0,845 - 0,08(\sigma_u / \sigma_y) \psi$;	$m_p = 0,927 - 0,148(\sigma_u / \sigma_y) \psi$;
$C_p = 220,54 - 53,68(\sigma_u / \sigma_y) \psi$.	$C_p = 271,76 - 84,65(\sigma_u / \sigma_y) \psi$.



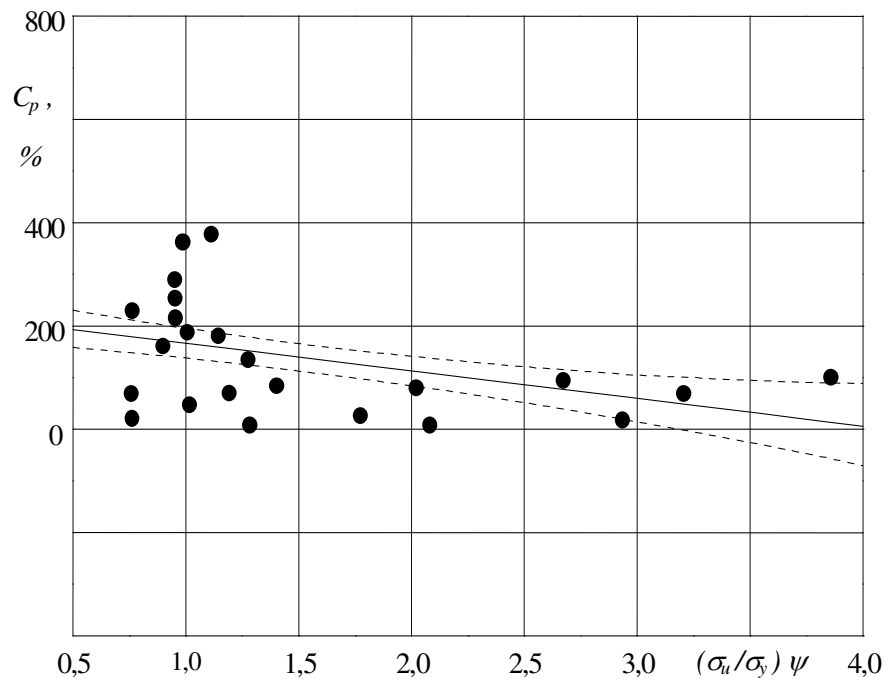
3.1 pav. Suirimo parametro m_e priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo $(\sigma_u/\sigma_y) \psi$ korozijai ir karščiui atspariam plienui kambario temperatūroje ir 95% pasikliautiniosios srities ribos (punkttyrinės linijos) teorinei regresijos tiesei



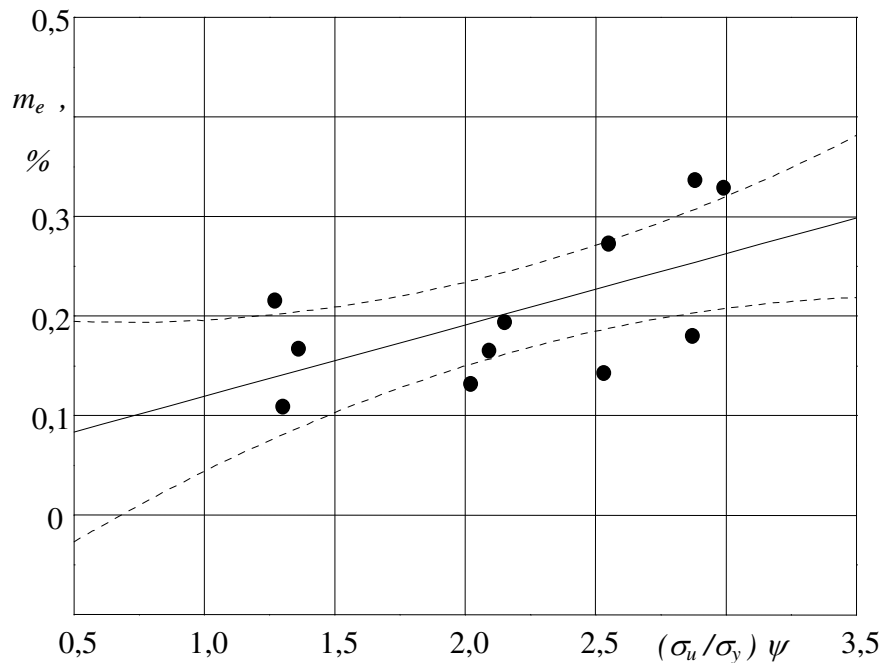
3.2 pav. Suirimo parametro C_e priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo $(\sigma_u/\sigma_y) \psi$ korozijai ir karščiui atspariam plienui kambario temperatūroje ir 95% pasikliautiniosios srities ribos (punkttyrinės linijos) teorinei regresijos tiesei



