



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MEDŽIAGOTYROS IR SUVIRINIMO KATEDRA

Milda Lendraitytė

**KONSTRUKCINIO PLIENO LIEKAMŲJŲ ĮTEMPIŲ TYRIMAS PIB
METODU**

**SLW METHODS IN RESEARCH OF RESIDUAL STRESS IN
STRUCTURAL STEEL**

Baigiamasis magistro darbas

Medžiagų ir suvirinimo inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas- 621H70005

Gamybos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2017

Vilniaus Gedimino technikos universitetas Mechanikos fakultetas Medžiagotyros ir suvirinimo katedra	ISBN ISSN Egz. sk. Data-.....-.....
Antrosios pakopos studijų Medžiagų ir suvirinimo inžinerijos programos magistro baigiamasis darbas 4 Pavadinimas Konstruktinio plieno liekamųjų įtempių tyrimas PIB metodu Autorius Milda Lendraitytė Vadovas Irmantas Gedzevičius	
Kalba: lietuvių	
Anotacija Baigiamajame magistro darbe nagrinėjami įtempiai, jų susidarymo, mažinimo ir nustatymo būdai. Analizuojamas ultragarsinis paviršinių išilginių bangų metodas (PIB). Darbe PIB metodas taikomas nustatyti įtempius konstrukciniame pliene S355J2 (LST EN ISO 10025-2:2005). Tiriama PIB akustinio tamprumo konstantos priklausomybė nuo plieno paviršiaus paruošimo. Tyrimas atliekamas su bandiniais kurių paviršius smėliuotas, šratuotas, cinkuotas, dažytas ir be paruošimo. Tarpusavyje lyginami bandiniai su terminiu ir be terminio atleidimo. Eksperimentinių tyrimų metu gautos akustinio tamprumo konstantos kiekvienam, pagal norminius dokumentus paruoštam, plieno paviršiui. Sudarytos PIB sklidimo laiko priklausomybių nuo įtempių diagramos. Naudojant gautus tyrimo rezultatus sudarytas algoritmas, kuriuo remiantis nustatomi liekamieji ir tempimo įtempiai realioje konstrukcijoje. Darbą sudaro septynios dalys: įvadas, literatūros analizė, eksperimentinio tyrimo metodika, įtempių tyrimas, tyrimo rezultatai, išvados, literatūros sąrašas. Darbo apimtis – 74 p. teksto be priedų, 41 iliustr., 21 lent., 37 bibliografiniai šaltiniai. Atskirai pridedami darbo priedai.	
Prasminiai žodžiai: Akustinio tamprumo konstanta, cinkavimas, dažymas, įtempiai, PIB, smėliavimas, šratavimas, ultragarsas.	

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Mechanics
Department of Materials Science and Welding

ISBN _____ ISSN _____
Copies No.
Date-.....-.....

Master Degree Studies **Materials and Welding Engineering** study programme Master Graduation Thesis 4

Title **SLW Methods in Research of Residual Stress in Structural Steel**

Author **Milda Lendraitytė**

Academic supervisor **Irmantas Gedzevičius**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

The work presented in this master's thesis investigate stresses and their formation together with methods used to discover and reduce such stresses. In addition, Non-Destructive Technique (NDT) – ultrasound surface longitudinal wave propagation method (LSAW) was analyzed.

Ultrasound surface longitudinal wave propagation method was applied to determine residual stresses in S355J2 (LST EN ISO 10025-2:2005) structural steel. Also, ultrasound surface longitudinal waves propagation results were obtained while examining different steel surface treatments, namely plain, abrasive shot cleaning, abrasive grid cleaning, galvanizing and painted. Furthermore, thermally annealed specimens were compared to specimens that received no thermal treatment. Acoustic elastic constants were obtained from steel surface experimental investigation performed in accordance to standard procedures. Ultrasound longitudinal surface waves propagation against time charts were established for residual stresses. Using experimental results observed, algorithm was formed, by which, stresses can be determined in the structure of interest.

This thesis consists of 7 parts: introduction, literature review, experimental methodology, residual stresses experiment, presentation and analysis of results, conclusions and the list of references.

Thesis also comprises of 74 pages without annexes, 41 illustrations, 21 tables and 37 biographic references.

Study annexes are attached separately.

Keywords: Acoustic elastic constants, galvanization, painting, LSAW, PIB, grid blasting, shot blasting, ultrasonic.

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Milda Lendraitytė, 20112828

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Mechanikos fakultetas

(Fakultetas)

Medžiagų ir suvirinimo inžinerija, SIfm-15

(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)

SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2017 m. gegužės 26 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Konstrukcinio plieno liekamųjų įtempių tyrimas PIB metodu“ patvirtintas 2015 m. lapkričio 17 d. dekanų potvarkiu Nr. 251me, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Parenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: dr. Aurimas Jurčius. Mano darbo vadovas doc. dr. Irmantas Gedzevičius.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).



(Parašas)

Milda Lendraitytė

(Vardas ir pavardė)

ŽYMĖJIMAI

Simboliai

E – tamprumo modulis, GPa;
 σ – įtempiai, MPa;
 σ_x – išilginiai įtempiai, MPa;
 σ_y – skersiniai įtempiai, MPa;
 τ_{xy} – tangentiniai įtempiai, MPa;
 B – tūrinis tamprumo modulis;
 c_t – išilginės bangos sklidimo greitis, m/s;
 c_n – skersinės bangos sklidimo greitis, m/s;
 μ – Puasono koeficientas;
 ρ – medžiagos tankis, kg/m³
 λ – bangos ilgis, m;
 ξ_t – išilginė virpesių dedamoji;
 ξ_n – skersinė virpesių dedamoji;
 ϑ_{kr}^I – išilginės bangos visiško atspindžio kampas;
 c_{PIB} – fazinis PIB sklidimo greitis, m/s;
HV5 – kietumas pagal Vickersą, esant 5 kg apkrovai;
 A_{11} – akustinio tamprumo koeficientas;
 ε – deformacija, mm
 K_{11} – akustinio tamprumo konstanta.

Santrumpos

PAB – paviršinės akustinės bangos;
PIB – paviršinės išilginės bangos;
PSB – paviršinės skersinės bangos.

TURINYS

IVADAS	13
1. ĮTEMPIAI, JŲ ATLEIDIMAS, GALIMI NUSTATYMO METODAI. PAVIRŠINĖS IŠILGINĖS BANGOS, JŲ SĄVYBĖS IR TAIKYMAS	16
1.1. Įtempiai.....	16
1.1.1. Darbiniai įtempiai	16
1.1.2. Liekamieji įtempiai.....	18
1.1.3. Įtempių poveikis konstrukcijai	23
1.1.4. Įtempių nustatymo metodai	24
1.1.5. Įtempių stabilizavimo metodai	26
1.2. Ultragarsinės paviršinės išilginės bangos, jų savybės, panaudojimo galimybės, sužadinimo būdai	28
1.2.1. Paviršinė išilginė ultragarsinė banga	28
1.2.2. PIB bangų savybės.....	29
1.2.3. PIB sužadinimo būdai.....	32
1.2.4. PIB panaudojimo galimybės.....	34
1.2.5. PIB metodas liekamųjų įtempių nustatymui.....	35
1.2.6. PIB metodo privalumai ir trūkumai.....	36
1.3. Pirmojo skyriaus išvados.....	36
2. EKSPERIMENTINIO TYRIMO METODIKA	38
2.1. Medžiagos parinkimas.....	39
2.2. Bandinių matmenų nustatymas.....	41
2.3. Bandinių paruošimas	44
2.3.1. Įtempių mažinimas.....	44
2.3.2. Paviršiaus paruošimas.....	44
2.4. Eksperimentiniams tyrimams naudota įranga	48
2.5. Įtempių tyrimo metodika	49
2.6. Antrojo skyriaus išvados	51

3. EKSPERIMENTINIS TYRIMAS	52
3.1. PIB pradinio laiko nustatymas.....	52
3.2. PIB sklidimo laiko priklausomybė nuo įtempių.....	54
3.3. Akustinio tamprumo koeficiento nustatymas	55
3.4. Akustinio tamprumo konstantos nustatymas.....	56
3.5. Praktinio pritaikymo algoritmas	57
3.6. Trečiojo skyriaus išvados	58
4. TYRIMO REZULTATAI.....	59
4.1. Neapdorotų paviršių įtempių tyrimo rezultatai.....	59
4.2. Smėliuotų paviršių įtempių tyrimo rezultatai	60
4.3. Šratuotų paviršių įtempių tyrimo rezultatai	62
4.4. Dažytų paviršių įtempių tyrimo rezultatai	64
4.5. Cinkuotų paviršių įtempių tyrimo rezultatai.....	65
4.6. Liekamųjų ir tempimo įtempių nustatymas konstrukcijoje	67
4.7. Ketvirtąjo skyriaus išvados	69
BENDROSIOS IŠVADOS	71
NAUDOTA LITERATŪRA	72
PRIEDAI.....	75

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1. pav. Įtempių pobūdis	17
1.2 pav. Gniuždymo ir tempimo įtempiai	17
1.3 pav. Pirmos, antros ir trečios grupės liekamieji įtempiai kristalinėje struktūroje	19
1.4 pav. Liekamųjų įtempių susidarymas	20
1.5 pav. Gniuždymo įtempių priklausomybė nuo šrato ir smėlio grūdų dydžio, srauto greičio ir kritimo kampo	22
1.6 pav. Kietumo priklausomybė nuo susidariusių یدubų gylio, kai šratų ar smėlio grūdo dydis yra 2,2 mm, o proceso greitis 35 m/s	22
1.7 pav. Įtempių pasiskirstymas konstrukcijoje	23
1.8 pav. PIB bangos lūžis antrame kietajame kūne	30
1.9 pav. PIB virpėjimo greičio dedamosios	30
1.10 pav. PSB virpėjimo greičio dedamosios	31
1.11 pav. PIB sužadimas X – pjūvio kvarco pjezoplokšte	32
1.12 pav. PIB sužadimas Y – pjūvio kvarco plokšte	32
1.13 pav. PIB sužadimas virpančia periodine linijine struktūra	33
1.14 pav. PIB kampinio keitiklio konstrukcija	33
1.15 pav. PIB panaudojimo galimybės	34
1.16 pav. Tampriosios bangos sklidimas kietajame kūne	36
2.1 pav. Eksperimentiniam tyrimui naudojami bandiniai	39
2.2 pav. Bandinių kietumo matavimas kietmačiu <i>MIC10</i>	41
2.2 pav. Bandinių matmenys	43
2.3 pav. Šiurkštumo matuoklis TR220	45
2.4 pav. Šratuoto paviršiaus komparatorius	46
2.5 pav. Dažų storio matuoklis LIMIT 5100	47
2.6 pav. Cinkavimo procedūra	48
2.7 pav. Ultragarsinis defektoskopas <i>Sonatest Sitiescan 240</i>	48
2.8 pav. Keičiamo kampo keitikliai <i>General electric MUWB4-N</i>	49
2.9 pav. Tempimo mašina <i>MIRI-50K</i>	49

2.10 pav. PIB sužadavimo schema	50
3.1 pav. Pradinio kelio (l_0) nustatymas B1 bandinyje	53
3.2 pav. Eksperimentinio tyrimo schema	54
3.3 pav. Įtempių matavimo algoritmas.....	58
4.1 pav. Bandinio B1 grafiniai matavimo rezultatai	59
4.2 pav. Bandinio TB6 grafiniai matavimo rezultatai	60
4.3 pav. Bandinio B2 grafiniai matavimo rezultatai	61
4.4 pav. Bandinio TB7 grafiniai matavimo rezultatai	61
4.5 pav. Bandinio B3 grafiniai matavimo rezultatai	62
4.6 pav. Bandinio TB8 grafiniai matavimo rezultatai	63
4.7 pav. Bandinio B4 grafiniai matavimo rezultatai	64
4.8 pav. Bandinio TB9 grafiniai matavimo rezultatai	65
4.9 pav. Bandinio B5 grafiniai matavimo rezultatai	66
4.10 pav. Bandinio TB10 grafiniai matavimo rezultatai	67
4.11. pav. Tikrinamos santvaros brėžinys	68
4.12 pav. S355J2 plieno kvadratinis profilis	68

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Liekamųjų įtempių susidarymo priklausomybė nuo metalo apdirbimo procesų.....	21
1.2 lentelė. PIB IR PAB bangų savybės.....	31
1.3 lentelė. Ultragarsinių bangų sklaidimo greitis	35
2.1 lentelė. Tiriamų bandinių kodavimo lentelė.....	38
2.2 lentelė. Plieno S355J2 cheminė sudėtis	39
2.3 lentelė. Plieno S355J2 mechaninės savybės.....	40
2.4 lentelė. Plieno S355J2 cheminė sudėtis pagal gamintojo sertifikatą.....	40
2.5 lentelė. Plieno S355J2 mechaninės savybės pagal gamintojo sertifikatą.....	40
2.6 lentelė. Bandinių kietumas pagal Vikersą.	41
2.7 lentelė. Bandinio storio nustatymas eksperimentiniu būdu.....	42
2.8 lentelė. Smėliuotų bandinių B2 ir TB7 šiurkštumas	45
2.9 lentelė. Dažytų bandinių B4 ir TB9 dažų sluoksnio storis.....	47
3.1 lentelė. PIB metodu nustatytas pradinis bangos kelias l_0	52
3.2 lentelė. PIB pradinis kelias, esant skirtingiems bandinių paviršiams	53
3.3 lentelė. Pradinis PIB sklaidimo laikas, esant skirtingiems bandinių paviršiams	54
3.4 lentelė. PIB sklaidimo laikas keičiantis įtempiams.....	55
3.5 lentelė. Nustatyti akustinio tamprumo koeficientai.....	56
3.6 lentelė. Nustatytos akustinio tamprumo konstantos.....	57
4.1 lentelė. Išmatuotas dažų storis konstrukcijose	68
4.2 lentelė. Nesumontuotos santvaros PIB sklaidimo laikas ir įtempiai.....	69
4.3 lentelė. Sumontuotos santvaros PIB sklaidimo laikas ir įtempiai.....	69

IVADAS

Problemos formulavimas

Kasmet sparčiai auga plieninių konstrukcijų poreikis, kartu didėja ir joms keliami reikalavimai, todėl siekiama kuo tiksliau įvertinti konstrukcijos elementus, optimaliai nustatant jų storį, atsparumą apkrovoms bei aplinkos poveikiui. Statybų sektoriuje didelę dalį statinių užima pramoninės konstrukcijos: tiltai, vamzdynai, pastatų perdangų sijos, rezervuarai, laivų statyba ir kt. Visos šios konstrukcijos gaminamos iš konstrukcinio plieno. Konstrukcinis plienas pasižymi geromis mechaninėmis savybėmis bei geru suvirinamumu, tačiau dėl mechaninių ir terminių procesų ar išorinės apkrovos konstrukciniame pliene susidaro įtempiai. Susidarę įtempiai sudaro sąlygas įtrūkiams atsirasti ir plisti gilyn į pagrindinį metalą, dėl ko konstrukcijos suyra. Projektuojant gaminį, stengiamasi atsižvelgti į susidariusius įtempius konstrukcijos mechaninio ar terminio apdorojamo metu bei įvertinti aplinkos sąlygas ir apkrovas. Vis dėlto neretai atsiranda nenumatytų pašalinių veiksnių, kurie nebuvo įvertinti. Dėl suminių liekamųjų ir darbinių įtempių konstrukcija gali patirti vietinę perkrovą ir spontaniškai suirti. Siekiant išvengti suirimo, būtina nustatyti įtempius jau pagamintose konstrukcijose ir juos tikrinti konstrukcijos eksploatacijos metu.

Šiame technologijų amžiuje yra nemažai neardomųjų metodų (pavyzdžiui rentgeno spindulių ar neutronų difrakcijos) kurie leidžia nustatyti įtempių dydį. Vis dėlto didžioji dalis šių metodų yra sudėtingi, atliekami tik laboratorijos sąlygomis. Dėl to kyla sunkumų įvertinti konstrukcijos įtempius gaminamoje ar jau pagamintoje ir eksploatuojamoje konstrukcijoje.

Darbo aktualumas

Pramoninėse konstrukcijose dėl aplinkos poveikio, apkrovos, mechaninio ar terminio apdirbimo bei surinkimo procesų neišvengiamai susidaro įtempiai. Įtempiai gali sukelti pirmalaikį konstrukcijos susilpnėjimą žemiau leistinos ribos, dėl to konstrukcija gali nenumatytai prieš laiką suirti. Statant bet kokią konstrukciją, į šiuos įtempius būtina atsižvelgti, juos įvertinti skirtingose konstrukcijos gamybos stadijose bei numatyti galimus padarinius. Įtempius galima įvertinti skirtingais metodais, tačiau didžioji dalis tyrimų atliekama laboratorijos sąlygomis suardant konstrukciją. PIB metodas sudaro galimybę nustatyti įtempius, bet kuriuo konstrukcijos gaminimo ar montavimo etapu ir net eksploatacijos periodu. Be to, šis metodas reikalauja nesudėtingos įrangos, kuri lengvai kilnojama, todėl galima tikrinti konstrukcijas įvairiose padėtyse, bet kuriame aukštyje.

Tyrimų objektas

Magistro darbo tyrimo objektai:

1. Skirtingai apdoroto paviršiaus poveikis akustinio tamprumo konstantai.
2. Tyrimo metu gautų akustinių tamprumo konstantų taikymas gamybos ir surinkimo aikštelėje.

Darbo tikslas

Šio darbo tikslas yra nustatyti akustinio tamprumo konstantos priklausomybę nuo konstrukcinio plieno S355J2 (LST EN ISO 10025-2:2005) paruošimo bei pritaikyti PIB metodą konstrukcijų gamybos ar surinkimo aikštelėje, kai nėra galimybių taikyti kitų metodų.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. PIB metodu nustatyti ultragarsinės bangos sklidimo laiko ir bandiniuose susidariusių įtempių priklausomybę.
2. Nustatyti, kokią įtaką plieno paviršiaus paruošimas daro akustinio tamprumo konstantai.
3. Nustatyti, kokią įtaką terminis atleidimas daro akustinio tamprumo konstantai.
4. Sudaryti įtempių matavimo PIB būdu algoritmą ir jį pritaikyti gamyboje.

Tyrimo metodika

Magistro darbe taikomi eksperimentiniai tyrimo metodai. Eksperimentų metu tiriamos akustinio tamprumo konstantos esant skirtingiems plieno paviršiams. Tyrimams naudojamas PIB metodas. Eksperimentas paremtas tempimo bandymu.

Darbo mokslinis naujumas ir jo reikšmė

Atlikus darbą, buvo gauti šie mechanikos inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Ištirta akustinio tamprumo konstantos ir PIB sklidimo laiko priklausomybė nuo konstrukcinio plieno paviršiaus.
2. PIB metodas iš tyrimų laboratorijos perkeltas į konstrukcijų gamybos ir surinkimo aikštelę, kurioje nustatyti realūs įtempių dydžiai.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Gauti tyrimo rezultatai leidžia taikyti PIB metodą plieno S355J2 įtempiams nustatyti, kai konstrukcinio plieno paviršius yra be paviršiaus paruošimo, smėliuotas, šratuotas, dažytas ar cinkuotas.

Taikant sudarytą matavimo algoritmą galima nustatyti įtempius gamybos ar surinkimo aikštelėje.

Ginamieji teiginiai

1. PIB turi tiesinę priklausomybę nuo įtempių.
2. Paviršiaus paruošimas daro įtaką PIB sklidimo laikui.

3. PIB metodas praktiškai taikomas konstrukcijų įtempiams nustatyti gamybos ar surinkimo aikštelėje.

Magistro darbo struktūra

Magistro darbą sudaro įvadas, keturi skyriai ir bendrosios išvados.

Pirmajame skyriuje atlikta literatūros analizė, kuri apima įtempių susidarymą, analizę, poveikį ir stabilizavimo metodus, bei ultragarso paviršines išilgines bangas, jų savybes, pritaikymo galimybes. Antrame skyriuje pateikta tyrimo metodika. Trečiame – eksperimentinio tyrimo atlikimo eiga. Ketvirtame – gauti rezultatai, jų analizė.

Darbo apimtis – 74 puslapiai, 41 paveikslas, 21 lentelė. Darbą papildo 7 priedai. Rašant darbą išanalizuoti 37 literatūros šaltiniai.

1. ĮTEMPIAI, JŲ ATLEIDIMAS, GALIMI NUSTATYMO METODAI. PAVIRŠINĖS IŠILGINĖS BANGOS, JŲ SĄVYBĖS IR TAIKYMAS

Pirmajame skyriuje analizuojami įtempiai, nustatomos jų susidarymo priežastys, aptariami įtempių nustatymo ir stabilizavimo metodai. Taip pat analizuojamas PIB metodas: apžvelgiamos paviršinių išilginių bangų savybės, šios bangos sužadinimo būdai ir panaudojimo galimybės.

1.1. Įtempiai

Įtempiai gali tapti pagrindine priežastimi, dėl kurios metalinės konstrukcijos prieš laiką suyra, nors jos neveikia jokia papildoma išorinė apkrova. Įtempių įvertinimui yra skiriamas labai didelis dėmesys: projektuotojai skaičiuoja ir bando kuo tiksliau nustatyti konstrukcijose susidarančius įtempius skaitiniais metodais, gamintojai siekia sumažinti gamybos metu susidariusius įtempius mechaniniu, terminiu ar vibraciniu būdu, mokslininkai atlieka eksperimentinius bandymus, kurių tikslas – rasti patikimiausią ir tiksliausią įtempių nustatymo metodą.

Visi konstrukcijose egzistuojantys įtempiai yra suskirstyti į grupes tam, kad būtų palengvintas jų atsekamumas. Pagrindinė įtempių klasifikacija yra nustatoma pagal įtempių egzistavimo trukmę ir gali būti (Bereišis 2010):

1. laikinieji darbiniai įtempiai, egzistuojantys dėl išorinių jėgų;
2. liekamieji įtempiai, kurie išlieka konstrukcijos eksploatavimo metu.

Liekamieji įtempiai patys pavojingiausi, nes gali sukelti savalaikį konstrukcijos suirimą. Šių įtempių nustatymui ir analizei yra skiriamas didelis dėmesys, tačiau įtempiai egzistuojantys dėl išorinių jėgų nemažiau svarbūs, nes sumuojasi su esančiais liekamaisiais įtempiais ir sukelia konstrukcijos suirimą.

Yra daugybę metodų, kurie skirti įtempių dydžiui nustatyti, bet didžioji jų dalis atliekami laboratorijos sąlygomis arba yra ardomieji. Tačiau yra sukurtas nesudėtingas, dar nestandartizuotas, neardomasis įtempių nustatymo būdas, kuris remiasi paviršine išilgine ultragarso banga (PIB metodas).