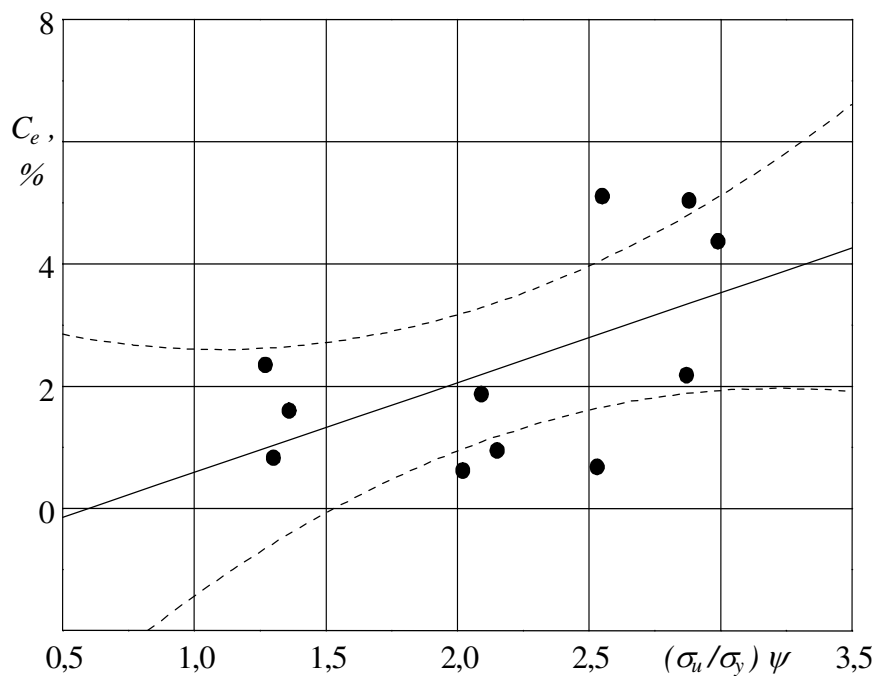
3.3 pav. Suirimo parametro m_p priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo $(\sigma_u/\sigma_y)\psi$ korozijai ir karščiui atspariam plienui kambario temperatūroje ir 95% pasikliautinosios srities ribos (punkttyrinės linijos) teorinei regresijos tiesei



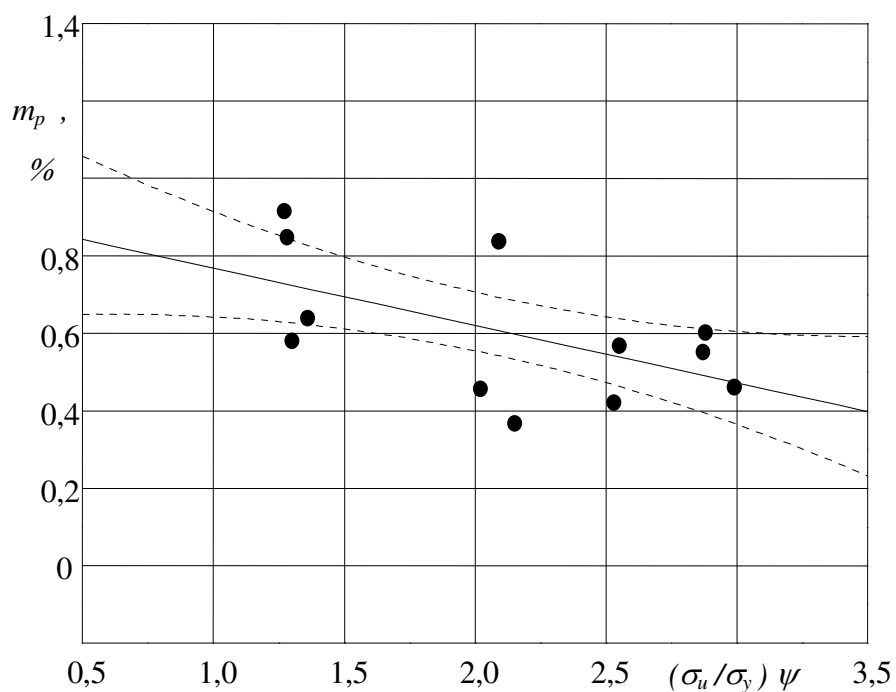
3.4 pav. Suirimo parametro C_p priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo $(\sigma_u/\sigma_y)\psi$ korozijai ir karščiui atspariam plienui kambario temperatūroje ir 95% pasikliautinosios srities ribos (punkttyrinės linijos) teorinei regresijos tiesei



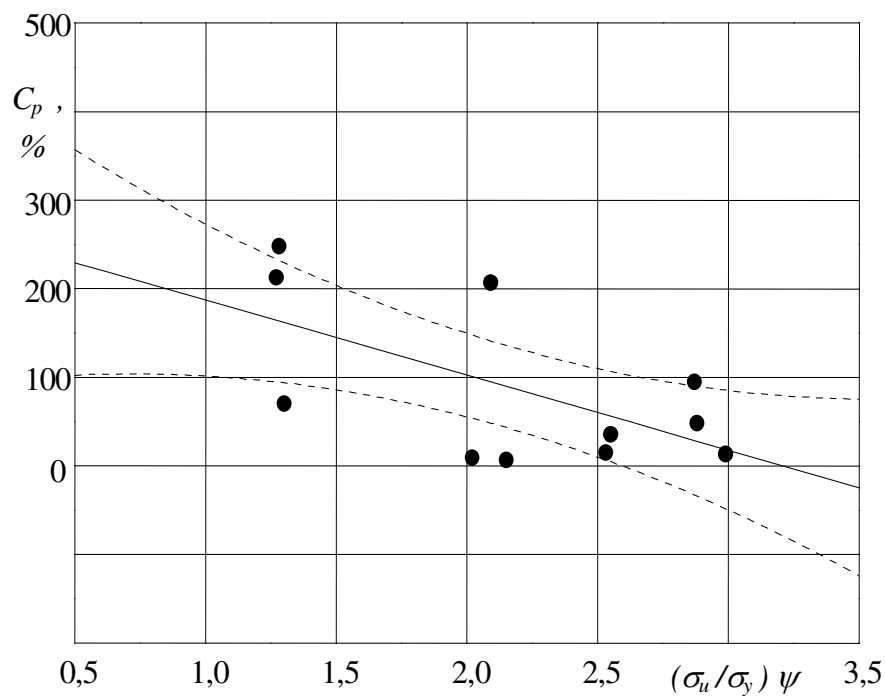
3.5 pav. Suirimo parametro m_e priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo $(\sigma_u/\sigma_y) \psi$ korozijai ir karščiui atspariam plienui aukštesnėje temperatūroje ir 95% pasikliautiniosios srities ribos (punkttyrinės linijos) teorinei regresijos tiesei



3.6 pav. Suirimo parametro C_e priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo $(\sigma_u/\sigma_y) \psi$ korozijai ir karščiui atspariam plienui aukštesnėje temperatūroje ir 95% pasikliautiniosios srities ribos (punkttyrinės linijos) teorinei regresijos tiesei



3.7 pav. Suirimo parametro m_p priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo $(\sigma_u/\sigma_y) \psi$ korozijai ir karščiui atspariam plienui aukštesnėje temperatūroje ir 95% pasikliautinosios srities ribos (punkttyrinės linijos) teorinei regresijos tiesei



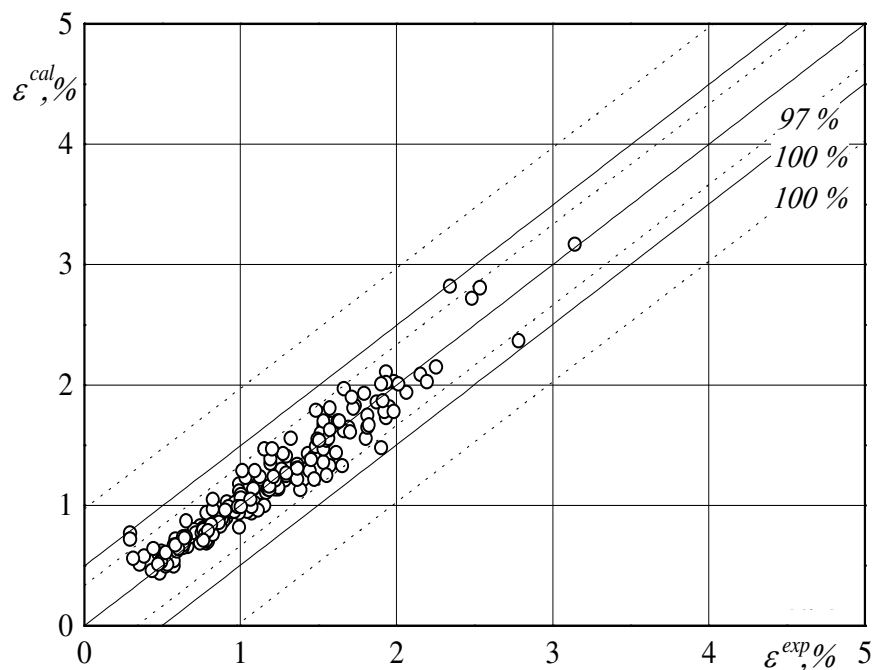
3.8 pav. Suirimo parametro C_p priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo $(\sigma_u/\sigma_y) \psi$ korozijai ir karščiui atspariam plienui aukštesnėje temperatūroje ir 95% pasikliautinosios srities ribos (punkttyrinės linijos) teorinei regresijos tiesei