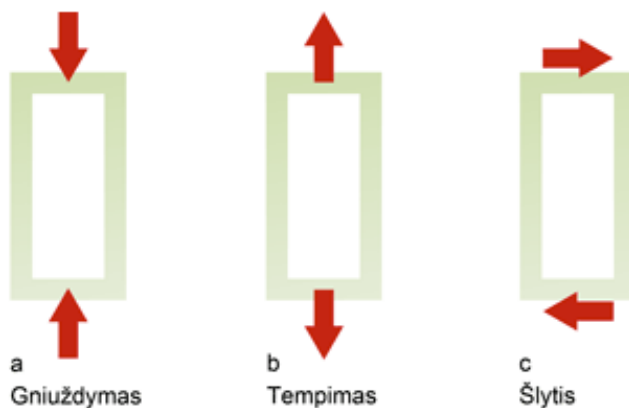
1.1.1. Darbiniai įtempiai

Veikiant išorinėms apkrovoms konstrukcijoje atsiranda jėgos, kurios stengiasi pakeisti medžiagos dalelių tarpusavio padėtį ir pusiausvyrą. Kai šios jėgos yra mažesnės nei medžiagos takumo riba – apkrovą nukrovus konstrukcija išlieka be plastinių deformacijų. Tačiau jei takumo riba yra mažesnė už veikiančias jėgas įvyksta konstrukcijos suirimas.

Įtempių intensyvumas gali būti išreiškiamas jėga į ploto vienetą N/m^2 , Paskaliais Pa , kilogramais į kvadratinį milimetrą kg/mm^2 arba svarais į kvadratinį colį psi .

Galima išskirti tris skirtingus įtempių, kurie egzistuoja dėl išorinio poveikio, tipus:

1. gniuždymo įtempiai – deformavimo tipas, apibūdinantis konstrukcijos ilgio pasikeitimą dėl ašinės jėgos, kai jėga $F < 0$ (1.1 pav. a);
2. tempimo įtempiai – deformavimo tipas, apibūdinantis konstrukcijos ilgio pasikeitimą dėl ašinės jėgos, kai jėga $F > 0$ (1.1 pav. b);
3. šlyties įtempiai – kampinė konstrukcijos deformacija (1.1 pav. c).



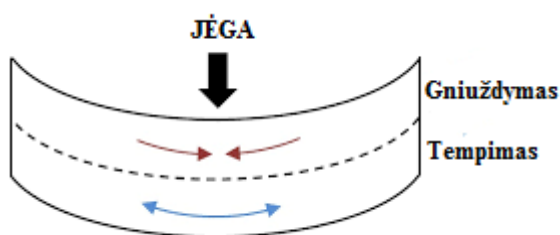
1.1. pav. Įtempių pobūdis

Gniuždymo įtempiai susidaro veikiant išoriniai apkrovai dėl kurios konstrukcijos elemento ilgis padidėja. Šie įtempiai (σ) išreiškiami jėga (F) į ploto vienetą (A) (1.1 formulė). Medžiagos savybė atlaikyti gniuždymo įtempius yra viena iš pagrindinių mechaninių savybių, kuri parodo plieno stiprumą.

$$\sigma = \frac{F}{A}; \quad (1.1)$$

Tempimo įtempiai susidaro veikiant išoriniai apkrovai dėl kurios konstrukcijos elemento ilgis padidėja. Tempimo įtempiai yra priešingi gniuždymo įtempiams tačiau nustatomi remiantis ta pačia formule (1.1 formulė) kaip ir gniuždymo įtempiai.

Kai konstrukcijos elementas yra išlenktas dėl išorinės apkrovos, atsiranda elemento pailgėjimas ir sutrumpėjimas – konstrukciją veikia tempimo ir gniuždymo įtempiai (1.2 pav.)



1.2 pav. Gniuždymo ir tempimo įtempiai

Įtempiai, pagal juos sukeliančius veiksnius, klasifikuojami į dvi grupes:

- įtempiai, sukelti aplinkos poveikio (temperatūros pokytis, vėjas, sniegas);
- įtempiai, sukelti išorinių jėgų (gravitacija, judančių kūnų inercija, slėgis, apkrova).

Tai gi, siekiant geriau išanalizuoti įtempius būtina žinoti, kokios apkrovos veikia konstrukciją. Apkrovos pagal veikimo laiką skirstomos į:

- pastoviasias apkrovas – apkrovos, kuriuos nuolat veikia konstrukciją (savasis svoris, gravitacija);
- laikinąsias apkrovas – apkrovos, kurios veikia konstrukciją tik tam tikrą periodą (vėjas, sniegas, temperatūros pokytis).

Pagal veikimo pobūdį apkrovos skirstomos į:

- statines apkrovas – apkrovos, kurio lėtai didėja nuo nulinės iki galutinės savo ribos, o ją pasiekusios tampa pastovios (gravitacija, slėgis);
- dinamines apkrovas – apkrovos, kurių dydis, kryptis ar pridėties vieta greitai kinta (smūgis, inercijos jėgos).

Pavojingiausios yra dinaminės apkrovos, nes jų poveikis būna net keliasdešimt kartų didesnis nei statinių apkrovų (Mikuckis 2008).

Veikiant išorinėms apkrovoms pačioje konstrukcijos medžiagoje atsiranda vidinės jėgos, kurios siekia pakeisti atskirų kūno dalelių padėtį ir pusiausvyrą. Konstrukcijos elementuose vienu metu gali susidaryti tempimo, gniuždymo ar šlyties įtempiai.

1.1.2. Liekamieji įtempiai

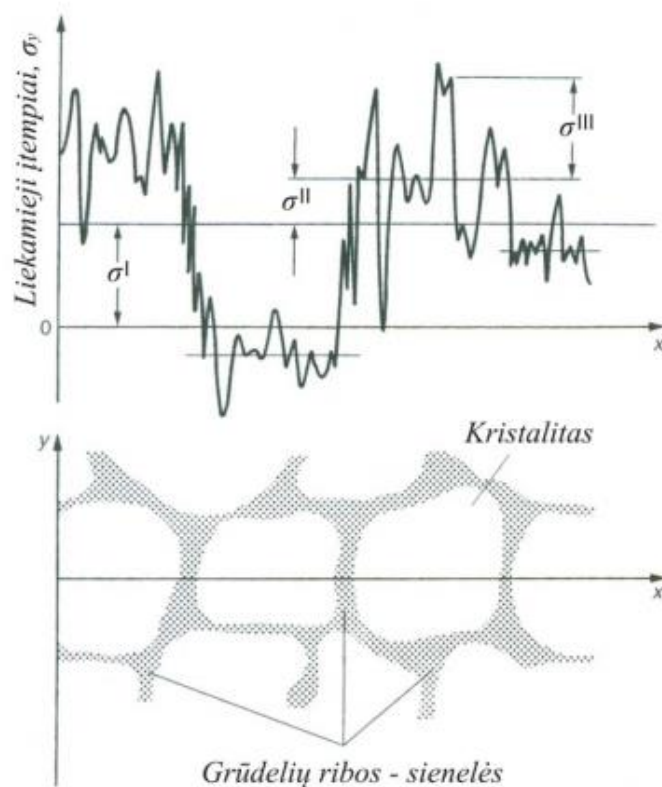
Siekiant geriau išanalizuoti liekamuosius įtempius, šie įtempiai yra suskirstyti į tris grupes. Pirmos grupės įtempiai σ^I (makro liekamieji įtempiai) susidaro detalės gamybos metu, yra išplitę makroskopinėje zonoje ir apima keletą kristalų. Makro liekamųjų įtempių pusiausvyra nusistovi visame kūno tūryje arba kūno makroskopinių dalių tūriuose.

Antros grupės liekamieji įtempiai σ^{II} (mikro liekamieji įtempiai) susidaro dėl atskirų kristalitų grūdelių fazinės deformacijos. Šie įtempiai vidutiniškai prilygsta subregionams. Mikro liekamųjų įtempių dydis apytiksliai 1,0–0,001 mm.

Trečios grupės liekamieji įtempiai σ^{III} susidaro dėl kristalinės gardelės atomų tampriųjų poslinkių ir išsidėsto tarpatominėse srityse. Tokių įtempių pusiausvyra nusistovi kristalinės gardelės mikrotūriuose, o dydis apytiksliai siekia nuo 10^{-2} iki 10^{-6} mm (Valiulis 2005).

Kristalinėje struktūroje susidarantys pirmos (σ^I), antros (σ^{II}) ir trečios (σ^{III}) grupės liekamieji įtempiai parodyti 1.3 paveiksle.

Įvairiuose šaltiniuose šios trys liekamųjų įtempių grupės yra įvardinamos skirtingai. Neretai pirmos grupės makro liekamieji įtempiai vadinami terminiais liekamaisiais įtempiais ir išreiškiami per tampriąsias deformacijas, o antros ir trečios grupės – faziniais ar struktūriniais įtempiais.



1.3 pav. Pirmos (σ^I), antros (σ^{II}) ir trečios (σ^{III}) grupės liekamieji įtempiai kristalinėje struktūroje

Visi šie trys liekamųjų įtempių tipai atsiranda palaipsniui vienas po kito. Makro liekamieji įtempiai kelia didžiausią mechanikos inžinierių ir projektuotojų susidomėjimą, tačiau mikro liekamieji įtempiai taip pat svarbūs, nes jie yra susidariusių įtempių ir medžiagos defektų rodiklis.

Liekamieji įtempiai lieka kūne po apkrovos pašalinimo. Įtempių intensyvumas gali būti išreiškiamas jėga į ploto vienetą N/m^2 , Paskaliais Pa , kilogramais į kvadratinį milimetrą kg/mm^2 arba svarais į kvadratinį colį psi (Jurčius 2010).

Liekamieji įtempiai, pagal juos sukeliančius veiksnius, klasifikuojami į dvi grupes (Tall 1991):

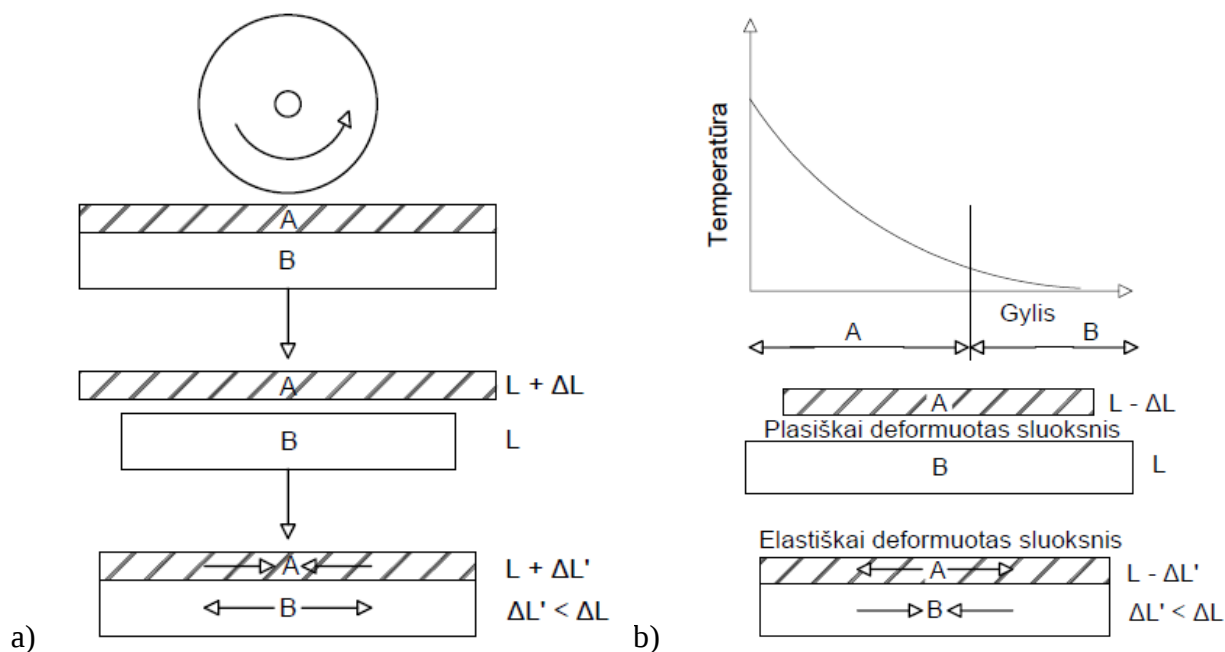
- įtempiai, sukelti netolygaus tampriųjų įtempių pasiskirstymo, įskaitant plastinius ir terminius įtempius;
- įtempiai, sukelti neteisingo mechaninio apdorojimo.

Liekamieji įtempiai susidaro dėl labai įvairių priežasčių, tačiau pagrindines susidarymo priežastis galima suskirstyti į tris grupes:

- liekamieji įtempiai, susidarantys dėl mechaninio poveikio (lenkimas, formavimas, valcavimas, pjovimas, mechaninis paviršiaus apdorojimo) (1.4 pav. a);

- liekamieji įtempiai, susidarantys dėl terminio poveikio (suvirinimas, litavimas) (1.4 pav. b);
- struktūriniai liekamieji įtempiai.

Mechaniniai, terminiai ir struktūriniai liekamieji įtempiai sudaro bendruosius liekamuosius įtempius konstrukcijose (Rumbutis 2010).



1.4 pav. Liekamųjų įtempių susidarymas dėl a) mechaninio poveikio, b) terminio poveikio

Taip pat, išskiriamos makro liekamųjų įtempių susidarymo priežastys (Lu 1988):

- nehomogeniškos plastinės deformacijos, susidarančios konstrukcinio plieno paviršiaus apdorojimo metu (šratavimas, smėliavimas, poliravimas, šlifavimas, šveitimas, kalimas plaktuku, lazerinis paviršiaus suketinimas);
- nehomogeniškos plastinės deformacijos, susidariusios nevienodo kaitinimo arba aušinimo metu (netinkama kaitinimo arba aušinimo temperatūra);
- struktūrinės deformacijos dėl metalo apdirbimo (terminis apdorojimas);
- cheminis arba kristalografinis heterogeniškumas (įanglinimas, įazotinimas);
- įvairus paviršiaus apdorojimas (emaliavimas, nikeliavimas, cinkavimas, PVD ir CVD dangos);
- skirtingi irimo koeficientai ir mechaninis nesuderinamumas tarp skirtingus komponentus turinčių kompozitų (kompozitai su metaline ir organine matrica, keraminės dangos).

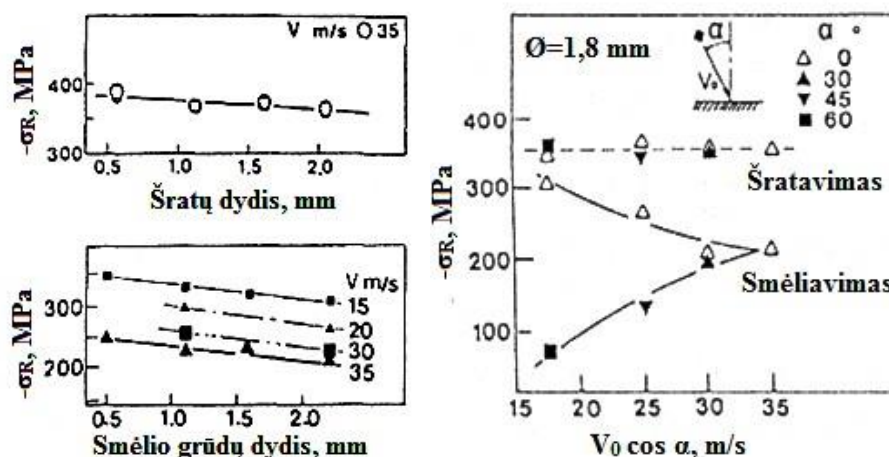
Siekiant išsiaiškinti konstrukcijos liekamųjų įtempių dydį, reikia identifikuoti visus veiksniai, galinčius sukelti liekamuosius įtempius. 1.1 lentelėje pateikti metalo apdirbimo procesai, kurie sukelia mechaninius, terminius ir struktūrinius liekamuosius įtempius.

1.1 lentelė. Liekamųjų įtempių susidarymo priklausomybė nuo metalo apdirbimo procesų

Procesai	Liekamieji įtempiai		
	Mechaniniai	Terminiai	Struktūriniai
Lydymas Liejimas	-----	Temperatūros gradientas aušinimo metu	Struktūros pakitimai
Šratavimas Smėliavimas Pakalimas Poliravimas Lazerinis paviršiaus sukietinimas Lenkimas Sukimas Išspaudimas	Nevienalytės plastinės deformacijos	-----	-----
Šlifavimas Tekinimas Gręžimas	Plastinės deformacijos dėl pašalinamos metalo dalies (drožlių)	Temperatūros gradientas dėl išsiskyrusios šilumos proceso metu	Jei nenaudojamas pakankamas aušinimas, atsiranda struktūros pakitimų
Grūdinimas	-----	Temperatūros gradientas	Dėl struktūros pokyčio atsiranda tūrio pakitimų
Suvirinimas	Mechaninis nesuderinamumas	Temperatūros gradientas	Mikrostruktūros pokyčiai
Litavimas	Mechaninis nesuderinamumas	Terminis nesuderinamumas	Naujos struktūros sąsaja su buvusia struktūra
Galvanizavimas	Mechaninis nesuderinamumas	Terminis nesuderinamumas	Sudėties priklausomybė nuo naudojamos galvanizavimo vonios
Plazminis ar lazerinis purškimas	Mechaninis nesuderinamumas, mikro įtrūkiai	Terminis nesuderinamumas, temperatūros gradientas	Struktūros pokyčiai dengiant dangą
PVD, CVD	Mechaninis nesuderinamumas	Terminis nesuderinamumas	Struktūros pokyčiai
Kompozitai	Mechaninis nesuderinamumas	Terminis nesuderinamumas	-----

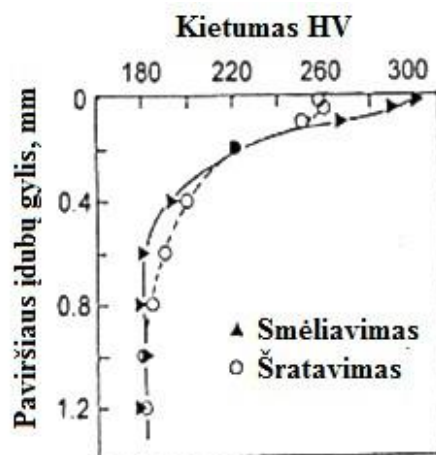
Mechaniniai liekamieji įtempiai

Konstrukcijos paviršiaus paruošimas mechaniniais procesais, tokiais kaip apdorojimas smėlio srautu, šratais, pakalimu, poliravimu leidžia susidaryti liekamiesiems gniuždymo įtempiams, kurie kompensuoja konstrukcijoje esančius tempimo įtempius. Liekamųjų gniuždymo įtempių dydis priklauso nuo šratų ar smėlio grūdelių dydžio, kritimo kampo ir srauto greičio (Tosha 2005). 1.5 paveiksle matyti, kad mažiausi gniuždymo įtempiai susidaro, kai šrato ar smėlio grūdo dydis yra 2,0 mm, greitis – 35 m/s, o dalelių kritimo kampas $\alpha=60^\circ$.



1.5 pav. Gniuždymo įtempių priklausomybė nuo šrato ir smėlio grūdų dydžio, srauto greičio ir kritimo kampo

Po plieno paviršiaus paruošimo mechaniniais procesais, keičiasi plieno paviršinio sluoksnio kietumas. Atlikus metalo paviršiaus valymą smėlio ar šratų srautu, paviršiaus kietumas priklauso nuo paviršiuje atsiradusių įdubų gylio, kurias palieka smėlio grūdai ar šratai. Priklausomybė pateikta 1.6 paveiksle. Iš 1.5 paveikslo matyti, kad paviršiaus be įdubų kietumas HV didesnis nei paviršiaus kuriame yra 1,2 mm gylio įdubos. Susidarius 0,4-0,8 mm gylio įduboms, šratuotų paviršių kietumas didesnis nei smėliuotų, o artėjant prie nulio smėliuotų paviršių kietumas didesnis nei šratuotų.



1.6 pav. Kietumo priklausomybė nuo susidariusių įdubų gylio, kai šratų ar smėlio grūdo dydis yra 2,2 mm, o proceso greitis 35 m/s

Terminiai liekamieji įtempiai

Liekamieji įtempiai susidaro terminių procesų, tokių kaip suvirinimas, litavimas, plazminis purškimas metu. Medžiagoje terminių procesų metu įtempiai pasiskirsto nevienodai.

Analizuojant suvirinimo metu susidariusius įtempius matyti, kad stabiliausiai įtempiai pasiskirsto siūlės ašies kryptimi. Vienu ėjimu suvirintose jungtyse, be išilginių įtempių (σ_x), susidaro skersiniai (σ_y) ir tangentiniai (τ_{xy}) įtempiai. Storose siūlėse liekamieji įtempiai priklauso nuo suvirinimo būdo

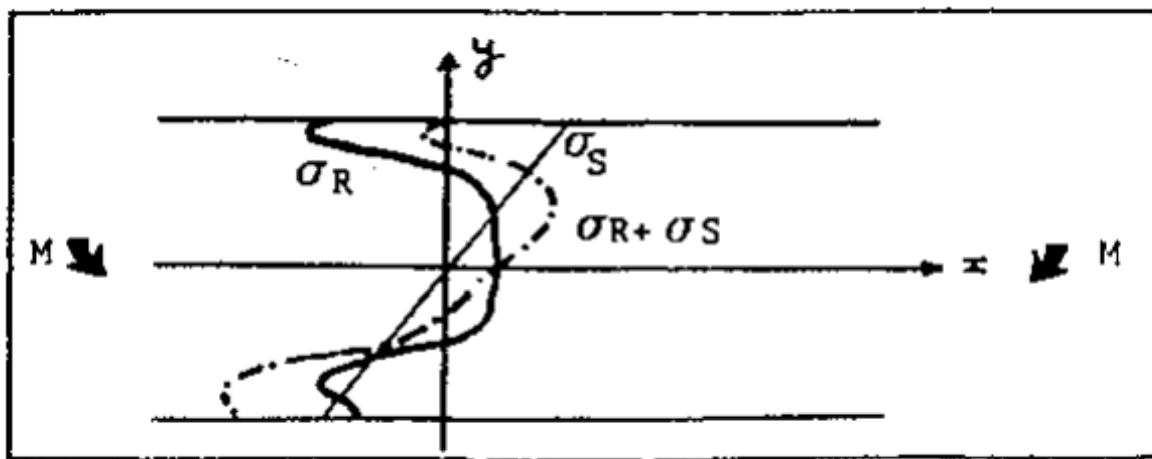
ir sluoksnių eiliškumo. Dėl kiekvieno virinamo sluoksnio didėja užvirintos dalies išlinkimas ir skersinis susėdimas. Dėl šių priežasčių šaknyje atsiranda liekamieji tempimo įtempiai. Jei suvirinimo siūlė virinama ant standžiai įtvirtintos plokštės, tai kiekvieno naujo sluoksnio šaknyje didėja gniuždymo įtempiai (Bendikas 2003).

Terminiu būdu ant metalo paviršiaus dengiant dangas (galvanizuojant, CVD, PVD) susidaro liekamieji įtempiai, kurie gali turėti priešingus ženklus, gali būti dideli ir netolygiai pasiskirstę konstrukcijoje. Svarbu tai, kad liekamieji įtempiai būdingi dangoms, sudarytoms visais įmanomais būdais. Dengiant dangas liekamųjų įtempių dydžiui didžiausią poveikį turi tokie veiksniai kaip metalo paviršiaus paruošimas, dangos ir pagrindinio metalo temperatūrinio linijinio plėtimosi koeficientai, struktūrinių fazių tūrių pokytis, konstrukciniai dengiamų detalių ypatumai (Valiulis 2005).