3.3 Eksperimentinės ir skaičiuotos deformacijos palyginimas

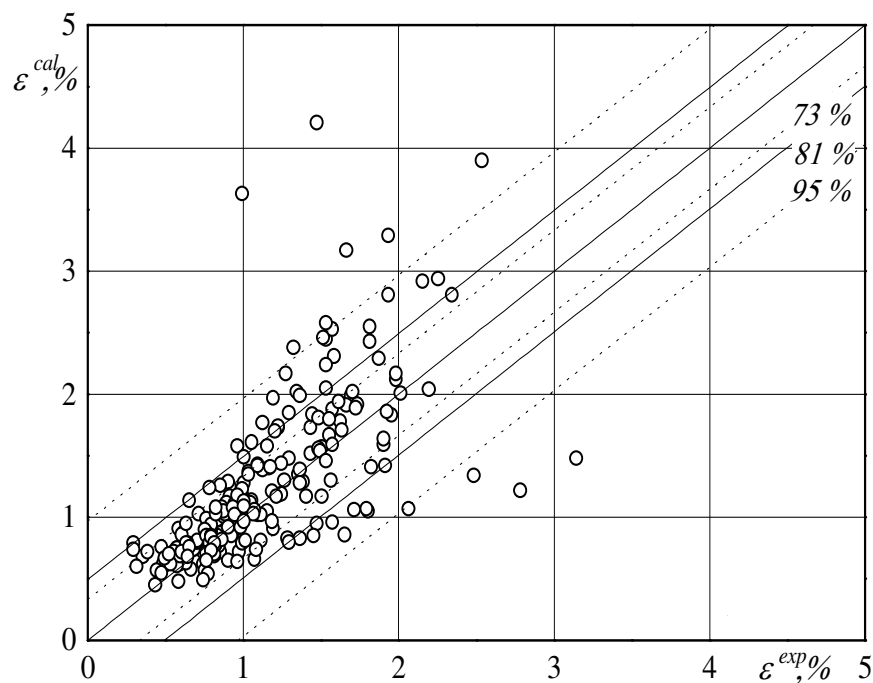
Nustačius suirimo kreivės parametrų m_e , C_e , m_p , C_p ir modifikuoto plastiškumo (σ_u/σ_y) analitines tarpusavio priklausomybes (3.13 lentelė), šiame darbe buvo apskaičiuota deformacija pagal (2.4) lygybę ir palyginta su nustatyta eksperimento metu. Palyginimas parodė, kad, naudojant 3.13 lentelėje pasiūlytas priklausomybes, skaičiuotos ciklinės tampriai platinės deformacijos skaičiavimo rezultatų sklaida gerokai didesnė už deformaciją, kuriai apskaičiuoti suirimo kreivės parametrai buvo nustatyti grafiniu būdu kiekvienai medžiagai logaritminėse koordinatėse $lg \varepsilon_e - lg N_f$ ir $lg \delta - lg N_f$.

Skaičiavimo ir eksperimentiniams rezultatams palyginti buvo nustatytos ribos, kuriose tikimybė $P \approx 0,50$, kad pagal normalųjį dėsnį pasiskirstę reikšmės yra intervale $\bar{x} \pm 0,675 \cdot s$ (tikėtinasis 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) [18], čia $\bar{x} = m_e, C_e, m_p, C_p$ – vidutinė eksperimentinė suirimo kreivės parametrų reikšmė; s – standartinis nuokrypis.

Korozijai ir karščiui atsparaus plieno eksperimentinės ε^{eks} ir skaičiuotos ε^{sk} deformacijos palyginimas pagal (2.4) lygybę kambario ir aukštesnėje temperatūroje parodytas 3.9-3.12 paveiksluose, kai suirimo kreivės parametrai m_e , C_e , m_p , C_p nustatyti koordinatėse $lg \varepsilon_e - lg N_f$ ir $lg \delta - lg N_f$ kiekvienai medžiagai (3.9-3.10 pav.); kai suirimo kreivės parametrai m_e , C_e , m_p , C_p nustatyti pagal 3.13 lentelėje duotas priklausomybes (3.11-3.12 pav.).