Statant bet kokią konstrukciją, būtina atsižvelgti į dėl mechaninių, terminių ar struktūrinių procesų metu atsiradusius liekamuosius įtempius bei nustatyti konstrukcijos apkrovas.

1.1.3. Įtempių poveikis konstrukcijai

Konstrukcijoje esančius tamprius liekamuosius įtempius (σ_R) sutapatinus su darbiniais įtempiais (σ_S), gaunami tikrieji konstrukciją veikiantys įtempiai $\sigma_R + \sigma_S$ (1.7 paveikslas). Suminius įtempius būtina įvertinti prieš eksploatuojant konstrukciją, nes dėl šių įtempių konstrukcija gali patirti vietinę perkrovą ir spontaniškai suirti (Totten 2002).



1.7 pav. Įtempių pasiskirstymas konstrukcijoje

Siekiant pagerinti konstrukcijos medžiagos mechanines savybes, taikomas baigiamasis paviršiaus apdirbimas (šūvinis pakalimas, šlifavimas, poliravimas). Taikant baigiamąjį paviršiaus apdirbimą, sukeliami liekamieji gniuždymo įtempiai, kurie konstrukcijoje pakeičia vietinius įtempius.

Įtempiai koncentruojasi ties metale esančiais defektais, kurie sudaro galimybę įtrūkiams susidaryti ir plisti konstrukcijos metalu. Defektų, koncentruojančių įtempius, atsiradimo priežastys įvairios, tačiau juos galima suskirstyti į tris pagrindines grupes (Tall 1991):

- medžiagos defektai – poros, šlako dalelės, intarpai, trapios dalelės;
- detalių gamybos metu atsirandantys defektai – įbrėžimai, įkirtimai, suvirinimo siūlės, apdirbimo pjovimu žymės;
- konstrukcijų matmenų defektai – įtempių koncentratoriai dėl neteisingo užapvalinimo spindulio arba staigaus skerspjūvio pakitimo (Žiliukas 2009).

Įtempiai silpnina ir pažeidžia konstrukciją, nes turi įtakos įvairioms medžiagos charakteristikoms (Lu 1988).

Įtempiai daro didelį poveikį medžiagos atsparumui nuovargiui. Atsparumas nuovargiui vertinamas statinius įtempius sutapatinus su konstrukciją veikiančiais cikliniais įtempiais. Kai konstrukcijoje statiniai įtempiai (σ_M) didėja, nuovargis atsparumui mažėja. Šią savybę geriausiai apibūdina Haigo ir Goodman diagramos.

Įtempiai taip pat turi įtakos nuovargiui, po kurio formuojasi trapus suirimas. Medžiagos gamybos, surinkimo ar apdorojimo metu atsiranda įvairūs defektai – įbrėžimai, paviršiaus netolygumas, poros, cheminės sudėties nevientisumas, struktūriniai nevienodumai. Konstrukcijoje susidarę įtempiai koncentruojasi ties medžiagoje esančiais defektais ir net mažiausias įtempių pasikeitimas, dėl kurio liekamųjų įtempių vertė pasieks kritinę įtempių ribą (σ_f^*), gali inicijuoti įtrūkio atsiradimą ir staigų jo plitimą. Dėl šios priežasties liekamieji įtempiai yra ypač pavojingi itin apkrautoms konstrukcijoms bei konstrukcijoms, dirbančioms žemoje temperatūroje.

Dėl įtempių galimi ir korozijos įtrūkiai. Korozijos įtrūkiai yra mechaninių ir cheminių įtrūkių formavimosi priežastis. Korozijos įtrūkiai gali sukelti metalo irimą kartu veikiant tempimo įtempiams ir esant korozijos poveikiui. Šie įtrūkiai yra tarpkristaliniai ir gali plisti beveik visose medžiagose. Siekiant apsaugoti konstrukciją nuo korozinių įtrūkių, įvedami liekamieji gniuždymo įtempiai.

Naudojant plazminį dangų purškimo metodą susidaro aukšti liekamieji įtempiai, kurie išsidėsto dangoje ir jos posluoksnyje. Dėl šios priežasties liekamieji įtempiai turi poveikį dangų adhezijai. Liekamieji makro įtempiai susidaro dėl skirtingos paviršių temperatūros bei dėl skirtingų posluoksnių ir dangos mechaninių ir fizikinių savybių. Šie įtempiai paveikia mechaninę ir termomechaninę dangų elgseną.

Neišvengiamai įtempiai daro poveikį ir medžiagos stiprumui, trinčiai bei dilimui. Trinties ir dilimo savybes lemiantys įtempiai dažnai slepiasi po kitais parametrais: kietumo padidėjimas apdirbimo metu, stiprumo pokytis. Dilimui atsparių dangų sukibimas dėl įtempių gali žymiai paveikti atsparumą trinčiai.

1.1.4. Įtempių nustatymo metodai

Visi įtempių matavimo metodai paremti tampriosios deformacijos matavimu. Iš tampriosios deformacijos dydžio yra apskaičiuojami įtempiai. Įtempiams nustatyti taikomi ardomieji, pusiau

ardomieji ir neardomieji metodai (Leaf 1952). Pagal bendrus įtempių matavimo principus, įtempių matavimo metodai skirstomi į keletą pagrindinių grupių.

Dažniausiai įtempiams tirti yra naudojama skylės gręžimo technologija. Bandinio paviršiuje yra gręžiama skylė ir matuojami pakitę įtempiai. Skylės skersmuo ir gylis būna tik keli milimetrai, todėl kai kurių autorių šis būdas vadinamas pusiau ardомуoju metodu. Šis metodas dažnai naudojamas dėl mažų tyrimo kaštų, didelio tikslumo ir nesudėtingos matavimo technologijos (Žiliukas 2009).

Ultragarsinis metodas – pagrįstas akustinio tamprumo efektu, kai tampriosios bangos sklidimas kietajame kūne priklauso nuo mechaninių įtempių esančių tame kūne. Ultragarsiniu metodu tikslinga matuoti įtempius, kai žinomos medžiagos mechaninės savybės bei išilginės bangos sklidimo greitis. Šiems tyrimams atlikti naudojamos paviršinės išilginės bangos (PIB), kurių fazinis greitis yra lygus išilginių bangų greičiui. Įtempių matavimui ypač svarbi PIB savybė – tai jos išspinduliavimas. PIB, sklisdama netgi laisvuoju paviršiumi, išspinduliuoja šonines skersines tūrines bangas, tolstančias nuo paviršiaus gilyn į kūną, todėl PIB banga praranda dalį savo energijos ir slopsta (Walaszek 2002).

Difrakcinis metodas. Dažniausiai naudojama rentgeno spindulių difrakcija. Rentgeno spindulių difrakcijos metodas matuoja tarp atomų esantį tarpelį, kuris yra tamprumo deformacijos indikatorius bandinyje. Įtempių dydis yra nustatomas žinant medžiagos tamprumo modulį, iš kristalo tamprumo deformacijos darant prielaidą, kad įtempiai yra proporcingi deformacijoms. Rentgeno spindulių difrakcija gali išmatuoti tik liekamuosius paviršinius įtempius 50-100 μm gylyje. Iš difrakcijos atspindžio nustatomas įtempių dydis ir kryptis (French 1969).

Taip pat naudojama ir neutronų difrakcija, kuri gali išmatuoti įtempių sukurtas plastines deformacijas visame gaminio tūryje su taško skiriamąją geba mažesne kaip 1 mm^2 . Šis metodas yra neardomasis, nes leidžia tirti gaminį neišpjaunant bandinių ir neatliekant paviršinių sluoksnių šalinimo. Neutronų difrakcijos metodas turi ir trūkumų – įtempiai sunkiai apskaičiuojami, kai neįtempto būvio tarpatominis tarpas konkrečiam deformacijos matavimo taške yra nežinomas, todėl matavimuose gali būti daug įvairių klaidų. Be to šis metodas reikalauja didelių laiko sąnaudų, o atlikimas brangus. Liekamųjų įtempių matavimas neutronų metodu yra standartizuotas (French 1969).

Magnetinis metodas. Nustatant tikruosius konstrukcijų įtempius naudojamas magnetinės metalo atminties metodas, nes dauguma feromagnetinių konstrukcijų ir metalo gaminių įsimagnetina žemės magnetiniame lauke. Magnetinio tamprumo efektas sukelia liekamosios indukcijos augimą. Jeigu kurioje nors konstrukcijos vietoje veikia ciklinė apkrova ir yra išorinis magnetinis laukas, tai toje vietoje atsiranda liekamosios indukcijos pokytis ir lieka įsimagnetinimas (Abuku 1971).

Skaitinis metodas. Šiuo metu plačiausiai naudojamas skaitinis baigtinių elementų metodas. Nustatant įtempius pasitelkiamos kompiuterinės programos, kurios analizuoja 2D ar 3D modelius.

Be šių metodų taip pat naudojami elektrinės varžos matavimo ir optinis metodai.

Visgi įtempius konstrukcijose yra sunku rasti, o dar sunkiau nustatyti tikslų jų dydį, todėl iki pat šių dienų įtempių tyrimai yra mokslinių darbų epicentre.

Šiame darbe įtempiai bus nustatinėjami ultragarsiniu metodu, naudojant paviršines išilgines bangas (PIB savybės ir pritaikymo galimybės aptariamos 1.2 skyriuje).

1.1.5. Įtempių stabilizavimo metodai

Metalo konstrukcijų gamybos standartuose nurodyta, kad, norit prailginti konstrukcijos darbo laiką po metalo mechaninių ar terminių procesų būtina atlikti įtempių atpalaidavimą. Įtempių atpalaidavimo metu tamprūs liekamieji įtempiai (σ_e) gali pasikeisti į mikro plastinius įtempius (σ_p). Šis pasikeitimas galimas dislokacijų poslinkio, dislokacijų šliaužimo, grūdelių sienelių slinkimo ir difuzinio valkšnumo dėka (Kulikauskas 1997).

Vidinių įtempių mažinimo technologijų yra daug, tačiau šiuos metodus galima kvalifikuoti į šias grupes (Lihavainen 2004):

a) mechaniniai metodai:

- pakalimo metodai (pakalimas plaktuku, šūvinis, adatinis ir ultragarsinis pakalimai);
- perkrovos metodai (pirminės ar vietinės apkrovos);

b) įtempių atleidimo metodai:

- terminis įtempių atleidimas;
- vibracinis įtempių atleidimas;
- taškinis pakaitinimas;
- įtempių atleidimas detonacija.

Mechaninis įtempių mažinimo būdas gali būti atliekamas šūvinio pakalimo metu, kai gaminio paviršius bombarduojamas mažais apvaliais šratais. Šratai susidurdami su paviršiumi, nežymiai jį deformuoja. Gaminyje susidaro gniuždymo įtempiai paviršiuje ir popaviršiniai tempimo įtempiai. Šį efektą galima pasiekti ir metalo paviršiaus pakalimu. Paviršiniai gniuždymo įtempiai mažina įtrūkių atsiradimo tikimybę ir didina atsparumą nuovargiui. Šis metodas naudojamas nelegiruotų ar mažai legiruotų metalų paviršių liekamiesiems įtempiams sumažinti (Bendikas 2001).

Taip pat šiai grupei priskiriamas ir ultragarsinis pakalimas, kuris naudojamas liekamųjų įtempių suvirinimo siūlėje mažinimui. Šis metodas suformuoja tolygų prilydyto metalo perėjimą į pagrindinį metalą. Ultragarsinis pakalimas gali būti naudojamas siekiant pagerinti nuovargio stiprumą bei korozinį atsparumą.

Įtempių atleidimas dažniausiai atliekamas **terminiu būdu**. Nors terminis apdorojimas taikomas dažniausiai, tačiau jis reikalauja didelių energijos resursų ir didelių darbo sąnaudų.

Terminio apdirbimo metu metalas yra įkaitinamas iki tam tikros temperatūros, joje išlaikomas ir aušinamas tam tikru greičiu. Terminio apdirbimo kokybę lemia trys pagrindiniai parametrai: kaitinimo temperatūra, išlaikymas toje temperatūroje ir aušinimo greitis. Taikomi keturi terminio apdirbimo būdai (Kulikauskas 1997):

- atkaitinimas – lėčiausias plieno, įkaitinto iki austenitinės sandaros, aušinimas atliekamas kartu su krosnimi. Gaunamas minkštas, plastiškas, nestiprus ir be liekamųjų įtempių stabilios sandaros plienas;
- normalizavimas – įkaitinto iki austenitinės sandaros plieno aušinimas ore. Gaunama struktūra yra kietesnė, stipresnė ir geresnio smūginio tūsumo nei po atkaitinimo;
- grūdinimas – staigus plieno, įkaitinto iki austenitinės sandaros, aušinimas. Gaunamas kietiausias, atsparus dilimui, stiprus ir trapus plienas;
- atleidimas – pakaitinimas po grūdinimo, nepasiekiant austenizacijos temperatūros. Šis būdas priklauso nuo norimų gauti galutinių plieno savybių. Kai įkaitinama iki 200°C išlieka grūdinimo savybės, tik sumažėja grūdinimo įtempiai; įkaitinus iki 650°C sumažėja grūdinimo metu įgytas stiprumas bei kietumas, susidaro didžiausias smūginis tūsumas.

Terminis apdorojimas atliekamas įvairiais būdais, priklausomai nuo konstrukcijos dydžio ir konfigūracijos. Jei konstrukcija yra kilnojama, terminis apdorojimas gali būti atliekamas kaitinimo krosnyse. Jei konstrukcijos matmenys dideli ir neįmanoma atlikti terminio apdorojimo krosnyje, atliekamas taškinis pakaitinimas. Taškinis pakaitinimas lokalizuoja įtempius tik kaitinimo zonoje. Šis metodas gali būti atliekamas deguonies – acetileno dujų liepsnos degikliais, lanksčiais varžiniais kaitinimo kilimėliais ar indukcinių ričių pagalba.

Pagrindiniai terminio apdorojimo trūkumai – dideli energijos kaštai, ilgas apdorojimo laikas, didelėms konstrukcijoms atleisti reikia erdvių krosnių bei papildomų transporto išlaidų. Taip pat mažėja terminiu būdu paveiktos vietos stiprumas bei kietumas.

Dabartiniu metu populiarėjantis metodas yra **vibracinis įtempių atleidimas**. Šio būdo tikslas yra mažinti liekamuosius įtempius, juos perskirstyti į nepavojingus lygmenis ir užtikrinti ilgalaikę stabilizaciją. Vibracinis atleidimas naudingas tik tada, kai nėra būtinumo keisti medžiagos kristalinės struktūros ar mechaninių savybių.

Gali būti naudojamas rezonansinis, sub-rezonansinis ir sub-harmoninis įtempių atleidimo būdas. Rezonansinis vibracinis apdorojimas atliekamas vibruojant gaminį jam būdingu rezonansiniu dažniu ir stipriai keičiant apkrovas. Kai naudojama įranga yra nepajėgi pasiekti ir išlaikyti gaminio rezonansinio dažnio, naudojamas sub-rezonansinis vibracinis apdorojimas. Sub-harmoninis vibracinis įtempių atleidimo procesas paremtas ciklinės gaminio apkrovos vibracija, kai vibruojama žemesniu nei gaminio rezonanso dažniu (Jurčius 2010).

Vibracinis įtempių atleidimas gali stabilizuoti įtempius bet kuriame konstrukcijos gamybos etape be jokių medžiagos metalurginių pakitimų, nuodegų, spalvos pasikeitimo, gaminio geometrinės formos iškraipymo ir plastinio deformavimo.

Atliekant įtempių tyrimą PIB metodu naudojamas terminis liekamųjų įtempių atkaitinimo būdas.

1.2. Ultragarsinės paviršinės išilginės bangos, jų savybės, panaudojimo galimybės, sužadinimo būdai

Ultragarasas – tai elastingės bangos, kurių sklaidimo dažnis didesnis už žmogaus girdos viršutinę ribą (15-20 kHz). Ultragarso dažnių diapazonai skirstomi į tris grupes: žemo dažnio <100000 Hz; vidutinio dažnio – 100000-10000000 Hz; aukšto dažnio – 10000000-1000000000 Hz.

Kietuosiuose kūnuose sklinda išilginės ir skersinės ultragarso bangos, o dujose ir skysčiuose tik išilginės bangos. Ultragarso bangos medžiagoje sklinda kryptingai, kryptis priklauso nuo medžiagos geometrinės akustikos. Bangos sklaidimo greitis priklauso nuo tiriamos medžiagos tankio ir tamprumo. (Gargasas 2011).

Ultragarsiniuose tyrimuose gali būti naudojami įvairūs ultragarsinių bangų tipai: išilginės, paviršinės ir skersinės (šlyties) bangos.

Išilginės ultragarsinės bangos pasižymi didžiausiu sklaidimo greičiu, kuris kietoms medžiagoms nustatomas naudojant tūrinio tamprumo modulį B ir medžiagos tankį ρ (Marcinkiewicz 2010):

$$c_t = \sqrt{\frac{B}{\rho}}. \quad (1.2)$$

Skersinių bangų greitis yra mažesnis, nei išilginių bangų greitis ir jį galima nustatyti pakeitus 1.2 formulėje esantį tamprumo modulį B į šlyties modulį μ (Marcinkiewicz 2010):

$$c_n = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}. \quad (1.3)$$

Paviršinių bangų greitis yra mažesnis, nei skersinių bangų, tačiau šioje bangoje dalelė atlieka skersinį ir išilginį svyravimą, kuris gęsta pasiekus didesnę gylį.

$$p = 2 \cdot \lambda_{\text{pav}}. \quad (1.4)$$

Šiame skyriuje aptariamos tik ultragarsinės paviršinės išilginės bangos, jų atsiradimas, esminės savybės, analizuojamos sužadinimo ir pritaikymo galimybės.

1.2.1. Paviršinė išilginė ultragarsinė banga

XIX a. pabaigoje buvo atrastos ultragarsinės paviršinės akustinės bangos (PAB). PAB bangos neslopdomos sklinda laisvame kietojo kūno paviršiuje. Kadangi PAB bangų fazinis sklaidimo greitis

nepriklauso nuo dažnio, o slopinimas idealiaame kietajame kūne lygus nuliui, šios bangos pritaikytos neardomiesiems bandymams medžiagotyroje, akustoelektronikoje ir naudojamos seisminėje žvalgyboje.

1972 m. Lietuvos mokslininkė L. Sereikaitė-Juozonienė atrado ir aprašė naujo tipo paviršinės akustinės bangas. Atrastos bangos iš esmės skiriasi nuo kitų PAB bangų, nes sklidimo metu vyrauja išilginė (tangentinė) virpesių dedamoji. Dėl šios priežasties atrastos bangos pavadintos paviršinėmis išilginėmis bangomis (PIB).

Ilgą laiką paviršinės išilginės bangos (PIB) buvo vertinamos prieštaringai dėl šioms bangoms būdingo prigimtinio slopimo. Tačiau, kad ir kiek būtų kritikų, šiuo metu PIB bangos intensyviai tiriamos ir bandoma jas pritaikyti neardomiesiems gaminių bandymams, panaudojant PIB savybes leidžiančias tirti šiurkščius ar kitaip apdorotus paviršius.

Paviršinės išilginės bangos (PIB), dėl savo savybės sklisti negiliai prie kietojo kūno paviršiaus („šliaužti“), užsienio literatūroje dažnai vadinamos vok. *Kriechwellen*, angl. *creeping waves*. Rusų terminijoje vartojami dar kitokie PIB pavadinimai, kurie nurodo PIB bangos savybes. Tarkim, terminu rus. *vytekajuščijiesia volny* (angl. *leaky waves*), – išsispinduliuojančios bangos, nusakoma jų savybė savo kelyje Briusterio kampu spinduliuoti šonines skersines bangas. O terminu rus. *golovnyje* nusakoma jų savybė sklisti didžiausiu faziniu greičiu, t. y. būti priekyje.

1.2.2. PIB bangų savybės

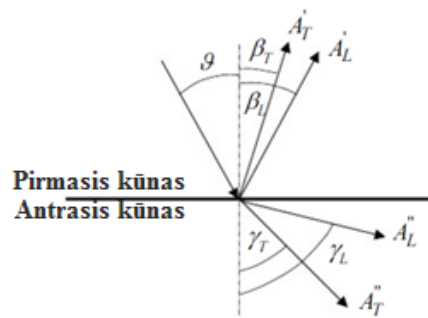
Siekiant geriau išanalizuoti paviršinės išilginės bangas aptariamos šių bangų savybės, lyginant jas su Reilėjaus paviršinėmis skersinėmis bangomis (PSB).

Paviršinėje išilginėje bangoje materialių dalelių virpesių išilginė dedamoji ξ_t PIB didesnė nei skersinė ξ_n PIB (priešingai nei Reilėjaus bangoje, kurioje skersinė virpesių dedamoji ξ_n PSB yra didesnė nei išilginė ξ_t PSB). Šis esminis skirtumas lemia ir visas specifines PIB savybes – šliaužiamąjį sklidimo pobūdį, didžiausią sklidimo greitį, prigimtinį slopinimą, persispinduliuojamą į turinę skersinę bangą, taip pat ir svarbiausią specifinę ypatybę – kitokias nei PSB sužadinimo sąlygas (Sajauskas, 2002).

Teoriškai PIB ir PSB aprašytos nagrinėjant tūrinių išilginių bangų lūžį kietajame kūne. Kai krintančioji banga yra plokščia ir nedifraguoja, riboje tarp dviejų kūnų atsiranda išilginių ir skersinių bangų. Išilginės bangos visiško atspindžio kritimo kampas vadinamas pirmuoju kritiniu kampu ϑ_{kr}^I (1.8 pav.). ϑ_{kr}^I priklauso nuo išilginių bangų greičio pirmajame kūne (c_L') ir išilginių bangų greičio antrajame kūne (c_L''). ϑ_{kr}^I nustatomas pagal 1.4 formulę:

$$\vartheta_{kr}^I = \arcsin\left(\frac{c_L'}{c_L''}\right) \quad (1.4)$$

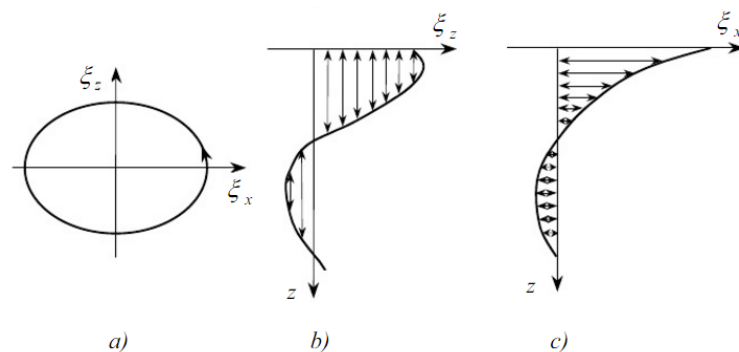
Pirmuoju kritiniu kampu kritusi išilginė banga, šliauždama išilgai antrojo kietojo kūno paviršiumi, sužadina jame PIB.