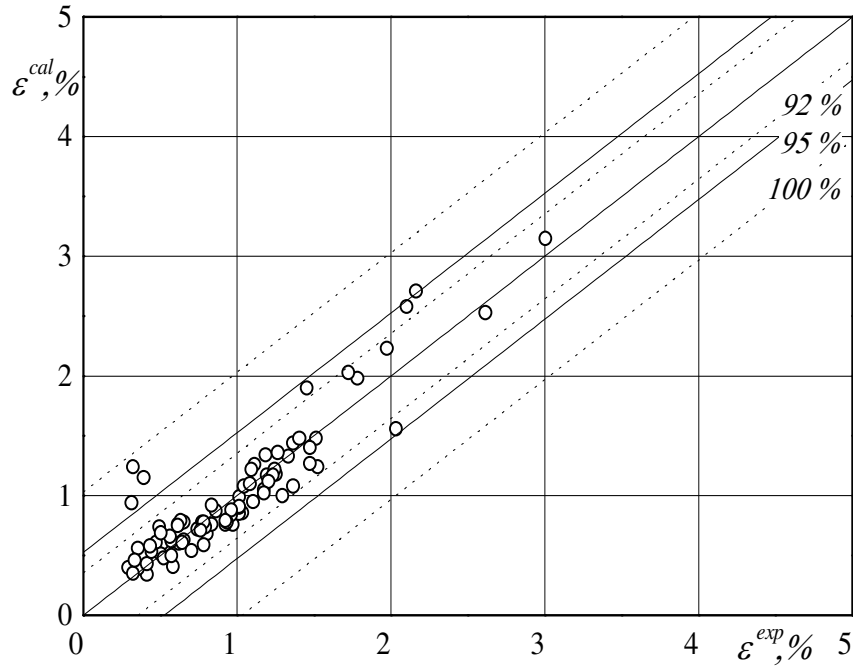


3.9. pav. Korozijai ir karščiui atsparaus plieno eksperimentinės ε^{eks} ir skaičiuotos ε^{sk} deformacijos palyginimas pagal (2.4) lygybę kambario temperatūroje, kai suirimo kreivės parametrai m_e , C_e , m_p , C_p nustatyti koordinatėse $\lg \varepsilon_e - \lg N_f$ ir $\lg \delta - \lg N_f$ kiekvienai medžiagai

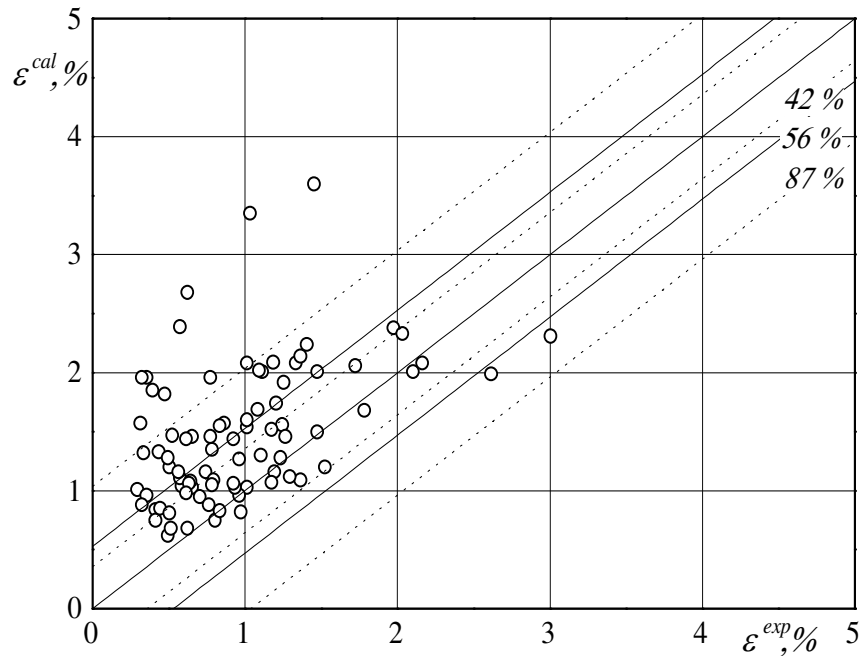


3.10. pav. Korozijai ir karščiui atsparaus plieno eksperimentinės ε^{eks} ir skaičiuotos ε^{sk} deformacijos palyginimas pagal (2.4) lygybę kambario temperatūroje, kai suirimo

kreivės parametrai m_e , C_e , m_p , C_p nustatyti pagal 3.13 lentelėje duotas priklausomybes