1.8 pav. PIB bangos lūžis antrame kietajame kūne

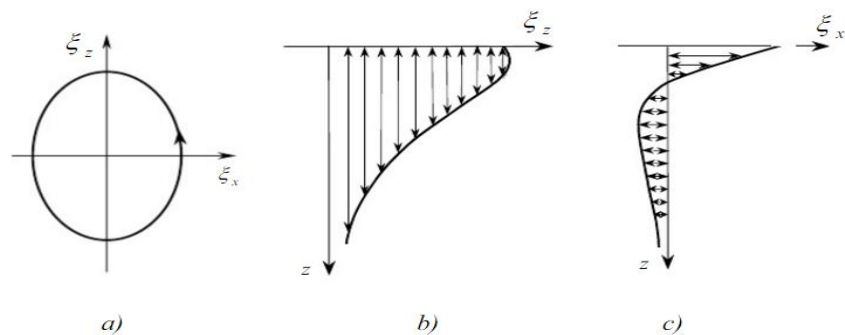
Fazinio greičio c_{PIB} pobūdis rodo, kad PIB banga net idealiame kūne yra slopstanti paviršinė banga. Prigimtinį PIB slopinimą sukelia skersinių bangų išspinduliavimas į kietąjį kūną, sklindant išilgai jo paviršiumi. PIB slopinimo koeficientas priklauso nuo medžiagos Puasono koeficiento μ . Kai $\mu > 0,26$, tada didėjant Puasono koeficientui, didėja ir PIB bangos slopinimo koeficientas (Sajauskas 2010).

Kai PIB banga sklinda kietojo kūno paviršiaus sluoksniu, galima nustatyti dalelių virpėjimo greičių dedamąsias x ir z ašimis (1.9 pav.).



1.9 pav. PIB virpėjimo greičio dedamosios b) x ašimi; c) z ašimi

PIB, sklindanti idealiame izotropiniame kietajame kūne, juda elipsės trajektorija, kurios ilgoji ašis nukreipta lygiagrečiai paviršiui (tangentinė virpesių dedamoji ξ_x yra didesnė už normalinę ašių dedamąją ξ_z). PIB įsiskverbimo gylis z ašies kryptimi yra ne didesnis nei $2\lambda_L$. Dėl šios priežasties visa PIB energija yra sukoncentruota tam tikro storio sluoksnyje prie kietojo kūno paviršiaus, bet neviršija paviršinės bangos ilgio. PSB idealiame izotropiniame kūne sklinda kitaip nei PIB. PSB materialusis paviršiaus taškas juda elipsine trajektorija, bet jos ilgoji ašis yra statmena paviršiui (priešingai nei PIB) (1.10 pav.). PSB normalinių virpesių amplitudė didesnė nei tangentinių.



1.10 pav. PSB virpėjimo greičio dedamosios b) x ašimi; c) z ašimi

Visos PIB ir PSB pagrindinės savybės pateiktos 1.2 lentelėje, leidžia suvokti šių bangų skirtumus, lemiančius jų panaudojimo sritis ir naudingumą įvairiems akustikos uždaviniams spręsti.

1.2 lentelė. PIB IR PAB bangų savybės

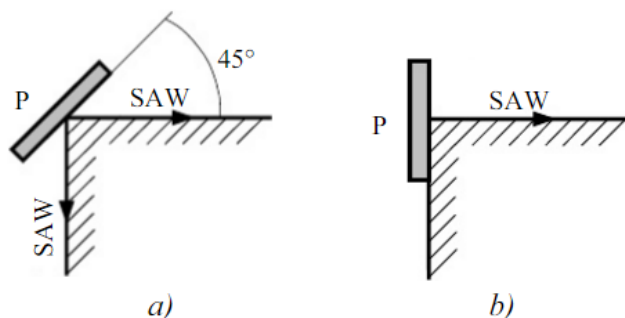
Eil. Nr.	Savybė	Paviršinė išilginė banga (PIB)	Reilėjaus paviršinė skersinė banga (PSB)
1.	Kampinio sužadavimo sąlygos	$\vartheta_{\max} = \vartheta_{\text{kr}}^{\text{I}}$	$\vartheta_{\max} = \vartheta_{\text{kr}}^{\text{II}}$
2.	Sklidimo pobūdis: • kryptis • lokalizacija • slopimas • bangos sąveika su paviršiumi		
		$\alpha_{\text{PIB}} > 0$, kai $0,26 < \mu < 0,5$; $\alpha_{\text{PIB}} \rightarrow 0$, kai $\mu \rightarrow 0$.	$\alpha_{\text{PSB}} = 0$.
		silpna	stipri
3.	Dalelių virpesių trajektorija	Elipsė kurios ilgoji ašis statmena paviršiui.	Elipsė kurios ilgoji ašis lygiagreti su paviršiumi.
4.	Paviršiaus dalelių virpesių dedamosios	$\xi_x > \xi_z$	$\xi_z > \xi_x$
5.	Fazinis greitis	$C_{\text{PIB}} \approx C_L$	$C_{\text{PSB}} \approx C_T$
6.	Virpesių amplitudės kitimo pobūdis, tostant nuo paviršiaus	Eksponentinis slopimas, įsiskverbimo gylis $z_{\text{PIB}} _{\xi_{\text{zo}}} \approx \lambda_{\text{PIB}} > \lambda_{\text{PSB}}$	Eksponentinis slopimas, įsiskverbimo gylis $z_{\text{PSB}} _{\xi_{\text{zo}}} \approx \lambda_{\text{PSB}} > \lambda_{\text{PIB}}$

1.2.3. PIB sužadinimo būdai

Izotropiniame kūne PIB gali būti sužadinamos kaip ir paviršinės skersinės bangos, tačiau sužadinimo efektyvumas skiriasi. Kadangi PIB būdingas prigimtinis slopinimas, tai šių bangų sužadinimui būtina naudoti efektyviausius metodus ir jautriausius ultragarso keitiklius.

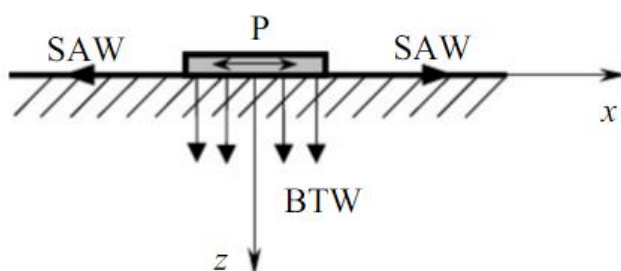
Paviršinių išilginių bangų sumažinimo metodai (Sajauskas 2002):

- sužadinimas X pjūvio kvarco pjezoplokšte, kuri priglauta prie kietojo kūno briaunos (1.11 pav.) – X pjūvio kvarcą galima priglausti prie gaminio stačiojo kampo briaunos 45^0 arba 90^0 kampu. Pavyksta sužadinti tik labai silpną PIB, nes tik maža pjezoplokštelės dalis pavirsta paviršinės išilginės bangos energija;



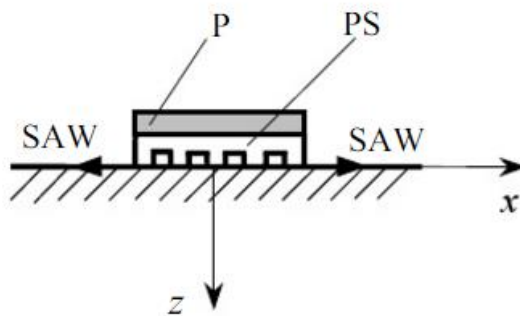
1.11 pav. PIB sužadinimas X – pjūvio kvarco pjezoplokšte

- sužadinimas Y pjūvio kvarco plokšte, turinčia akustinį kontaktą su paviršiumi (1.12 pav.) – Y pjūvio kvarco plokštelė kontaktuoja su kietojo kūno paviršiumi per klampųjį skystį. Sužadinamos dvi paviršinės akustinės bangos, kurių kryptys priešingos. Didžiausia energijos dalis tenka tūrinėms skersinėms bangoms, todėl toks PIB sužadinimo būdas neefektyvus;



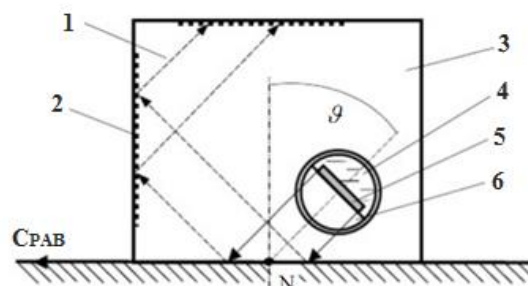
1.12 pav. PIB sužadinimas Y – pjūvio kvarco plokšte

- sužadinimas virpančia periodine linijine struktūra (1.13 pav.) – paviršinės išilginės bangos sužadinimui naudojamas PAB keitiklis, kuris sudarytas iš pjezoplokštelės ir periodinės linijinės struktūros. Naudojamų jutiklių energetinis efektyvumas mažas dėl atsirandančių nuostolių, kuriuos lemia difracinių tūrinių bangų spinduliavimas į kietojo kūno vidų. Be to, vienu metu sužadinamos PIB ir PSB, todėl prarandama akustinė energija;



1.13 pav. PIB sužadimas virpančia periodine linijine struktūra

- sužadimas kampiniu metodu – PIB sužadinti naudojami imersiniai, kampiniai ar keičiamo kampo keitikliai (1.14 pav.). Lyginant šiuos keitiklius tarpusavyje nustatyta, kad efektyviausi yra keičiamo kampo keitikliai, nes galima tiksliausiai nustatyti PIB ir PSB tiksliausius sužadimo kampus. Šie keitikliai itin naudingi neardomiems bandymams ir matavimams, pakaitomis naudojant PIB ir PSB bangas;



1.14 pav. PIB kampinio keitiklio konstrukcija: 1 – pašalinės tūrinės bangos; 2 – tūrinės akustines bangas sklaidanti paviršinė struktūra; 3 – organinio stiklo prizmė; 4 – cilindrinė kiuvetė su akustiniu kontaktiniu skysčiu; 5 – pjezoelementas; 6 – sukamas pjezoelemento laikiklis

- sužadimas elektromagnetiniu akustiniu metodu – sukuriamas kintamas magnetinis laukas metalo paviršiuje, kuris sukuria sūkurines sroves. Sūkurinės srovės sąveikauja su pastoviu magnetiniu lauku ir sužadina PAB. Metodas plačiai naudojamas geležinkelio bėgių ir vagonų ratų neardomiesiems bandymams atlikti. Šio metodo trūkumai – mažesnis jautrumas lyginant su pjezoelektriniais jutikliais, mažas atsparumas elektromagnetiniams trikdžiams;

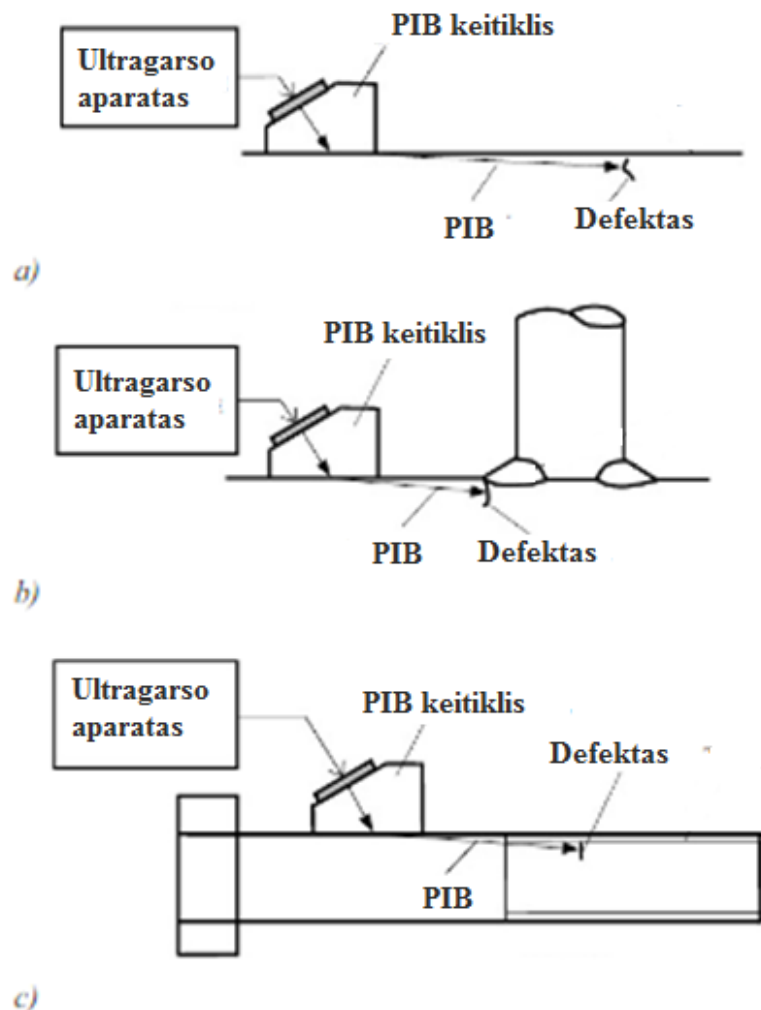
- sužadimas termoakustiniu metodu – sukuriama dideli temperatūros ir mechaninių įtempių gradientai, kurie sukelia deformacijas metalo. Deformacijos sklinda ultragarso bangų pavidalu. Šiuo metodu galima atlikti tyrimus per tam tikrą atstumą nuo bandinio ar netgi per esančią terpę. Tačiau didžiausias metodo trūkumas toks, kad sužadinamos tūrinės išilginės ir skersinės bangos, kurios gali sutapti, sumuotis su PIB ir PSB. Metodas naudojamas neardomiems bandymams agresyvioje aplinkoje ar vakuume.

Eksperimentiniame tyrime PIB bangai sužadinti, naudojamas kampinis metodas (keičiamo kampo keitikliai), nes šis būdas efektyviausias dėl galimo kampo keitimo.

1.2.4. PIB panaudojimo galimybės

PIB jau nuo seno fiksuojamos seismografuose kaip galinga griauinančioji mechaninė energija, tačiau mokslininkai išvelgia galimybę šias bangas panaudoti įvairiose sferose. Iki šiol yra atliekami paviršinių išilginių bangų tyrimai ir plečiamos jų pritaikymo galimybės.

Viena iš pritaikymo sričių – neardomieji bandymai (1.15 pav.). PIB neardomuosiuose bandymuose naudojamos dėl jų išskirtinių savybių, kurių neturi Reilėjaus bangos. Viena iš svarbių savybių yra fazinis greitis: PSB greitis yra artimas skersinių bangų greičiui, o PIB – išilginių bangų greičiui.



1.15 pav. PIB panaudojimo galimybės: a – paviršiaus defektų nustatymui; b – suvirinimo siūlių defektų nustatymui; c – sriegių defektų nustatymui

PIB metodu galima nustatyti konstrukcijoje esančius defektus ir jų vietą. Naudojant PIB metodą tiriami suvirinti sujungimai ir nustatomi susidarę įtrūkiai. PIB galima panaudoti ir sriegių defektams nustatyti.

Išmatavus PIB ir PSB tūrinių išilginių ir skersinių bangų fazinius greičius medžiagoje, galima nustatyti vidinių defektų koordinates ir medžiagos tamprumo koeficientus, medžiagos paviršiaus kietumą.

Taip pat PIB metodu galima nustatyti ir liekamuosius įtempius medžiagoje, bet apie tai plačiau kitame skyriuje.

1.2.5. PIB metodas liekamųjų įtempių nustatymui

PIB metodas liekamųjų įtempių matavimui yra paremtas akustinio tamprumo efektu. Kadangi ultragarso bangos yra tampriosios, todėl sklisdamos kietuoju kūnu keičia savo sklidimo greitį priklausomai nuo susidariusių įtempių.

Visuose izotropiniuose kūnuose skleidžiamos tampriosios išilginės paviršinės bangos charakterizuojamos kaip jų sklidimo greitis kietuoju kūnu. Ultragarsinių bangų sklidimo greitis įvairiose medžiagose yra skirtingas ir priklauso nuo medžiagos tankio ir tamprumo koeficiento. Dažniausiai naudojamų medžiagų tampriųjų bangų greitis pateiktas 1.3 lentelėje.

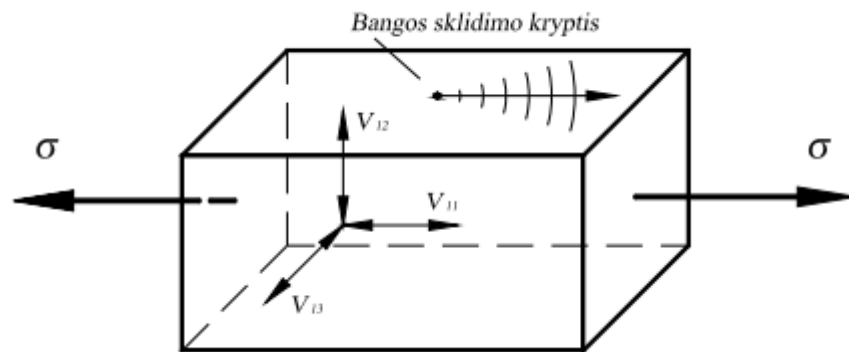
1.3 lentelė. Ultragarsinių bangų sklidimo greitis

Medžiaga	Tankis $\rho \cdot 10^{-3}$, kg/m ³	Bangų sklidimo greitis c, m/s		
		Išilginių	Skersinių	Paviršinių
Aluminis	2,7	6260	3080	1690
Berilis	1,82	1280	8710	2330
Auksas	19.3	3240	1200	1200
Bronza	8,5-8,9	3500-3800	2300-2500	2100-2300
Geležis	7,8	5910	3230	3000
Varis	8,9	4660	2260	2260
Korozijai atsparus plienas	8,03	5660	3120	3100
Anglingas plienas	7,80	5900	3260	3000
Cinkas	7,1	4170	2410	2380

Taigi, dėl susidariusių liekamųjų įtempių medžiagoje, atsiranda PIB greičio pokytis, kuris priklauso nuo įtempių krypties (išilginiai ar skersiniai įtempiai) (1.16 pav.). Iš 1.5 formulės matyti, kad ultragarsinės bangos sklidimo greičio pokytis yra proporcingas įtempiams. Šios proporcijos konstanta yra koeficientas A_{11} , kuris priklauso nuo tiriamos medžiagos mikrostruktūros ir esamų liekamųjų įtempių (Jurčius 2010).

$$\frac{dV}{V} = A_{11} d\varepsilon = \frac{A_{11}}{E} d\sigma; \quad (1.5)$$

Liekamųjų įtempių dydis išreiškiamas proporcingumo koeficientu (A_{11}), kuris gali būti apskaičiuojamas arba nustatomas atliekant eksperimentus, kuriuose naudojama vienašė arba dviašė apkrova.



1.16 pav. Tampriosios bangos sklaidimas kietajame kūne

1.2.6. PIB metodo privalumai ir trūkumai

Literatūros analizės metu nustatyti PIB metodo privalumai:

1. Galima atlikti begalę matavimų skirtingose konstrukcijos vietose;
2. Metodas paprastas, pigus ir greitas;
3. Matavimo tikslumas priklauso nuo ultragarsinio defektoskopo tikslumo (gali būti iki 0,001 %);
4. Matavimams skirta įranga nesudėtinga, lengvai kilnojama;
5. Galima atlikti matavimus lauko sąlygomis.

Trūkumai:

1. Galima tirti tik tas gaminio vietas, kuriose nėra išsikišimų, duobių dėl kurių tampa neįmanoma uždėti abiejų PIB keitiklių ant paviršiaus;
2. Metodas ribotos rezoliucijos (taško rezoliucija 5 mm);
3. PIB yra jautri prispaudimo jėgai;
4. Metodas yra jautrus mikrostruktūros pokyčiams.

1.3. Pirmojo skyriaus išvados

Atlikus literatūros analizę galima teigti, kad:

1. Įtempiai daro įtaką konstrukcijos stabilumui, atsparumui nuovargiui, stiprumo ribai, irimui, dilimui ir koroziniams įtrūkiams.
2. Populiariausi įtempių mažinimo metodai: šūvinis pakalimas arba terminis atleidimas.
3. Dažniausiai įtempiai vertinami skylės gręžimo, rentgeno spindulių difrakcijos ir neutronų difrakcijos metodais.

4. Taikant PIB metodą, dėl ultragarso bangos akustinio tamprumo, galima nustatyti medžiagos mechanines – fizines savybes, dėl to – ir įtempius.

5. PIB pasižymi ypatingomis savybėmis: sklinda ne paviršiumi, o gilesniame sluoksnyje, slopsta, silpnai sąveikauja su paviršiumi, fazinis greitis artimas išilginių bangų greičiui.

6. PIB metodas nėra pripažintas Europos norminiuose dokumentuose kaip įtempių nustatymo metodas.

Atsižvelgiant į padarytas išvadas, iškeliamos pagrindinės eksperimentinio tyrimo sąlygos:

1. Tyrime nagrinėjami tempimo metu susidarę įtempiai ir liekamieji įtempiai.
2. Įtempiai nustatomi naudojant PIB metodą, nes ultragarsinė banga dėl savo akustinio tamprumo reaguoja į dėl liekamųjų įtempių pasikeitusią plieno struktūrą.
3. Nustatoma ultragarso bangos akustinio tamprumo konstanta, kai bandinių paviršiai po mechaninio (šratavimas, smėliavimas, dažymas) ir terminio (cinkavimas) apdorojimo;
4. Tiriamos termiškai krosnyje atleistos ir neatleistos metalo struktūros.

2. EKSPERIMENTINIO TYRIMO METODIKA

Įtempių dydžiui kietajame kūne nustatyti taikomas ultragarsinių paviršinių išilginių bangų metodas. Kadangi PIB sklinda ne kietojo kūno paviršiumi, o gilesniame jo sluoksnyje, tai kampiniais keitikliais sužadintai bangai mažesnę įtaką turi paviršiaus nelygumai ir šiurkštumas nei kitoms paviršinėms ultragarsinėms bangoms. Įtempių tyrimas paremtas PIB akustinio tamprumo konstantos nustatymu, esant skirtingiems konstrukcijos paviršiams ir susidariusiems įtempiams.

Išnagrinėti visus galimus paviršiaus paruošimus ir jų įtaką PIB sklidimui kietajame kūne yra labai sudėtingas ir daug darbo sąnaudų reikalaujantis procesas, todėl šiame darbe nagrinėjami tik dažniausiai pramoninėje gamyboje naudojami metalinių konstrukcijų paviršiaus paruošimo būdai. Tyrimui naudojamų bandinių žymenys pateikti 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Tiriamų bandinių kodavimo lentelė

Žymuo	Storis, mm	Įtempių atleidimas	Paviršiaus paruošimas
B1	14	Be atleidimo	Be paruošimo
B2	14	Be atleidimo	Smėliavimas
B3	14	Be atleidimo	Šratavimas
B4	14	Be atleidimo	Dažymas (iki 100 μm)
B5	14	Be atleidimo	Cinkavimas (iki 130 μm)
TB6	14	Terminis apdorojimas	Be paruošimo
TB7	14	Terminis apdorojimas	Smėliavimas
TB8	14	Terminis apdorojimas	Šratavimas
TB9	14	Terminis apdorojimas	Dažymas (iki 100 μm)
TB10	14	Terminis apdorojimas	Cinkavimas (iki 130 μm)

Siekiant išlaikyti kuo artimesnes medžiagos mechanines ir fizines savybes tarp bandinių, tyrimo metu plazminiu pjovikliu buvo išpjauti bandiniai iš to paties plieno lakšto. Penkiems bandiniams atliktas terminis apdorojimas, kad būtų visiškai panaikinti bandiniuose jau esantys liekamieji įtempiai. Tyrimo metu siekiama palyginti akustinio tamprumo konstantas tarp termiškai atkaitintų ir neatkaitintų bandinių.