3.11. pav. Korozijai ir karščiui atsparaus plieno eksperimentinės ε^{eks} ir skaičiuotos ε^{sk} deformacijos palyginimas pagal (2.4) lygybę aukštesnėje temperatūroje, kai suirimo kreivės parametrai m_e , C_e , m_p , C_p nustatyti koordinatėse $lg \varepsilon_e - lg N_f$ ir $lg \delta - lg N_f$ kiekvienai medžiagai



3.12. pav. Korozijai ir karščiui atsparaus plieno eksperimentinės ε^{eks} ir skaičiuotos ε^{sk} deformacijos palyginimas pagal (2.4) lygybę aukštesnėje temperatūroje, kai suirimo

kreivės parametrai m_e , C_e , m_p , C_p nustatyti pagal 3.13 lentelėje duotas priklausomybes

4. PROGNOZUOJAMO IR EKSPERIMENTINIO ILGAAMŽIŠKUMŲ PALYGINIMAS

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

Ekspimentinio ir pagal (2.1) lygybę apskaičiuoto korozijai ir karščiui atsparaus plieno ilgaamžiškumą atitikimas kambario ir aukštesnėje temperatūroje duotas 4.1 lentelėje ir parodytas 4.1-4.2 paveiksluose. Šiuose paveiksluose vienas taškas yra atitinkamos medžiagos vienas bandinys. Parametrai m_p ir C_p yra apskaičiuoti pagal 3.13 lentelėje pateiktas lygybes.

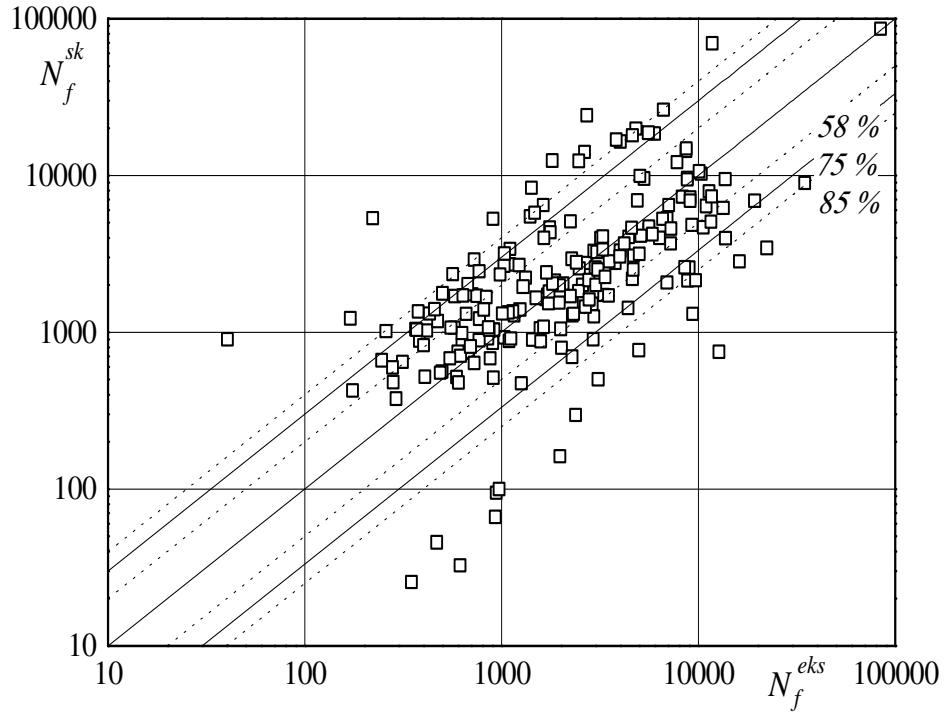
Kai ilgaamžiškumą N_f^{sk} ir N_f^{eksp} sklaida logaritminėse koordinatėse yra keturi kartai, į šią zoną patenka 46-58% korozijai ir karščiui atsparaus plieno atitinkamos markės bandinių normalioje ir aukštesnėje temperatūroje, kai devyni kartai – 58-75% bandinių, o kai šešiolika kartų – 67-85% bandinių. Šiuose intervaluose korozijai ir karščiui atsparaus plieno aukštesnėje temperatūroje rezultatų sklaida gauta didesnė.