Visų bandinių paviršiai apdoroti skirtingais, labiausiai pramoninėje gamyboje naudojamais būdais – be paruošimo, smėliavimu, šratavimu, dažymu, cinkavimu (2.1 paveikslas). Įtempiai ir jų kaita fiksuojama ultragarsiniu defektoskopu, naudojant PIB bangą generuojančius keičiamo kampo keitiklius. Pats tyrimas paremtas tempimo bandymu – bandiniai tempiami tempimo mašinos, apkraunant juos vis didesne jėga. Tyrimo metu siekiama kiekvienam bandiniui nustatyti akustinio

tamprumo konstantas, kurios leistų įvertinti realius įtempius konstrukcijos gamybos ir surinkimo aikštelėje



2.1 pav. Eksperimentiniam tyrimui naudojami bandiniai

2.1. Medžiagos parinkimas

Atliekant tyrimą, siekiama nustatyti įtempius PIB būdu konstrukciniame pliene, todėl, parenkant tyrimo medžiagą, vienas iš svarbiausių aspektų – medžiaga turi būti plačiai naudojamas konstrukcinis plienas, iš kurio gaminamos įvairios pastatų sijos, pertvaros, santvaros, konstruojami tiltai ir rezervuarai. Konstrukciniame pliene, be pagrindinių jį sudarančių komponentų (anglies ir geležies), yra ir įvairių priemaišų. Sieros, fosforo, silicio, mangano priemaišos būdingos visoms plieno rūšims, todėl vadinamos nuolatinėmis. Plienas, kurio cheminėje sudėtyje yra tik geležis, anglis ir nuolatinės priemaišos, vadinamas nelegiruotu, smulkiagrūdžiu konstrukciniu plienu.

Kitas svarbus aspektas pasirenkant plieną tyrimui – plieno takumo riba. Kuo plieno takumo riba didesnė, tuo didesni įtempiai formuojasi medžiagoje.

Įvertinus šiuos du pagrindinius kriterijus, tyrimui pasirinktas nelegiruotas, smulkiagrūdis konstrukcinis plienas S355J2, kurio takumo riba yra 355 MPa. Tarptautiniame standarte *LST EN ISO 10025-2:2005* nurodoma šio plieno cheminė sudėtis (2.2 lentelė) ir mechaninės savybės (2.3 lentelė).

2.2 lentelė. Plieno S355J2 cheminė sudėtis

Žymėjimas		Komponentai					
EN 10025-1	EN 10025-2	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cu %
S355J2	1.0577	≤0,20	≤0,55	≤1,60	≤0,025	≤0,025	≤0,55

2.3 lentelė. Plieno S355J2 mechaninės savybės

Stiprumo riba R_m , MPa	Takumo riba R_e , MPa	Santykinis pailgėjimas A_5 %	Smūginis tūsumas KV, J/cm ²
510-680	≥355	≥22	≥27 (-20)

Plienas S355J2 labiausiai paplitęs konstrukcijų gamyboje, nes pasižymi geru suvirinamumu, aukštu atsparumu tempimui, o dėl mažo anglies ekvivalento – geromis šalto formavimo savybėmis. Jo panaudojimo galimybės itin plačios. Iš šio plieno gaminamos tiltų ir pastatų dalys, laivų konstrukcijos, elektrinės, krovinių kėlimo ir sandėliavimo technika, vėjo jėgainės, įvairūs rezervuarai, kranai, priekabos ir kiti gaminiai. Iš šio plieno pagaminti vamzdžiai ar slėginiai indai gali būti eksploatuojami nuo -70 °C iki 475 °C temperatūroje.

Plienas S355J2 plačiai naudojamas ne tik Europos sąjungos šalyse, bet ir Amerikoje bei Azijos pramonėje. Šio plieno atitikmenys skirtingose šalyse: JAV – ASTM A678/A Gr. B, Japonijoje – JIS G 3106 SM520B, Rusijoje GOST 5520-79 17G1S. Dėl galimų plačių šio plieno panaudojimo sričių yra daug gamintojų, siūlančių įvairiausių konstrukcinio plieno S355J2 profilius – lakštus, vamzdžius, kvadratinio profilio vamzdžius, T formos profilius, H formos profilius.

Tyrimė naudojamo plieno S355J2 lakšto atitiktis sertifikatas pateiktas A priede. Gamintojo nurodyta konstrukcinio plieno S355J2 lakštų cheminė sudėtis ir mechaninės savybės pateiktos 2.4 ir 2.5 lentelėse.

2.4 lentelė. Plieno S355J2 cheminė sudėtis pagal gamintojo sertifikatą

Žymėjimas		Komponentai					
EN 10025-1	Gamintojo Nr.	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cu %
S355J2	8303	0,16	0,20	1,38	0,012	0,002	0,03

2.5 lentelė. Plieno S355J2 mechaninės savybės pagal gamintojo sertifikatą

Stiprumo riba R_m , MPa	Takumo riba R_e , MPa	Santykinis pailgėjimas A_5 %	Smūginis tūsumas KV, J/cm ²
520	388	26	137 (-20)

Be cheminės sudėties ir pagrindinių mechaninių savybių tikrinamas ir naudojamo plieno kietumas. Kietumo nustatymui naudojamas Vickerso metodas, nes šiuo metodu galima nustatyti praktiškai bet kokių medžiagų kietumą. Plieno S355J2 kietumas pagal Vickersą turi būti ne didesnis kaip 300 HV.

Bandinių kietumo nustatymas atliktas remiantis Lietuvoje pripažintu tarptautiniu norminiu dokumentu *LST EN ISO 6507-1:2005*, naudojant *General electric* kietmatį *MIC10* su matavimo liestuku *MIC 205* (2.2 pav.). Liestuko parametrai: apkrova 50 N, diametras 19 mm, ilgis 169 mm,

antgalio skersmuo 3 mm. Kietmatis prieš kiekvieno bandinio kietumo matavimą kalibruojamas naudojant 266 HV5 B kalibravimo bloką.

Gauti kietumo matavimo rezultatai pateikiami 2.6 lentelėje.

2.6 lentelė. Bandinių kietumas pagal Vikersą.

Žymuo	B1	B2	B3	B4	B5	TB6	TB7	TB8	TB9	TB10
Kietumas HV ₅ , Pa	151	141	136	142	150	167	137	156	157	160



2.2 pav. Bandinių kietumo matavimas kietmačiu MIC10

Svarbu apžvelgti ir galimybę plienui S355J2 atlikti liekamųjų įtempių terminį atpalaidavimą. Plieno S355J23 kritiniai temperatūros taškai A_1 ir A_3 nustatyti remiantis Tarptautinio suvirinimo instituto informacija, kurioje nurodoma, kad šio nelegiruoto plieno anglies ekvivalentas – 0,523 %, kritinės fazių transformacijos reikšmės: $A_{C1}=720$ °C, $A_{C3}=836$ °C. Terminis plieno S355J2 atpalaidavimas turi būti atliktas remiantis *LST EN ISO 1090-2:2008* ir *LST EN ISO 17663:2009* standartais. Pagal šiuos standartus, plieno S355J2 liekamųjų įtempių atleidimo temperatūra turi būti 550-600 °C, o išlaikymo laikas priklauso nuo bandinių storio, bet ne mažiau kaip 60 min.

Lyginant tarptautinio standarto *LST EN ISO 10025-2:2005* plienui S355J2 keliamus reikalavimus ir gamintojo nurodytus parametrus matyti, kad tyrimui naudojamas konstrukcinis plienas atitinka visus norminio dokumento reikalavimus.

2.2. Bandinių matmenų nustatymas

Eksperimentinio tyrimo bandinių matmenims nustatyti specialūs reikalavimai nekeliami, tačiau siekiant tiksliausio įtempių įvertinimo PIB būdu ir mažiausių medžiagos kaštų sunaudojimo, bandinių matmenims nustatomi šie kriterijai:

- PIB trukdžių kontrolė dėl patikimesnių rezultatų, remiantis gaminio storiu;

- Kampinių jutiklių paviršiaus plotas turi atitikti bandinio plotą;
- Bandinių forma parenkama pagal tempimo bandymo keliamus reikalavimus;
- Mažiausi sunaudotos medžiagos resursai.

Bandinių storis

Atsižvelgiant į tai, kad PIB yra slopstanti banga ir sklinda ne konstrukcinio plieno paviršiumi, o gilesniame jo sluoksnyje, būtina atsižvelgti į galimus trukdžius. PIB trukdžiai galimi dėl mažo gaminio storio, nes iki minimumo sumažėja, o kartais ir visai išnyksta riba tarp PIB ir PSB. Taip pat kai gaminiai itin mažo storio (2-4 mm.), atsiranda papildomų trikdžių dėl paviršiaus ant kurio padėtas tiriamas gaminy.

Siekiant kuo tiksliau nustatyti įtempius, konstrukciniame pliene buvo eksperimentiškai keičiamo kampo jutikliais matuojami įvairių storių gaminiai. Pastebėta, kad tiksliausi rezultatai pasiekiami, kai gaminio storis yra ≥ 14 mm (2.7 lentelė).

Atliekant šį tyrimą norima kuo tiksliau įvertinti ultragarsinės bangos akustinio tamprumo konstantas todėl pasirenkamas 14 mm plieno lakštas.

2.7 lentelė. Bandinio storio nustatymas eksperimentiniu būdu

Storis, mm	Rezultatai	
	Kriterijai	Tikslumas
$c \leq 4$	Triukšmas dėl aplinkos poveikio. Sunku nustatyti ribą tarp PIB ir PSB.	Žemas
$4 \leq c \leq 8$	Triukšmas minimalus. Riba tarp PIB ir PSB maža	Vidutinis
$8 \leq c \leq 10$	Triukšmas minimalus. Riba tarp PIB ir PSB maža.	Vidutinis
$10 \leq c \leq 14$	Triukšmas minimalus. Riba tarp PIB ir PSB ryški.	Aukštas
$14 \leq c \leq 16$	Triukšmas minimalus. Riba tarp PIB ir PSB ryški.	Aukštas

Bandinių plotas

Matuojamų bandinių plotas priklauso nuo PIB keičiamo kampo keitiklių ploto. Šiame eksperimentiniame tyrime naudojami du *General electric MUWB4-N*, 4 MHz reguliuojamo kampo keitikliai, kurių matmenys – 46 x 26 x 42. Kadangi keitiklių plotas yra 26 mm, tai bandinių plotas tikrinamose vietose negali būti mažesnis nei 26 mm.

Siekiant patikimiausio matavimo rezultato, matavimo metu kampiniai keitikliai turi būti judinami ne tik per bandinių ilgį, bet ir per plotį, todėl pasirenkamas bandinių plotas – 34 mm.

Bandinių ilgis

Bandinių ilgis priklauso nuo kampinių keitiklių ilgių sumos, todėl negali būti mažesnis nei 92 mm. Atsižvelgiant į tai, kad bandiniai bus statomi į tempimo mašiną, viso bandinio ilgis parenkamas pagal tempimo bandymą reglamentuojantį standartą.

Bandinių forma pagal tempimo bandymo reikalavimus

Lietuvoje pripažintas tarptautinis standartas *LST EN ISO 6892-1:2016* reglamentuoja tempimo bandymą, kuris atliekamas kambario temperatūroje (20 °C). Remiantis šio norminio dokumento D priedu, nustatomi galutiniai bandinių matmenys: bendras bandinio ilgis (L_t), lygiagretus ilgis (L_c), tiriamos zonos ilgis (L_0), bandinio galų storis (b_g).

Tiriamos zonos ilgis nustatoma pagal 2.1 formulę. Kai bandinio storis 14 mm, tai $L_0 \approx 124$ mm. Minimalus lygiagretus bandinio ilgis apskaičiuojamas pagal 2.2 formulę. Skaitiniu metodu nustatyta, kad $L_c \approx 157$ mm, todėl bandiniams priimamas lygiagretus ilgis – 160 mm. Pagal standarto *LST EN ISO 6892-1:2016* D.2 lentelę nustatytas bendras bandinių ilgis $L_t = 284$ mm.

Bandinio galai turi būti platesni nei tiriamoji zona ir nustatomi remiantis 2.3 formule. Bandinio galų plotis turi būti ≥ 41 mm, priimamas plotis 58 mm. Bandinio brėžinys pateiktas 2.2 paveiksle.

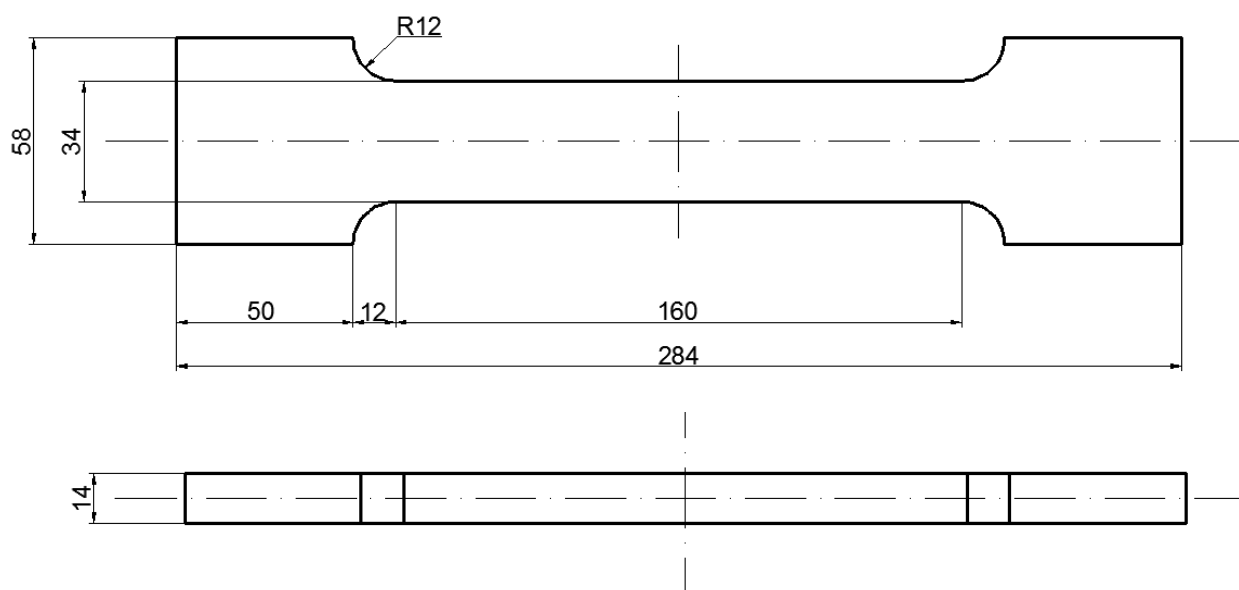
$$L_0 = k\sqrt{S_0}; \quad (2.1)$$

čia: S_0 – skerspjūvio plotas; k – proporcingumo koeficientas (kai bandinio storis mažesnis nei 15 mm, $k=5,65$).

$$L_c = L_0 + 1,5\sqrt{S_0}; \quad (2.2)$$

$$b_g \geq 1,2b_0; \quad (2.3)$$

čia: b_0 – tiriamosios zonos plotis.



2.2 pav. Bandinių matmenys

2.3. Bandinių paruošimas

Visi išpjauti bandiniai identifikuojami įpjovomis, siekiant palengvinti jų atsekamumą po tolimesnių procesų. Įpjovos daromos ant bandinių galų tam, kad netrukdytų paviršinės išilginės bangos sklidimui ir neturėtų įtakos įtempių nustatymo rezultatams.

Identifikavus bandinius (pagal 2.1 lentelę), atliekami paviršiaus paruošimo procesai, kuriuos sudaro įtempių mažinimas terminiu atleidimu ir paviršių paruošimas mechaniniais ir terminiais procesais.

2.3.1. Įtempių mažinimas

Eksperimentiniam tyrimui visi bandiniai yra plazminiu pjovikliu išpjauti iš to pačio S355J2 plieno lakšto, kurio matmenys 6000 x 4000 x 14, kad būtų išlaikytos kuo artimesnės mechaninės savybės tarp visų bandinių. Siekiant palyginti įtempius tarp termiškai neatleistų ir atleistų bandinių, penki bandiniai (TB6, TB7, TB8, TB9, TB10) atleidžiami krosnyje pagal standarto *LST EN ISO 1090-2: 2011* ir *LST EN ISO 10083-2:2001* reikalavimus.

Terminio įtempių atleidimo kokybei svarbios trys pagrindinės operacijos: kaitinimas, išlaikymas ir aušinimas. Pagal paminėtus norminius dokumentus nustatomi tokie bandinių terminio apdirbimo parametrai: krosnies temperatūra – 580 °C, išlaikymas tokioje temperatūroje – 60 minučių, bandiniai lėtai aušinami kartu su krosnimi iki kambario temperatūros.

Konstrukcinio nelegiruoto smulkiagrūdžio plieno S355J2 įkaitinimas iki 580 °C temperatūros padidina atomų paslankumą, o išlaikymas šioje temperatūroje sudaro galimybę atomams persitvarkyti. Persitvarkant atomams, bandiniuose sumažėja kristalinės sandaros netobulumų, sumažėja kietumas bei stiprumas, panaikinami susidarę liekamieji vidiniai įtempiai.

Bandinių liekamųjų įtempių terminiam apdirbimui naudojama W-50 krosnis, kurios maksimali kaitinimo temperatūra 1450 °C.

2.3.2. Paviršiaus paruošimas

Eksperimentinio tyrimo metu nustatoma PIB akustinio tamprumo priklausomybė nuo konstrukcinio plieno paviršiaus paruošimo. Plieno paviršiaus paruošimo technologijų yra daug ir įvairių, todėl visoms joms ištirti neužtektų laiko sąnaudų, be to, tokie tyrimai reikalautų labai didelių ekonominių išteklių. Dėl šių priežasčių tyrimui pasirenkami dažniausiai naudojami plieninių konstrukcijų apdirbimo būdai:

- smėliavimas (B2, TB7);
- šratavimas (B3, TB8);
- dažymas (B4, TB9);

- cinkavimas (B5; TB10).

Siekiant palyginti PIB sąveiką su neapdorotu paviršiumi, atliekami bandymai su bandiniais, kurių paviršius yra be paruošimo (B1, TB6).

Smėliavimas – tai mechaninis paviršiaus valymas smėlio srautu. Bandiniams smėliuoti naudojami nuo 0,1 iki 0,8 mm kvarcinio smėlio grūdėliai, kurių pagrindą sudaro silicio oksidas (98,5 %). Naudojamo smėlio eksploatacinės savybės pridedamos B priede.

Smėliuotų bandinių šiurkštumui vertinti pasirenkamas dažniausiai naudojamas parametras – vidutinis aritmetinis profilio nuokrypis R_a (LST EN ISO 4287:2007). Nusmėliavus bandinius, jų paviršiaus šiurkštumas matuojamas šiurkštumo matuokliu TR-220 (2.3 pav.).



2.3 pav. Šiurkštumo matuoklis TR220

Bandinių B2 ir TB7 šiurkštumas buvo matuojamas penkiose skirtingose vietose. Matavimo rezultatai pateikti 2.8 lentelėje. Apdorojus gautus rezultatus nustatyta, kad bandinio B2 paviršiaus šiurkštumas apytiksliai lygus $5,54 \mu\text{m}$, o bandinio TB6 – $R_a \approx 6,17 \mu\text{m}$.

2.8 lentelė. Smėliuotų bandinių B2 ir TB7 šiurkštumas

	Šiurkštumas R_a					
	I	II	III	IV	V	Vidurkis
B2	4,321	6,032	5,078	5,649	6,624	5,541
TB7	7,093	4,965	6,288	6,889	5,639	6,173

Šratavimas – tai mechaninis metalinių paviršių valymas metalo abrazyvu (šratais). Šratavimas naudojamas siekiant nuvalyti nuodegas, rūdis nuo konstrukcinio plieno paviršiaus bei jį sukietinti, pašiaušti.

Valant bandinius šratų srautu, naudojami *Ervin Amasteel S170* šratai, kurių skersmuo $0,4 \pm 0,005 \text{ mm}$. Paviršiaus šiurkštumui nustatyti naudojamas *TQC LD2050* komparatorius (2.4 pav.), kuris skirtas metalo paviršiams po šratavimo. Šiurkštumo matavimas atliekamas remiantis standartu

LST EN ISO 8503-2:2012. Uždėjus komparatorių ant B3 ir B7 bandinių paviršių, vizualiniu būdu nustatyta, kad abiejų bandinių paviršiai artimi pirmajam komparatoriaus segmentui. Pagal standarto *LST EN ISO 8503-2:2012* 1 lentelę, toks šiurkštumas įvardijamas kaip smulkus.

Remiantis standarto *LST EN ISO 8503-1:2012*, 1 lentele, nustatyta, kad bandinių B3 ir TB7 vidutinis nelygumų aukštis lygus $R_z \approx 25 \mu\text{m}$, galimas nuokrypis $\pm 3 \mu\text{m}$.



2.4 pav. Šratuoto paviršiaus komparatorius

Dažymas – metalo paviršiaus padengimas dažų sluoksniu, kuris saugo metalą nuo korozijos ir aplinkos poveikio. Lietuvoje pripažintas tarptautinis standartas *LST EN ISO 12944:2000* reglamentuoja gaminių dengimą dažais ir lakais. Remiantis norminio dokumento *LST EN ISO 12944-4:2000* rekomendacijomis, prieš dengiant bandinius dažais, būtina nuvalyti ant paviršiaus esančią alyvą, tepalus, druskas, nešvarumus ir susidariusias rūdis. Kadangi bandiniai B4 ir TB4 yra nepadengti jokia danga ar dažais, rekomenduojama valyti srautiniu valymu – plovimas vandeniu ar emulsiniais tirpalais (*LST EN ISO 8501-1:2007*).

Pagal standarto *ISO 11124-2:2002* reikalavimus, abiejų bandinių paviršiai turi būti nuvalyti šratų srautu tam, kad dažas geriau sukibtų su metalo paviršiumi, sumažėtų atsisluoksniavimo tikimybė. Abu bandiniai šratuojami naudojant *Ervin Amasteel S170* šratų, kurių skersmuo $0,4 \pm 0,005 \text{ mm}$.

Bandiniai B4 ir TB9 dažomi dviejų komponentų, itin greitai džiūstančiais antikoroziniais epoksidiniais dažais *Interseal 1052* (C priedas). Eksperimentiniu būdu nustatyta, kad esant didesniai nei $100 \mu\text{m}$ dažų storiui, PIB banga nesusidaro. Dėl šios priežasties bandinių paviršiai dengiami vieno sluoksnio dažais. Susidariusiam dažų sluoksnio storiui nustatyti naudojamas dažų storio matuoklis *LIMIT 5100* (2.5 pav.).

Bandinių B4 ir TB9 dažų sluoksnio storis buvo matuojamas penkiose skirtingose vietose. Matavimo rezultatai pateikti 2.9 lentelėje. Apdorojus gautus rezultatus nustatyta, kad B4 bandinio dažų sluoksnio storis yra $\approx 66,8 \mu\text{m}$, o TB9 $\approx 56,3 \mu\text{m}$.



2.5 pav. Dažų storio matuoklis LIMIT 5100

2.9 lentelė. Dažytų bandinių B4 ir TB9 dažų sluoksnio storis

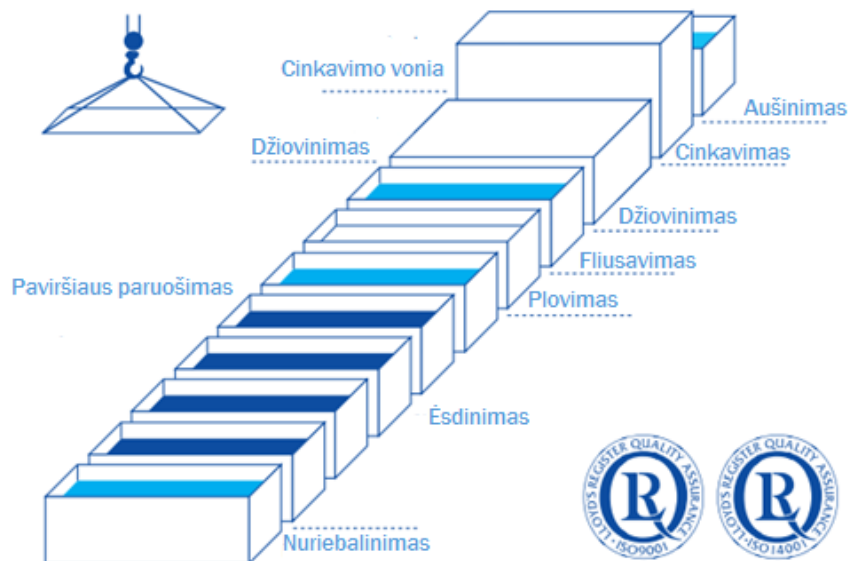
	Dažų sluoksnio storis, μ					
	I	II	III	IV	V	Vidurkis
B4	64,5	64,1	68,2	65,4	71,8	66,8
TB9	66,8	53,8	55,5	54,6	51,0	56,3

Cinkavimas – procesas, kai juodojo metalo gaminių paviršius padengiamas antikorozinė cinko danga pamerkimo į išlydytą cinką būdu (karštas cinkavimas). Cinko dangų korozinį atsparumą reglamentuoja standartas *LST EN ISO 10289:2004*.

Norit cinkuoti bandinius B5 ir TB10, jų paviršiai turi būti tinkamai paruošti. Tam, kad cinkas tolygiai padengtų bandinių paviršius, prieš cinkavimą atliekamas paviršių paruošimas, remiantis standarto *LST EN ISO 14713-2:2010* rekomendacijomis.

Prieš merkiant į karštą cinką bandinių paviršiai turi būti švarūs ir pašiaušti, todėl mechaniniu būdu yra nuvalomi tepalai ir kiti paviršiaus nešvarumai, atliekamas paviršiaus riebalų pašalinimas. Taip pat svarbu bandinių paviršiams suteikti šiurkštumo tam, kad cinko dangos ir bandinių paviršių adhezija būtų aukšta. Bandiniai B5 ir TB10 smėliuojami naudojant kvarcinį smėlį. Po smėliavimo atliekamas paviršiaus ėsdinimas rūgštyje.

Atlikus visus paviršiaus paruošimo etapus, bandiniai B5 ir TB10 merkami į 450-460 °C temperatūros išlydytą cinką. Vyksta cinkavimo procesas: ištirpęs cinkas difunduoja į plieno paviršių ir sudaro legiruotą sluoksnį, o ištraukiant gaminius iš lydalų ant bandinių lieka gryno cinko danga. Pasibaigus cinkavimui bandiniai ištraukiami ir džiovinami. Smėliuotų bandinių B5 ir TB10 cinkavimo procedūra pateikta 2.6 paveiksle. Remiantis standartu *LST EN ISO 1461:2009* nustatyta, kad susidariusios cinko dangos storis vidutiniškai siekia 85 μm .



2.6 pav. Cinkavimo procedūra

2.4. Eksperimentiniams tyrimams naudota įranga

Atliekant eksperimentinį tyrimą būtina naudotis patikima ir kalibruota įranga, kuri užtikrintų rezultatų tikslumą ir patikimumą.

Konstrukcinio plieno bandinių akustinio tamprumo konstantos nustatomos naudojant:

1. ultragarsinį defektoskopą *Sonatest Sitiescan 240* (2.7 pav.), kurio mažiausias bangos sklaidimo greitis yra 1000 m/s, didžiausias greitis – 9999 m/s; didžiausias jautrumas 110 dB; bangos sklaidimo ribos nuo 5 mm iki 10000 mm; galimi ultragarsinės bangos dažniai: 1 MHz, 2 MHz, 5 MHz, 10 MHz; energijos impulsas 185 V, pastovaus atspindžio kampas nuo 0° iki 70° (visa defektoskopo specifikacija pateikta D priede). Bandymų metu defektoskopas *Sonatest Sitiescan 240* turi galiojantį kontrolės sertifikatą (Nr. 1421/01), kuriame nurodoma, kad defektoskopas atitinka standarto *LST EN ISO 12668-1:2010* antros grupės keliamus reikalavimus;



2.7 pav. Ultragarsinis defektoskopas *Sonatest Sitiescan 240*

2. du paviršinių išilginių bangų keičiamo kampo keitiklius *General electric MUWB4-N* (2.8 pav.), kurių matmenys 46 x 26 x 42, ultragarsinės bangos darbinis dažnis 4 MHz;



2.8 pav. Keičiamo kampo keitikliai *General electric MUWB4-N*

3. tempimo mašiną *MIRI-500K* (2.9 paveikslas), kurios maksimali apkrova 500 kN, mažiausia apkrova 10 kN, tempimo greitis nuo 0,0025 mm/s iki 2,5 mm/s.



2.9 pav. Tempimo mašina *MIRI-500K*

2.5. Įtempių tyrimo metodika

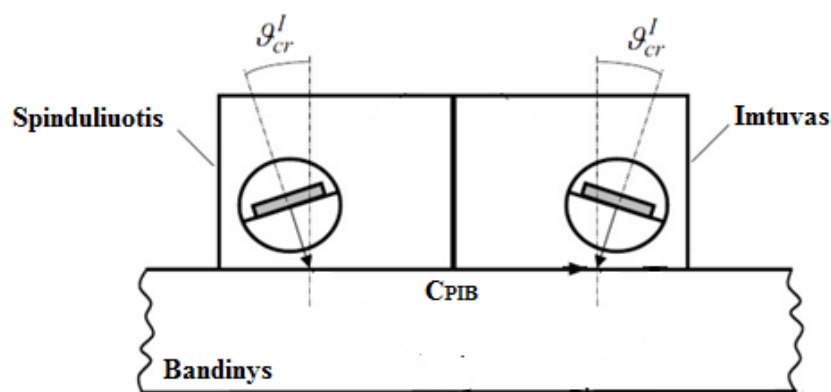
Įtempių nustatymas PIB metodu yra pagrįstas akustiniu ultragarso bangos tamprumo efektu, kai ultragarso bangos sklidimas priklauso nuo įtempių, esančių kietame kūne, kuriuo sklinda banga.

Įtempių tyrimams yra tikslinga naudoti būtent PIB, nes šios bangos fazinis greitis yra lygus išilginių bangų sklaidimo greičiui (pliene – 5920 m/s).

Kadangi PIB banga yra slopstanti dėl išspinduliuotų šoninių skersinių tūrinių bangų, jos energijos maksimumas yra ne metalo paviršiuje, o gilesniame jo sluoksnyje. Dėl šios priežasties eksperimentinio tyrimo metu nustatomi įtempiai 3 mm gylyje.

Eksperimentiniame tyrime PIB banga sužadinama kampiniu metodu. Šiai bangai sužadinti naudojami du keičiamo kampo keitikliai – kampinis spinduliuotis ir kampinis imtuvas. Kampinis spinduliuotis generuoja ultragarsinę bangą, kuri krinta į kietojo kūno paviršių pirmuoju kritiniu kampu (ϑ_{kr}^I). Kampinis imtuvas registruoja paviršinę išilginę bangą. Kampinio metodo, naudojant keičiamo kampo keitiklius, schema parodyta 2.10 paveiksle.

Norint, kad kampinis spinduliuotis sužadintų PIB, būtina, kad ultragarso banga į gaminį sklistų pirmuoju kritiniu kampu (ϑ_{kr}^I), kuris svyruoja nuo 18° iki 30° . Kampo dydis priklauso nuo tiriamos medžiagos. Šiame tyrime eksperimentiniu būdu nustatyta, kad naudojamuose plieno S355J2 bandiniuose PIB banga susidaro esant 28° kampui.



2.10 pav. PIB sužadinimo schema

Siekiant nustatyti akustinio tamprumo koeficientą, atliekamas vienas iš pagrindinių medžiagos mechaninių bandymų – tempimo bandymas. Atliekant tempimo bandymą galima nustatyti medžiagos plastiškumo, stiprumo ir tamprumo rodiklius, kurie atspindi medžiagos mechanines savybes. Bandinių tempimo bandymai atliekami pagal Lietuvoje pripažinto, tarptautinio standarto *LST EN 6892-1: 2016* reikalavimus.

Akustinis tamprumo koeficientas, esant skirtingiems bandinių paviršiams, nustatomas naudojant šiuos darbo režimus: ultragarsinės bangos dažnis 5 MHz, bangos sklaidimo greitis 5920 m/s, tempimo mašinos greitis 0,0025 mm/s, įtempiai matuojami, kai bandiniai apkrauti 25 kN, 50 kN, 75 kN, 100 kN, 125 kN, 150 kN, 175 kN ir 200 kN apkrova, bandiniai apkraunami palaipsniui, nestabdant tempimo mašinos.

2.6. Antrojo skyriaus išvados

1. Išanalizavus dažniausiai naudojamus ir didžiausią takumo ribą turinčius plienus, eksperimentiniam tyrimui pasirinktas S355J2 konstrukcinis plienas, kurio takumo riba 355 MPa.
2. Bandinių forma ir matmenys nustatyti pagal tempimo bandymą reglamentuojantį norminį dokumentą ir naudojamų ultragarso bangų keičiamo kampo keitiklių matmenis.
3. Eksperimentinio tyrimo metu tarpusavyje lyginami termiškai atleisti ir neatleisti bandiniai, kurių paviršiai paruošti vienodomis sąlygomis.
4. Išnagrinėjus konstrukcijų paviršiaus paruošimo būdus, buvo pasirinkta tirti neparuoštus, smėliuotus, šratuotus, dažytus ir cinkuotus metalo paviršius.
5. PIB metodas leidžia išmatuoti įtempius, kai dažų sluoksnio storis ne didesnis nei 100 μm .
6. Atliekant tempimo bandymą, galima nustatyti PIB akustinio tamprumo koeficientus skirtingiems metalo paviršiams.

3. EKSPERIMENTINIS TYRIMAS

Norint nustatyti įtempių dydį realioje konstrukcijoje naudojant PIB metodą, būtina remtis ultragarso bangos akustinio tamprumo konstanta. Prieš atliekant tyrimą yra daroma prielaida, kad ši konstanta priklauso nuo metalo paviršiaus paruošimo.

Eksperimentinis tyrimas buvo atliktas taikant sukurtą metodą (Walaszek 2002), kuris remiasi paviršinės ir paviršinės išilginės bangų taikymu. Taikant šį metodą yra nustatoma akustinio tamprumo konstanta, kuri koreguoja nustatomus tikruosius, konstrukcijoje esančius įtempius. Nurodytoje metodikoje teigiama, kad siekiant tiksliai įvertinti įtempius, analizuojamų įtempių kryptis turi sutapti bangos sklidimo kryptimi. Būtent tai yra viena iš pagrindinių, priežasčių dėl kurios įmanoma atlikti įtempių tyrimą naudojant PIB metodą.

Eksperimentinius tyrimus sudaro keletas etapų, nuo kurių priklauso tyrimo tikslumas ir rezultatų patikimumas.

3.1. PIB pradinio laiko nustatymas

Pirmajame eksperimentinių tyrimų etape yra svarbu tiksliai nustatyti PIB pradinį nueitą kelią (l_0) bandiniuose, kai jų neveikia jokios apkrovos. Šis parametras reikalingas tam, kad būtų galima tiksliai įvertinti bangos nueito kelio pokytį, kai bandiniuose atsiranda įtempiai.

Siekiant įsitikinti visų bandinių fizinių – mechaninių savybių panašumu, PIB metodu matuojamas pradinis PIB nueitas kelias, kai bandinių paviršius be paruošimo. Iš gautų rezultatų (3.1 lentelė) matyti, kad visų bandinių savybės labai artimos.

3.1 lentelė. PIB metodu nustatytas pradinis bangos kelias l_0

Bandinio žymuo	B1	B2	B3	B4	B5	TB6	TB7	TB8	TB9	TB10
Atstumas (l_0), mm	56,39	56,39	56,39	56,39	56,39	56,39	56,36	56,36	56,39	56,39
Atstumas po terminio atkaitinimo (l_0), mm	-----	-----	-----	-----	-----	56,42	56,42	56,42	56,42	56,42

Po bandinių terminio apdirbimo, ultragarsinės bangos pradinis kelias pailgėja 0,03 mm. Gauti rezultatai leidžia daryti prielaidą, kad, dėl ultragarso bangos akustinio tamprumo įtempiams mažėjant, didėja bangos nueitas kelias.

Atlikus bandinių paviršiaus paruošimą smėlio ir šratų srautu, padengus paviršius dažų ir cinko sluoksniu, keičiasi PIB nueitas pradinis kelias. Galima išskirti keletą pagrindinių priežasčių, dėl kurių įvyksta kelio pokyčiai:

1. dėl bandinių paviršiaus paruošimo, keičiasi PIB keitikių paviršiaus kontaktas su bandinių paviršiumi.
 2. keičiantis bandinių paviršiui dėl mechaninių procesų ir dangų, susidaro papildomi įtempiai, kurie sumuojasi su bandiniuose esančiais įtempiais;
 3. atliekant terminį įtempių atleidimą, bandiniuose atsipalaiduoja bandiniuose buvę liekamieji įtempiai;
 4. PIB sklindant per cinko ar dažų sluoksnį, keičiasi bangos sklidimo greitis.
- Įvertinus šias priežastis, kiekvieno bandinio paviršiui nustatytas l_0 , kuris kinta priklausomai nuo paviršiaus paruošimo (3.1 pav).



3.1 pav. Pradinio kelio (l_0) nustatymas B1 bandinyje

Lentelėje 3.2 pateikti, PIB metodu nustatyti, bandinių pradinio nueito kelio matavimo rezultatai po paviršiaus paruošimų.

3.2 lentelė. PIB pradinis kelias, esant skirtingiems bandinių paviršiams

Žymuo	B1	B2	B3	B4	B5	TB6	TB7	TB8	TB9	TB10
Atstumas l_0 , mm	56,39	55,63	55,49	56,57	66,05	55,42	56,16	56,11	56,83	66,11

Žinant, kad išilginių bangų greitis yra artimas fazinių bangų sklidimo greičiui, kuris pliene yra 5920 m/s^2 , naudojant greičio formulę, galima nustatyti PIB pradinį sklidimo laiką (t_0) neapkrautuose bandiniuose. Gauti rezultatai pateikti 3.3 lentelėje.

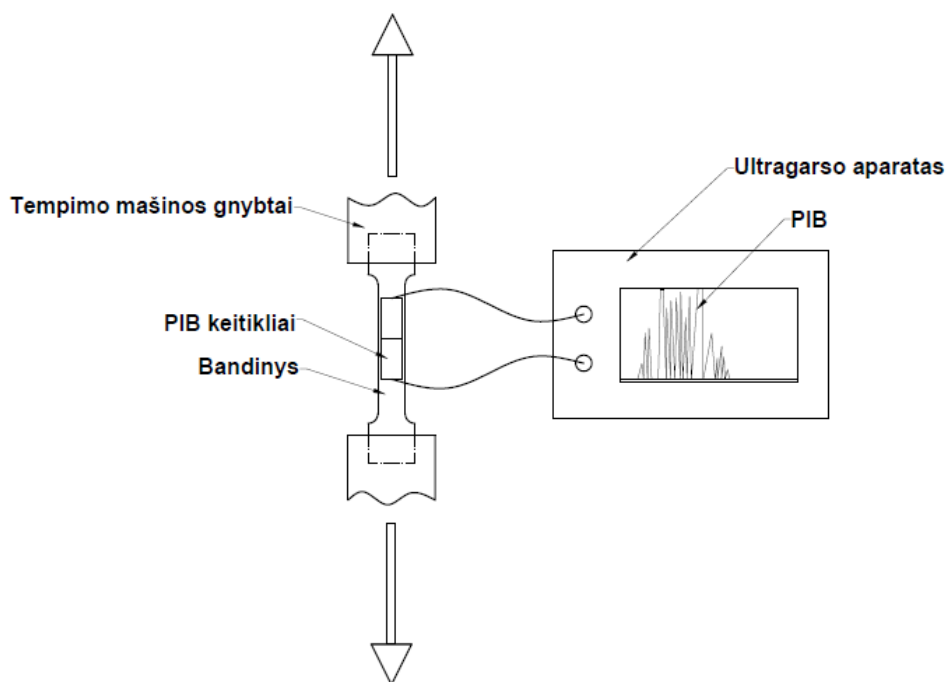
Pradinis PIB sklidimo laikas reikalingas akustinio tamprumo konstantai nustatyti bei įvertinti tikruosius įtempius realioje konstrukcijoje.

3.3 lentelė. Pradinis PIB sklidimo laikas, esant skirtingiems bandinių paviršiams

Žymuo	B1	B2	B3	B4	B5
t_0, s	$9,639 \cdot 10^{-6}$	$9,509 \cdot 10^{-6}$	$9,485 \cdot 10^{-6}$	$9,670 \cdot 10^{-6}$	$11,291 \cdot 10^{-6}$
Žymuo	TB6	TB7	TB8	TB9	TB10
t_0, s	$9,644 \cdot 10^{-6}$	$9,595 \cdot 10^{-6}$	$9,590 \cdot 10^{-6}$	$9,715 \cdot 10^{-6}$	$11,306 \cdot 10^{-6}$

3.2. PIB sklidimo laiko priklausomybė nuo įtempių

Antrame tyrimo etape nustatoma priklausomybė tarp PIB sklidimo laiko ir įtempių. Įtempiai bandiniuose sukuriama atliekant tempimo bandymus. Kiekvienas bandinys įtvirtinamas tempimo mašinos gnybtuose ir cikliška apkraunamas periodiškai didėjančia apkrova. Kadangi PIB banga yra jautri prispaudimui, siekiant kuo tikslesnių rezultatų ir laikantis saugumo reikalavimų, PIB keitikliai yra mechaniškai pritvirtinami prie bandinio, todėl viso tyrimo metu nesikeičia prispaudimo jėga. Eksperimentinio tyrimo schema pateikta 3.2 paveiksle.



3.2 pav. Eksperimentinio tyrimo schema

Rezultatai fiksuojami, kai bandiniai apkraunami 25 kN, 50 kN, 75 kN, 100 kN, 125 kN, 150 kN jėga. Esant šioms apkrovoms bandiniuose susidaro 50 MPa, 100 MPa, 150 MPa, 200 MPa, 250 MPa, 300 MPa įtempiai. Pasiekus 300 MPa ribą ir užfiksavus ultragarsinės bangos nueitą kelią, bandiniai atleidžiami. Siekiant įsitikinti, kad pirmojo tempimo metu neįvyko jokios plastinės deformacijos

matuojamas PIB kelias atleistame bandinyje. Tyrimo metu buvo įsitikinta, kad esant 300 MPa įtempių ribai, pliene S355J2 plastinės deformacijos neįvyko.

Tempimo bandymas tiems patiems bandiniams kartojamas antrą kartą, siekiant įvertinti pirmojo matavimo tikslumą, tačiau antrą kartą bandiniai tempiami apkraunant juos kas 25 N didėjančia apkrova, kol pasiekama 400 MPa įtempių riba. Kadangi bandiniai šio tempimo metu pasiekia takumo ribą, jie plastiškai deformuojasi ir bandiniuose susidaro negrįžtami struktūriniai pakitimai.

Tempimo metu užfiksuotas PIB bangos nueito kelio (l) dydis (E priedas) išreiškiamas laiku. Gauti kiekvieno bandinio rezultatai pateikiami 3.4 lentelėje.

3.4 lentelė. PIB sklidimo laikas keičiantis įtempiams

	Įtempiai								
	0	50	100	150	200	250	300	350	400
t_{B1}, s	9,639 ·10 ⁻⁶	9,639 ·10 ⁻⁶	9,634 ·10 ⁻⁶	9,634 ·10 ⁻⁶	9,631 ·10 ⁻⁶	9,631 ·10 ⁻⁶	9,626 ·10 ⁻⁶	9,626 ·10 ⁻⁶	9,621 ·10 ⁻⁶
t_{B2}, s	9,515 ·10 ⁻⁶	9,509 ·10 ⁻⁶	9,509 ·10 ⁻⁶	9,509 ·10 ⁻⁶	9,504 ·10 ⁻⁶	9,504 ·10 ⁻⁶	9,501 ·10 ⁻⁶	9,501 ·10 ⁻⁶	9,494 ·10 ⁻⁶
t_{B3}, s	9,486 ·10 ⁻⁶	9,486 ·10 ⁻⁶	9,480 ·10 ⁻⁶	9,480 ·10 ⁻⁶	9,483 ·10 ⁻⁶	9,475 ·10 ⁻⁶	9,475 ·10 ⁻⁶	9,470 ·10 ⁻⁶	9,465 ·10 ⁻⁶
t_{B4}, s	9,670 ·10 ⁻⁶	9,665 ·10 ⁻⁶	9,665 ·10 ⁻⁶	9,665 ·10 ⁻⁶	9,665 ·10 ⁻⁶	9,660 ·10 ⁻⁶	9,660 ·10 ⁻⁶	9,660 ·10 ⁻⁶	9,646 ·10 ⁻⁶
t_{B5}, s	11,306 ·10 ⁻⁶	11,301 ·10 ⁻⁶	11,296 ·10 ⁻⁶	11,296 ·10 ⁻⁶	11,291 ·10 ⁻⁶	11,291 ·10 ⁻⁶	11,286 ·10 ⁻⁶	11,280 ·10 ⁻⁶	11,276 ·10 ⁻⁶
t_{TB6}, s	9,644 ·10 ⁻⁶	9,644 ·10 ⁻⁶	9,639 ·10 ⁻⁶	9,634 ·10 ⁻⁶	9,634 ·10 ⁻⁶	9,631 ·10 ⁻⁶	9,631 ·10 ⁻⁶	9,631 ·10 ⁻⁶	9,626 ·10 ⁻⁶
t_{TB7}, s	9,600 ·10 ⁻⁶	9,595 ·10 ⁻⁶	9,595 ·10 ⁻⁶	9,590 ·10 ⁻⁶	9,590 ·10 ⁻⁶	9,585 ·10 ⁻⁶	9,585 ·10 ⁻⁶	9,580 ·10 ⁻⁶	9,580 ·10 ⁻⁶
t_{TB8}, s	9,590 ·10 ⁻⁶	9,590 ·10 ⁻⁶	9,585 ·10 ⁻⁶	9,585 ·10 ⁻⁶	9,579 ·10 ⁻⁶	9,579 ·10 ⁻⁶	9,574 ·10 ⁻⁶	9,569 ·10 ⁻⁶	9,569 ·10 ⁻⁶
t_{TB9}, s	9,715 ·10 ⁻⁶	9,709·1 0 ⁻⁶	9,709·1 0 ⁻⁶	9,704·1 0 ⁻⁶	9,704 ·10 ⁻⁶	9,704 ·10 ⁻⁶	9,699 ·10 ⁻⁶	9,699 ·10 ⁻⁶	9,691 ·10 ⁻⁶
t_{TB10}, s	11,291 ·10 ⁻⁶	11,286 ·10 ⁻⁶	11,280 ·10 ⁻⁶	11,280 ·10 ⁻⁶	11,275 ·10 ⁻⁶	11,270· 10 ⁻⁶	11,270 ·10 ⁻⁶	11,259 ·10 ⁻⁶	11,259 ·10 ⁻⁶

3.3. Akustinio tamprumo koeficiento nustatymas

Nustačius 4.2 skyriuje PIB sklidimo laiką (t) bei naudojant 4.1 skyriuje pateiktą pradinį kiekvieno bandinio PIB sklidimo laiką (t_0), galima visiems bandiniams nustatyti akustinio tamprumo koeficientus.