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

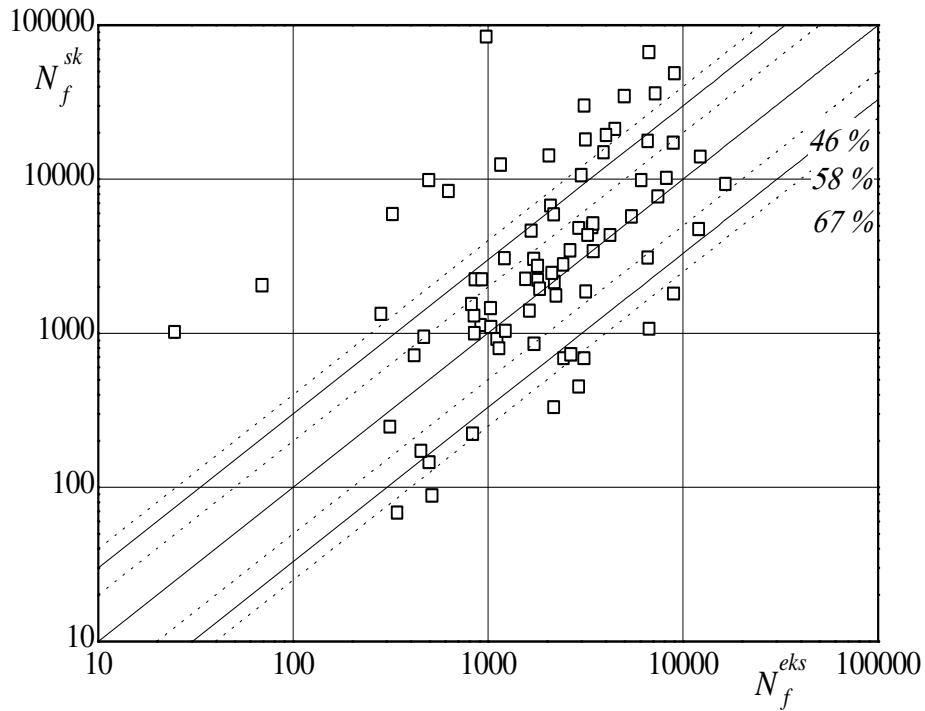
4.1 lentelė

Korozijai ir karščiui atsparaus plieno prognozuojamo N_f^{sk} ir eksperimentinio N_f^{eksp} ilgaamžiškumų palyginimas

Medžiagų skaičius	Bendras bandinių skaičius	Bandinių skaičius, kai rezultatų sklaida tarp prognozuojamo ir eksperimentinio ilgaamžiškumų					
		4		9		16	
		vnt.	%	vnt.	%	vnt.	%
Korozijai ir karščiui atsparus plienas kambario temperatūroje							
23	207	120	58	156	75	176	85
Korozijai ir karščiui atsparus plienas aukštesnėje temperatūroje							
12	81	37	46	47	58	54	67



4.1 pav. Eksperimentinio N_f^{eks} ir skaičiuoto N_f^{sk} mažaciklių ilgaamžiškumą palyginimas korozijai ir karščiui atspariam plienui kambario temperatūroje pagal (2.1) lygįbę



4.2 pav. Eksperimentinio N_f^{eks} ir skaičiuoto N_f^{sk} mažaciklių ilgaamžiškumą palyginimas korozijai ir karščiui atspariam plienui aukštesnėje temperatūroje pagal (2.1) lygįbę

IŠVADOS

Apdorojus 30 korozijai ir karščiui atsparaus plieno markių kambario temperatūroje ir 15 korozijai ir karščiui atsparaus plieno markių aukštesnėje temperatūroje, galima padaryti tokias išvadas:

1. Suirimo kreivės parametrų m_e , C_e , m_p , C_p priklausomybes nuo medžiagų mechaninių charakteristikų rekomenduojama klasifikuoti pagal temperatūras (kambario, aukštesnė), nes tai patikslina suirimo parametrų ir mechaninių charakteristikų analitinius ryšius.
2. Suirimo kreivės parametrų m_e , C_e , m_p , C_p priklausomybės nuo modifikuoto plastiškumo (σ_u / σ_y) korozijai ir karščiui atspariam plienui kambario ir aukštesnėje temperatūroje duoda mažiausią sklaidą ir geriausiai nusako tiesinio ryšio stiprumą.
3. Korozijai ir karščiui atsparaus plieno tyrimo rezultatų statistinis tikrinimas kambario ir aukštesnėje temperatūroje patvirtino, kad suirimo kreivės parametrai m_e , C_e , m_p , C_p ir modifikuotas plastiškumas (σ_u / σ_y) yra atsitiktiniai ir nepriklausomi dydžiai, pasiskirstę pagal normalųjį dėsnį. Šių sąlygų tenkinimas leidžia taikyti matematinės statistikos metodus uždaviniams spręsti ir garantuoja koreliacinės ir regresinės analizės metodų teorinį pagrįstumą.
4. Koreliacinė ir regresinė analizė parodė, kad korozijai ir karščiui atsparaus plieno suirimo kreivės parametrų m_e , C_e , m_p , C_p regresija modifikuoto plastiškumo (σ_u / σ_y) atžvilgiu gali būti aproksimuota tiesiniais $y = a + bx$.