Akustinio tamprumo koeficientas priklauso nuo medžiagos mikrostruktūros, todėl susidarius įtempiams keičiasi ir akustinio tamprumo koeficiento dydis. Akustinis tamprumo koeficientas nustatomas pagal 3.1 formulę:

$$A_{11} = \frac{E}{\sigma} \left(\frac{t-t_0}{t_0} \right); \quad (3.1)$$

čia: A_{11} – bangos, kuri sklaidžiama pastoviosios apkrovos kryptimi akustinio tamprumo koeficientas, σ – įtempiai, MPa ; E – tamprumo modulis, N/m^2 ; t – fiksuotas laikas, s ; t_0 – pradinis PIB bangos sklaidimo laikas, s .

Dešimties skirtingų mikrostruktūrų akustinio tamprumo koeficientų gautos reikšmės pateiktos 3.14 lentelėje. Iš nustatytų akustinio tamprumo koeficiento A_{11} reikšmių nustatomos vidutinės akustinio tamprumo koeficientų reikšmės skirtingai apdorotiems bandiniams: $A_{11/B1} = -0,763$; $A_{11/B2} = -1,094$; $A_{11/B3} = -0,742$; $A_{11/B4} = -0,977$; $A_{11/B5} = -1,470$; $A_{11/TB6} = -0,926$; $A_{11/TB7} = 1,292$; $A_{11/TB8} = -0,884$; $A_{11/TB9} = -1,209$; $A_{11/TB10} = -1,474$.

3.5 lentelė. Nustatyti akustinio tamprumo koeficientai

Įtempiai	0	50	100	150	200	250	300	350	400
$A_{11/B1}$	0	0	-1,064	-0,709	-0,887	-0,709	-0,946	-0,811	-0,975
$A_{11/B2}$	0	-2,156	-1,078	-0,719	-1,078	-0,862	-0,958	-0,821	-1,078
$A_{11/B3}$	0	0	-1,081	-0,721	-0,541	-0,865	-0,721	-0,927	-1,081
$A_{11/B4}$	0	-2,121	-1,061	-0,707	-0,530	-0,849	-0,707	-0,606	-1,237
$A_{11/B5}$	0	-1,814	-1,814	-1,814	-1,361	-1,089	-1,210	-1,296	-1,361
$A_{11/TB6}$	0	0	-1,064	-1,418	-1,064	-1,134	-0,945	-0,810	-0,975
$A_{11/TB7}$	0	-2,137	-1,068	-1,425	-1,068	-1,282	-1,068	-1,221	-1,068
$A_{11/TB8}$	0	0	-1,070	-0,713	-1,070	-0,857	-1,070	-1,222	-1,070
$A_{11/TB9}$	0	-2,112	-1,056	-1,408	-1,056	-0,845	-1,056	-0,905	-1,232
$A_{11/TB10}$	0	-1,817	-1,817	-1,211	-1,367	-1,453	-1,211	-1,557	-1,363

3.4. Akustinio tamprumo konstantos nustatymas

Kai žinomas kiekvieno bandinio akustinio tamprumo koeficientas, galima nustatyti akustinio tamprumo konstantas. Akustinio tamprumo konstantos dydis keičiasi priklausomai nuo įtempių esančių bandiniuose.

Akustinio tamprumo konstantos apskaičiuojamos pagal 3.2 formulę:

$$K_{11} = \frac{A_{11}}{E}; \quad (3.2)$$

Skirtingais mechaniniais būdais paruoštų bandinių akustinio tamprumo konstantos pateiktos 3.15 lentelėje.

3.6 lentelė. Nustatytos akustinio tamprumo konstantos

Įtempiai	0	50	100	150	200	250	300	350	400
$K_{11/B1}$	0	0	$-5,320 \cdot 10^{-6}$	$-3,547 \cdot 10^{-6}$	$-4,433 \cdot 10^{-6}$	$-3,547 \cdot 10^{-6}$	$-4,729 \cdot 10^{-6}$	$-4,053 \cdot 10^{-6}$	$-4,877 \cdot 10^{-6}$
$K_{11/B2}$	0	$-10,078 \cdot 10^{-6}$	$-5,390 \cdot 10^{-6}$	$-3,593 \cdot 10^{-6}$	$-5,390 \cdot 10^{-6}$	$-4,312 \cdot 10^{-6}$	$-4,791 \cdot 10^{-6}$	$-4,107 \cdot 10^{-6}$	$-5,390 \cdot 10^{-6}$
$K_{11/B3}$	0	0	$-5,406 \cdot 10^{-6}$	$-3,604 \cdot 10^{-6}$	$-2,703 \cdot 10^{-6}$	$-4,325 \cdot 10^{-6}$	$-3,604 \cdot 10^{-6}$	$-4,634 \cdot 10^{-6}$	$-5,406 \cdot 10^{-6}$
$K_{11/B4}$	0	$-10,604 \cdot 10^{-6}$	$-5,303 \cdot 10^{-6}$	$-3,535 \cdot 10^{-6}$	$-2,652 \cdot 10^{-6}$	$-4,243 \cdot 10^{-6}$	$-3,535 \cdot 10^{-6}$	$-3,030 \cdot 10^{-6}$	$-6,187 \cdot 10^{-6}$
$K_{11/B5}$	0	$-9,072 \cdot 10^{-6}$	$-9,072 \cdot 10^{-6}$	$-6,072 \cdot 10^{-6}$	$-6,804 \cdot 10^{-6}$	$-5,443 \cdot 10^{-6}$	$-6,048 \cdot 10^{-6}$	$-6,480 \cdot 10^{-6}$	$-6,804 \cdot 10^{-6}$
$K_{11/TB6}$	0	0	$-5,317 \cdot 10^{-6}$	$-7,090 \cdot 10^{-6}$	$-5,318 \cdot 10^{-6}$	$-5,672 \cdot 10^{-6}$	$-4,727 \cdot 10^{-6}$	$-4,051 \cdot 10^{-6}$	$-4,874 \cdot 10^{-6}$
$K_{11/TB7}$	0	$-10,684 \cdot 10^{-6}$	$-5,342 \cdot 10^{-6}$	$-7,123 \cdot 10^{-6}$	$-5,342 \cdot 10^{-6}$	$-6,410 \cdot 10^{-6}$	$-5,342 \cdot 10^{-6}$	$-6,105 \cdot 10^{-6}$	$-5,342 \cdot 10^{-6}$
$K_{11/TB8}$	0	0	$-5,348 \cdot 10^{-6}$	$-3,565 \cdot 10^{-6}$	$-5,348 \cdot 10^{-6}$	$-4,278 \cdot 10^{-6}$	$-5,348 \cdot 10^{-6}$	$-6,112 \cdot 10^{-6}$	$-5,347 \cdot 10^{-6}$
$K_{11/TB9}$	0	$-10,558 \cdot 10^{-6}$	$-5,279 \cdot 10^{-6}$	$-7,039 \cdot 10^{-6}$	$-5,279 \cdot 10^{-6}$	$-4,223 \cdot 10^{-6}$	$-5,279 \cdot 10^{-6}$	$-4,525 \cdot 10^{-6}$	$-6,159 \cdot 10^{-6}$
$K_{11/TB10}$	0	$-9,084 \cdot 10^{-6}$	$-9,084 \cdot 10^{-6}$	$-9,056 \cdot 10^{-6}$	$-6,813 \cdot 10^{-6}$	$-7,267 \cdot 10^{-6}$	$-6,056 \cdot 10^{-6}$	$-7,784 \cdot 10^{-6}$	$-6,813 \cdot 10^{-6}$

Iš gautų akustinio tamprumo konstantų K_{11} reikšmių, nustatomas vidutinės akustinio tamprumo konstantų reikšmės skirtingai apdirbtiems bandiniams: $K_{11/B1} = -4,358 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$; $K_{11/B2} = -5,469 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$; $K_{11/B3} = -4,241 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$; $K_{11/B4} = -4,886 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$; $K_{11/B5} = -7,349 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$; $K_{11/TB6} = -5,293 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$; $K_{11/TB7} = -6,461 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$; $K_{11/TB8} = -5,042 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$; $K_{11/TB9} = -6,043 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$; $K_{11/TB10} = -7,370 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$.

Nustatytos PIB metodo akustinio tamprumo konstantos įrodė, kad, keičiantis plieno paviršiui, keičiasi ir akustinio tamprumo konstantos. Dėl šios priežasties, nustatant įtempius realioje konstrukcijoje, būtina atsižvelgti į konstrukcijos paviršiaus paruošimo būdą.

3.5. Praktinio pritaikymo algoritmas

PIB metodas leidžia nustatyti konstrukcijose susidariusių įtempių dydį atsižvelgiant į plieno paviršiaus paruošimą. PIB metodo praktinis taikymas konstrukcijos gamybos, surinkimo ar eksploatacijos periode nėra sudėtingas.

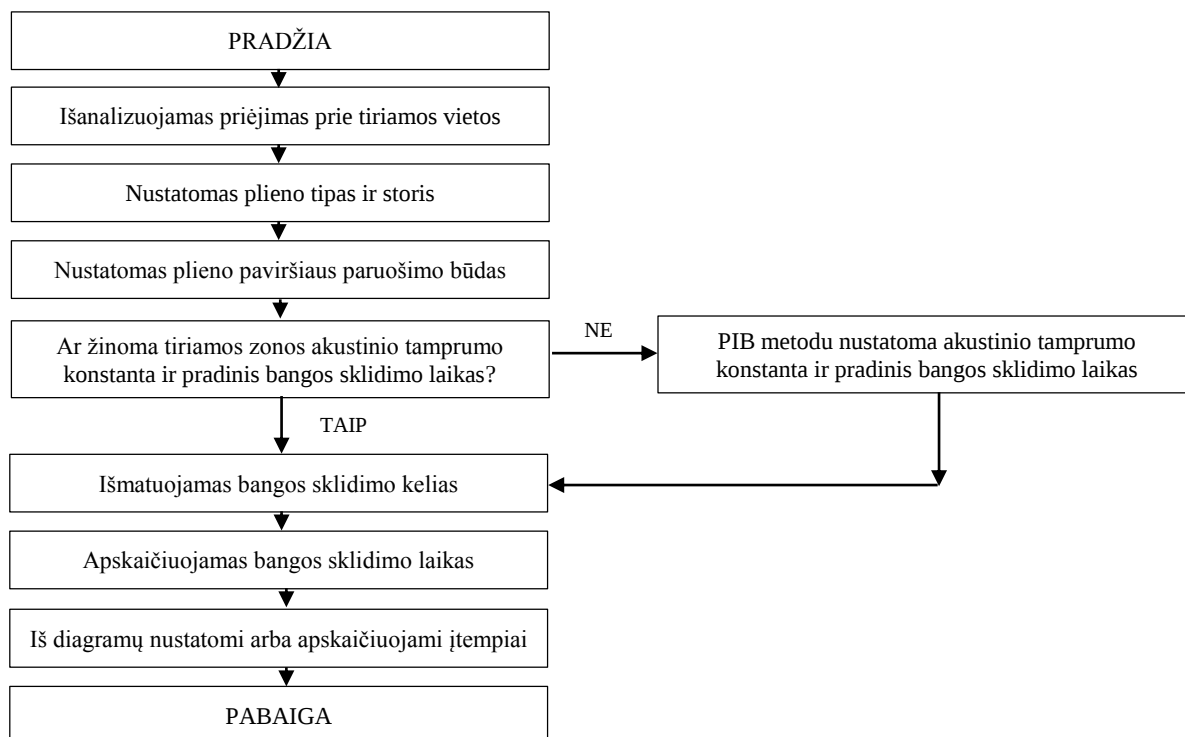
Įtempių matavimo PIB būdu algoritmas: (3.3 pav.)

- plieninės konstrukcijos paviršiaus identifikavimas (nustatomas paviršiaus mechaninis paruošimo būdas, šiurkštumas, dažų tipas, dažų sluoksnio storis ir t.t.);
- PIB keitikliais fiksuojamas bangos nueitas kelias (l);
- remiantis greičio formule apskaičiuojamas ultragarsinės bangos sklidimo laikas (t);

- naudojant eksperimentinio tyrimo metu gautą pradinį bangos sklidimo laiką (t_0) ir akustinio tamprumo konstantą K_{11} (priklausomai nuo bandinio paviršiaus), pagal formulę apskaičiuojami įtempiai, esantys konstrukcijoje.

$$\sigma = -\frac{1}{K_{11}} \cdot \left(\frac{t-t_0}{t_0} \right); \quad (3.3)$$

3.3 pav. Įtempių matavimo algoritmas



3.6. Trečiojo skyriaus išvados

1. Ultragarso paviršinių išilginių bangų metodu galima nustatyti bandiniuose esančius įtempius 3 mm gylyje.

2. Eksperimentinio tyrimo metu nustatytas pradinis bangos sklidimo laikas (t_0) skirtingiems bandinių paviršiams ($t_{0B1}=9,639 \cdot 10^{-6}$ s; $t_{0B2}=9,509 \cdot 10^{-6}$ s; $t_{0B3}=9,485 \cdot 10^{-6}$ s; $t_{0B4}=9,670 \cdot 10^{-6}$ s; $t_{0B5}=11,291 \cdot 10^{-6}$ s; $t_{0TB6}=9,644 \cdot 10^{-6}$ s; $t_{0TB7}=9,595 \cdot 10^{-6}$ s; $t_{0TB8}=9,590 \cdot 10^{-6}$ s; $t_{0TB9}=9,715 \cdot 10^{-6}$ s; $t_{0TB10}=11,306 \cdot 10^{-6}$ s)

3. Tyrimo metu nustatytos konstrukcinio plieno akustinio tamprumo konstantos kiekvienam bandiniui ($K_{11/B1}=-4,351 \cdot 10^{-6}$ MPa⁻¹; $K_{11/B2}=-5,469 \cdot 10^{-6}$ MPa⁻¹; $K_{11/B3}=-4,241 \cdot 10^{-6}$ MPa⁻¹; $K_{11/B4}=-4,886 \cdot 10^{-6}$ MPa⁻¹; $K_{11/B5}=-7,349 \cdot 10^{-6}$ MPa⁻¹; $K_{11/TB6}=-5,297 \cdot 10^{-6}$ MPa⁻¹; $K_{11/TB7}=-6,461 \cdot 10^{-6}$ MPa⁻¹; $K_{11/TB8}=-5,049 \cdot 10^{-6}$ MPa⁻¹; $K_{11/TB9}=-6,043 \cdot 10^{-6}$ MPa⁻¹; $K_{11/TB10}=-7,370 \cdot 10^{-6}$ MPa⁻¹).

4. Sudarytas įtempių nustatymo algoritmas PIB metodu.

4. TYRIMO REZULTATAI

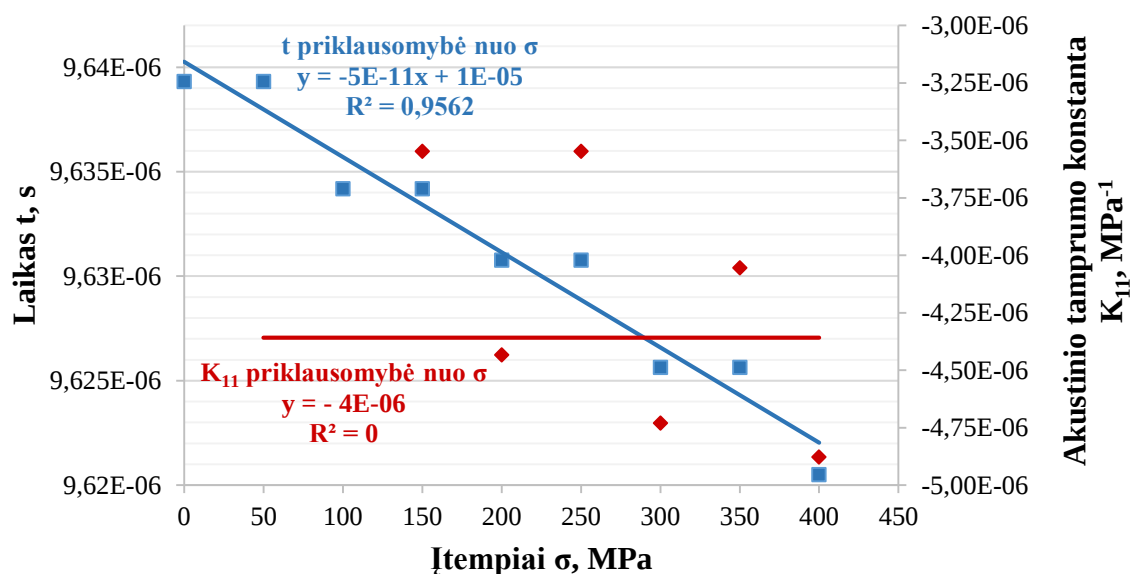
Atlikus bandymus galima teigti, kad daryta prielaida buvo teisinga – PIB akustinio tamprumo konstanta priklauso nuo metalo paviršiaus paruošimo.

Po eksperimentinio tyrimo, apdorojus visus gautus ultragarsinio defektoskopo rodmenis, buvo sudarytos įtempių diagramos, kuriose atsispindi PIB bangos sklidimo laiko priklausomybę nuo susidariusių įtempių bandiniuose. Remiantis šiomis, įtempius charakterizuojančiomis diagramomis, galima nustatyti įtempių dydį konstrukcijose jų gamybos ar surinkimo aikštelėje.

4.1. Neapdorotų paviršių įtempių tyrimo rezultatai

Eksperimentinio tyrimo metu nustatyta, kad, nesant jokiems įtempims, PIB banga per bandinio paviršių, kuris yra be jokio mechaninio ar terminio paruošimo (B1), sklinda $9,639 \cdot 10^{-6}$ sekundės. Kai tokio pat tipo bandinys (TB6) atkaitinamas krosnyje, bangos pradinis sklidimo laikas padidėja iki $9,644 \cdot 10^{-6}$ sekundžių.

Atliekant tempimo bandymą, B1 bandinys yra tempiamas iki takumo ribos (428,1 MPa, F priedas, F1 lentelė). Dėl tempimo metu susidariusių įtempių keičiasi ultragarsinės bangos sklidimo laikas ir akustinio tamprumo konstanta. Kai bandinys B1 pasiekia takumo ribą, ultragarso bangos sklidimo laikas yra $0,019 \cdot 10^{-6}$ s mažesnis nei pradinis laikas. B1 bandiniu sklidusios bangos laiko ir apskaičiuotos akustinės tamprumo konstantos priklausomybė nuo įtempių pateikta 4.1 paveiksle.

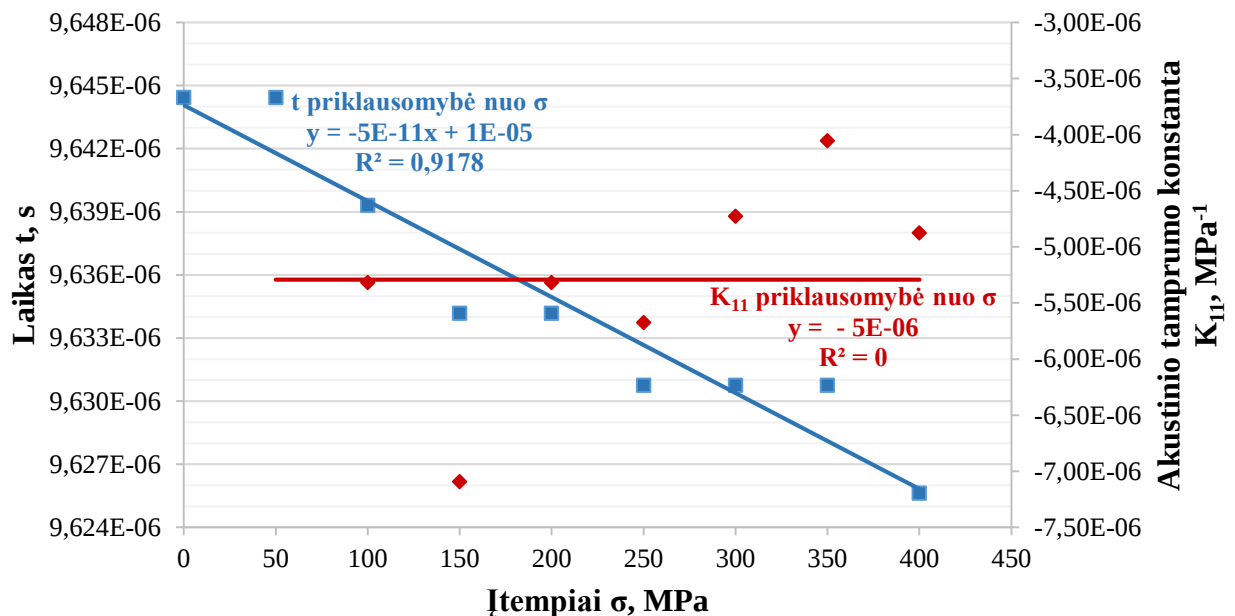


4.1 pav. Bandinio B1 grafiniai matavimo rezultatai

TB6 bandinio takumo riba pasiekta susidarius 421,8 MPa įtempims (F priedas, F6 lentelė). Pasiekus šią ribą, bangos sklidimo laikas sumažėjo $0,019 \cdot 10^{-6}$ s lyginant su pradiniu ultragarsinės

bangos sklidimo laiku. Pastebima, kad B1 ir TB6 bandiniams pasiekus takumo ribą, laiko pokytis yra vienodas: $0,019 \cdot 10^{-6}$ s.

TB6 bandiniu sklidusios ultragarsinės bangos laiko ir apskaičiuotos akustinės tamprumo konstantos priklausomybė nuo įtempių pateikta 4.2 paveiksle.