LITERATŪRA

1. **Šniuolis, R.** Konstrukcinių medžiagų mažo ciklo nuovargio charakteristikų priklausomybė nuo mechaninių sąvybių. Daktaro disertacija. Kaunas, 1999.
2. **Даунис М.** Прочность и долговечность при малоцикловом нестационарном нагружении. - Вильнюс: Мокслас, 1989.-256с.
3. Каталог данных по механическим свойствам и расчетным характеристикам конструкционных материалов в области малоциклового усталости.- Москва, 1990.
4. **Даунис М.** (Руководитель темы). Отчет научно исследовательской работы. Определение характеристик малоциклового усталости материалов различных зон сварных соединений при нормальной и повышенной температурах.- Каунас: КПИ, 1971.-192с.
5. **Даунис М.** (Руководитель темы). Отчет научно исследовательской работы. Испытание образцов с различными технологическими дефектами на малоцикловую усталость при нормальной температуре. - Каунас: КПИ, 1971.-177с.
6. **Даунис М.** (Руководитель темы). Отчет научно исследовательской работы. Определение характеристик малоциклового усталости материалов различных зон сварных соединений при заданных амплитудах деформаций и напряжений с учетом циклической ползучести и нестационарного нагружения. - Каунас: КПИ, 1972.-254с.
7. **Даунис М.** (Руководитель темы). Отчет научно исследовательской работы. Исследование поведения при малоцикловом нагружении механически неоднородных соединений в условиях нормальной и повышенных температур. - Каунас: КПИ, 1974.-216с.
8. **Даунис М.** (Руководитель темы). Отчет научно исследовательской работы. Определение характеристик малоциклового усталости металлов сварных соединений при комнатных и служебных температурах с учетом неоднородности, технологических дефектов, нестационарности и деформационного старения. - Каунас: КПИ, 1976.-426с.
9. **Даунис М.** (Руководитель темы). Отчет научно исследовательской работы. Оценка характеристик сварных соединений при циклическом упруго-пластическом нагружении в условиях комнатных и повышенных температур. - Каунас: КПИ, 1978.-396с.
10. **Даунис М.** (Руководитель темы). Отчет научно исследовательской работы. Определение характеристик сопротивления деформированию и разрушению материалов и их сварных соединений при циклическом упруго-пластическом нагружении. - Каунас: КПИ, 1980.-325с.

11. **Даунис М.** (Руководитель темы). Отчет научно исследовательской работы. Исследование повреждения при малоцикловом нагружении конструкционных материалов и их сварных соединений с учетом конструктивно-технологических факторов. - Каунас: КПИ, 1982.-244с.
12. **Даунис М.** (Руководитель темы). Отчет научно исследовательской работы. Исследование надежности узлов энергетического оборудования с учетом воздействия конструкционных технологических и эксплуатационных факторов. - Каунас: КПИ, 1984.-Т.І 52с.,т.ІІ 54с, т.ІІІ 75с.
13. **Даунис М.** (Руководитель темы). Отчет научно исследовательской работы. Исследование сопротивления малоцикловому нагружению узлов энергетического оборудования с учетом воздействия конструкционных технологических и эксплуатационных факторов. - Каунас: КПИ, 1986.-т.1 70с.,т.ІІ 92с, т.ІІІ 125с
14. **Даунис М.** (Руководитель темы). Отчет научно исследовательской работы. Исследование сопротивления разрушению конструкционных материалов и их сварных соединений при малоцикловом нагружении с учетом воздействия конструкционных технологических и эксплуатационных факторов. - Каунас: КПИ, 1988.-242С
15. **Manson, S. S.** Fatigue: a complex subject - some simple approximations. - Experimental Mechanics, 1965. - Vol.5, No7.- p. 193-276.
16. **Ленджер Б.** Расчет сосудов давления на малоцикловую долговечность. Техническая механика, 1962, No 3, с. 97 – 113.
17. **Степнов М. Н.** Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. - Москва: Машиностроение, 1985.-232 с.
18. **Закс Л.** Статистическое оценивание. Пер. с нем. / Под. ред. Ю. П. Адлера, В. Г. Горского. - Москва: Статистика, 1976.-598с.
19. **Kaminskienė V.** Matematinės statistikos elementai. Mokymo priemonė 2 d. - Vilnius: MA Fizikos ir matematikos institutas, 1976.- 124p.
20. **Львовский Е. Н.** С Статистические методы построения эмпирических формул: Учеб. пособие. - Москва: Высшая школа, 1982.-224с.
21. **Mišėikis F.** Statistika ir ekonometrija. - Vilnius: Technika, 1997.-276p.
22. **Grigas A.** Radioelektroninės aparatūros inžinerinė sintezė ir analizė. - Kaunas: Technologija, 1992.- 214p.