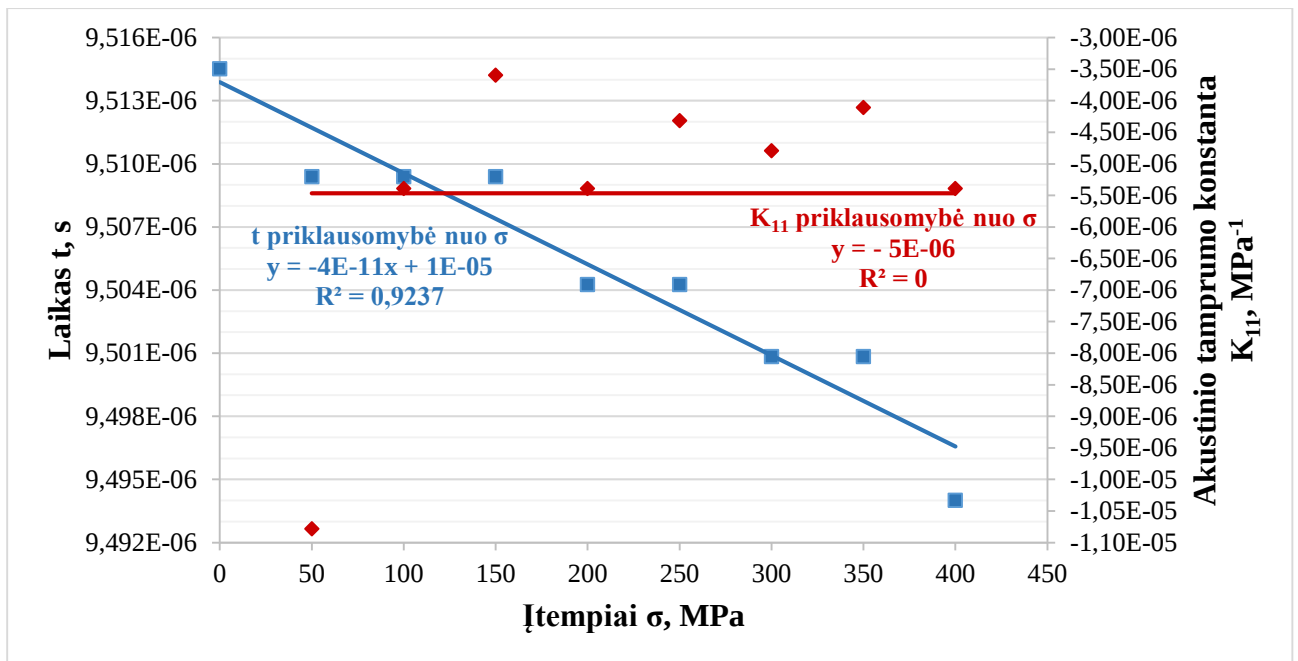
4.2 pav. Bandinio TB6 grafiniai matavimo rezultatai

Analizuojant gautas diagramas (4.1 pav. ir 4.2 pav.), pastebimas akivaizdus nustatytų akustinių tamprumo konstantų reikšmių skirtumas tarp termiškai neatleisto bandinio B1 ir termiškai atleisto bandinio TB6. Bandinio TB6 vidutinė akustinio tamprumo konstanta ($K_{11/\text{TB6}} = -5,293 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$) yra 21,45 % mažesnė nei B1 bandinio ($K_{11/\text{B1}} = -4,358 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$). Akustinės tamprumo konstantos sumažėjimas B6 bandinyje siejamas su terminiu atkaitinimu, po kurio bandinyje atsipalaidavo įtempiai.

4.2. Smėliuotų paviršių įtempių tyrimo rezultatai

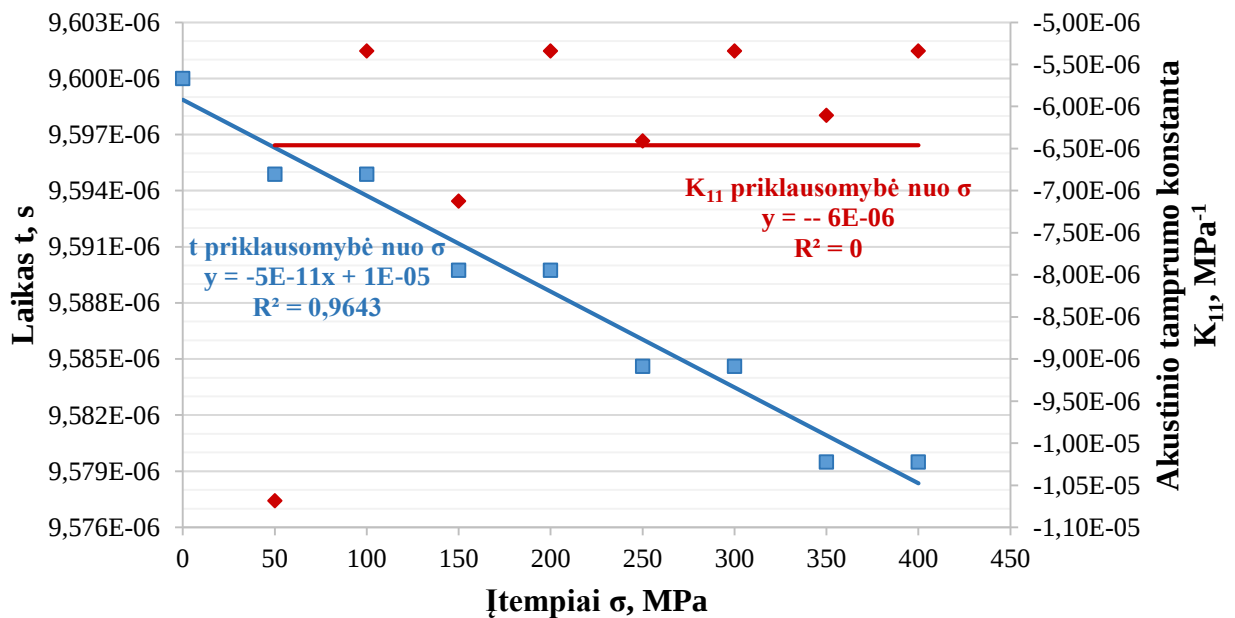
Tyrimo metu analizuojami smėliuoti paviršiai, kurių paviršiaus šiurkštumas nedidesnis nei $6,2 \mu\text{m}$. Per smėliuotą ir termiškai neatleistą bandinį (B2) ultragarso bangos pradinis sklidimo laikas yra $t_{0\text{B2}} = 9,509 \cdot 10^{-6}$ s. Termiškai atleisto ir smėliuoto bandinio (TB7) PIB pradinis sklidimo laikas – $t_{0\text{TB7}} = 9,595 \cdot 10^{-6}$ s. Taigi bandinyje TB7 ultragarso banga sklinda greičiau nei B2 bandinyje.

Tempimo bandymo metu nustatyta, kad bandinio B2 takumo riba yra 398,8 MPa (F priedas, F2 lentelė). Bandiniui B2 pasiekus takumo ribą, dėl susidariusių tempimo įtempių ultragarso banga sulėtėja $0,021 \cdot 10^{-6}$ s. B2 bandiniu sklidusios ultragarsinės bangos laiko ir apskaičiuotos akustinės tamprumo konstantos priklausomybė nuo įtempių pateikta 4.3 paveiksle.



4.3 pav. Bandinio B2 grafiniai matavimo rezultatai

Bandinio TB7 takumo riba pasiekta susidarius 424,4 MPa tempimo įtempiams (F priedas. F7 lentelė). Pasiekus takumo ribą, ultragarsinės bangos sklidimo laikas sumažėjo $0,021 \cdot 10^{-6}$ s. TB7 bandiniu sklidusios ultragarsinės bangos laiko ir apskaičiuotos akustinės tamprumo konstantos priklausomybė nuo įtempių pateikta 4.4 paveiksle.



4.4 pav. Bandinio TB7 grafiniai matavimo rezultatai

Pastebima, kad B2 ir TB7 bandiniams pasiekus takumo ribą, laiko sklidimo pokytis yra vienodas: $0,021 \cdot 10^{-6}$ s abejuose bandiniuose, tačiau šis pokytis yra santykinai 8,3 % didesnis nei bandinių, kurių paviršius yra be paruošimo.

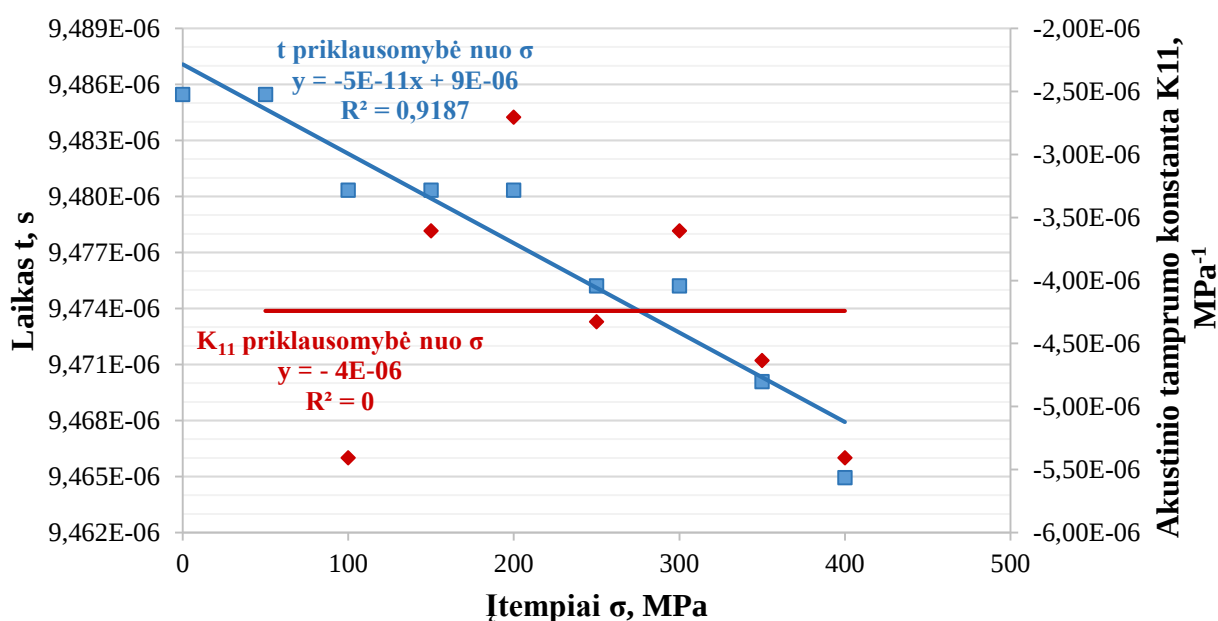
Analizuojant gautas diagramas (4.3 pav. ir 4.4 pav.) nustatyta, kad bandinio TB7 vidutinė akustinio tamprumo konstanta ($K_{11/TB7} = -6,461 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$) yra 18,21 % mažesnė nei B2 bandinio ($K_{11/B2} = -5,469 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$). Akustinės tamprumo konstantos pokytis siejamas su terminiu bandinio TB7 atleidimu.

Lyginant bandinius be paviršiaus paruošimo (B1 ir TB6) su smėliuotais bandiniais (B2 ir TB7) matyti, kad smėliuotuose bandiniuose abu nustatyti parametrai yra mažesni nei bandiniuose be paruošimo. Pradinis bangos sklidimo laikas bandinyje be paviršiaus paruošimo yra 1,29 % didesnis nei smėliuoto bandinio, o termiškai atleistame bandinyje be paviršiaus paruošimo 0,46 % didesnis nei termiškai atleistame smėliuotame bandinyje (TB7). Akustinio tamprumo konstanta smėliuoto, termiškai neatleisto bandinio B2 20,21 % mažesnė nei bandinio be paviršiaus paruošimo (B1), o smėliuoto termiškai atleisto bandinio (TB7) 18,09 % mažesnė nei bandinio be paviršiaus paruošimo (TB6).

4.3. Šratuotų paviršių įtempių tyrimo rezultatai

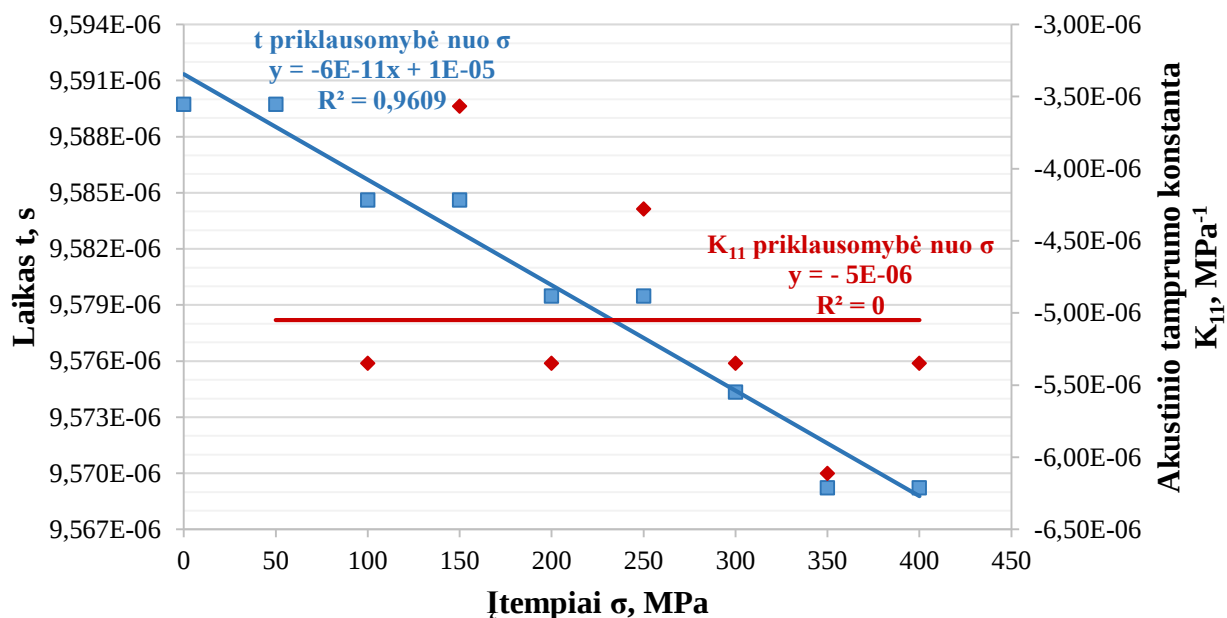
Analizuojant šratuotus bandinius, kurių šiurkštumas atitinka pirmą komparatoriaus segmentą ($R_y = 25 \text{ } \mu\text{m}$; $\pm 3 \text{ } \mu\text{m}$), nustatyta kad per šratuotą, termiškai neatleistą bandinį (B3) PIB pradinis sklidimo laikas yra $t_{0B3} = 9,485 \cdot 10^{-6} \text{ s}$. Šratuoto, termiškai atleisto bandinio (TB8) PIB pradinis sklidimo laikas – $t_{0TB7} = 9,589 \cdot 10^{-6} \text{ s}$.

Atliekant tempimo bandymą nustatyta, kad bandinio B3 takumo riba pasiekta susidarius 413,8 MPa įtempiams (F priedas, F3 lentelė). Pasiekus takumo ribą, ultragarso banga sulėtėja $0,021 \cdot 10^{-6} \text{ s}$. B3 bandiniu sklidusios ultragarsinės bangos laiko ir apskaičiuotos akustinės tamprumo konstantos priklausomybė nuo įtempių pateikta 4.5 paveiksle.



4.5 pav. Bandinio B3 grafiniai matavimo rezultatai

Terminiškai atleisto bandinio TB8 takumo riba pasiekama esant 403,5 MPa tempimo įtempiams (F priedas. F8 lentelė). Tempimo metu bandiniui TB8 pasiekus takumo ribą, pradinis bangos sklidimo laikas sumažėja $0,021 \cdot 10^{-6}$ s. TB8 bandiniu sklidusios ultragarsinės bangos laiko ir apskaičiuotos akustinės tamprumo konstantos priklausomybė nuo įtempių pateikta 4.6 paveiksle.



4.6 pav. Bandinio TB8 grafiniai matavimo rezultatai

Pastebima, kad B3 ir TB8 bandiniams pasiekus takumo ribą, laiko sklidimo pokytis yra vienodas: $0,021 \cdot 10^{-6}$ s abejuose bandiniuose, tačiau šis pokytis yra santykinai 8,3 % didesnis, nei bandinių, kurių paviršius yra be paruošimo. Lyginant šratuotus ir smėliuotus paviršius, kurių šiurkštumas skirtingas, pastebima, kad laiko pokytis išlieka vienodas ($0,021 \cdot 10^{-6}$ s).

Nustatyta akustinio tamprumo konstantos reikšmė TB8 bandinyje ($K_{II/TB8} = -5,049 \cdot 10^{-6}$ MPa $^{-1}$) yra 19,06 % mažesnė nei B3 bandinyje ($K_{II/B3} = -4,241 \cdot 10^{-6}$ MPa $^{-1}$).

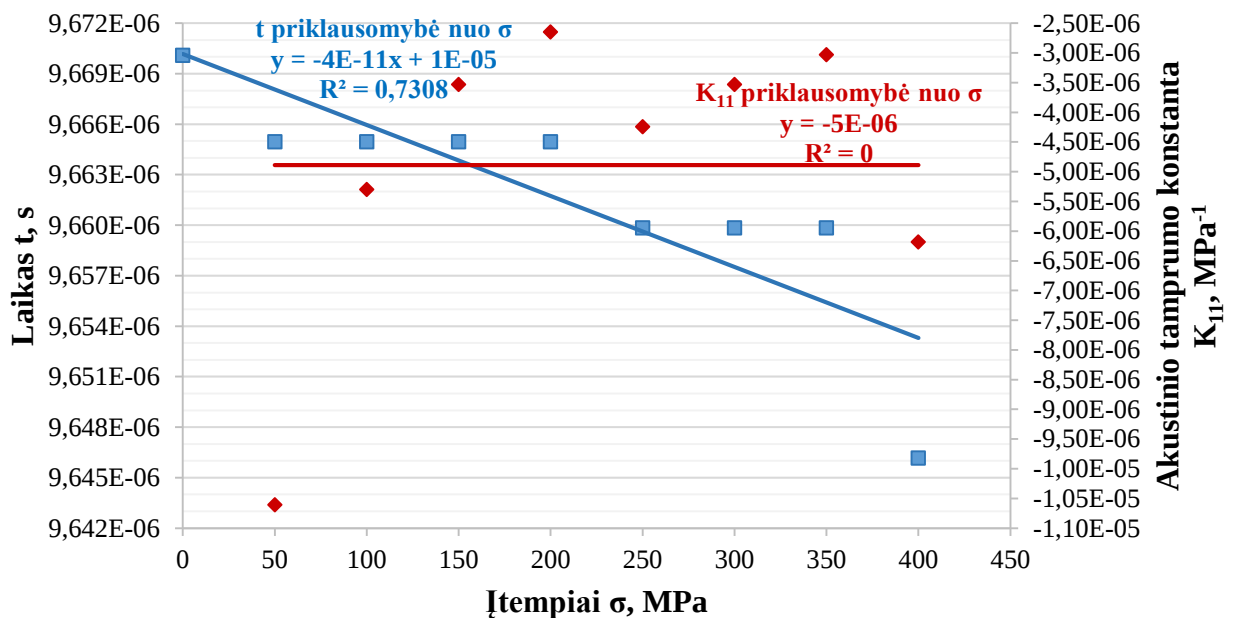
Iš gautų rezultatų matyti, kad terminiškai neatleisto bandinio su šratuotu paviršiumi (B3) PIB pradinis sklidimo laikas yra 0,31 % mažesnis nei smėliuoto bandinio (B2) ir 1,5 % mažesnis nei bandinio be paviršiaus paruošimo (B1). Lyginant terminiškai atleistus bandinius matyti, kad šratuoto paviršiaus bangos sklidimo laikas yra 0,11 % mažesnis nei smėliuoto bandinio (TB7) ir 0,57 % mažesnis nei bandinio be paviršiaus paruošimo (TB6).

Šratuotame ir terminiškai neapdorotame bandinyje (B3) akustinio tamprumo konstanta yra 2,76 % didesnė nei bandinyje, kurio paviršius be paruošimo (B1) ir 28,95 % didesnė už bandinio su smėliuotu paviršiumi (B2). Šratuotame ir terminiškai atleistame bandinyje (TB8) akustinio tamprumo konstanta yra 4,82 % didesnė nei bandinio, kurio paviršius be paruošimo (TB6) ir 27,96 % didesnė už bandinio su smėliuotu paviršiumi (TB7).

4.4. Dažytų paviršių įtempių tyrimo rezultatai

Tarpusavyje lyginant termiškai neatleistą (B4) ir atleistą (TB9) bandinius, kurių paviršius padengtas antikoroziniais epoksidiniais dažais (storis iki 70 μm), matyti, kad termiškai atleisto bandinio pradinis PIB sklidimo laikas ($t_{0\text{TB9}} = 9,715 \cdot 10^{-6}$ s) yra didesnis nei neatleisto bandinio ($t_{0\text{B4}} = 9,671 \cdot 10^{-6}$ s).

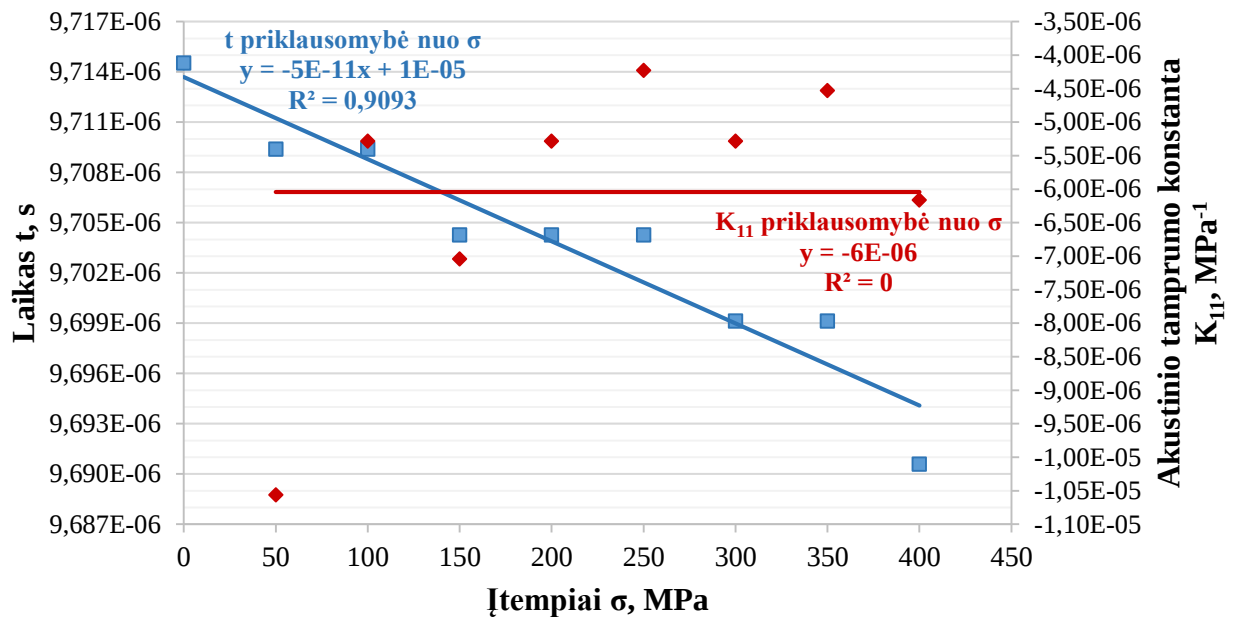
Tempimo bandymo metu, bandinio B4 takumo riba pasiekama susidarius 402,0 MPa tempimo įtempiams (F priedas, F4 lentelė). Atliekant bandymą nustatyta, kad prieš dažymą bandinių paviršius buvo paruoštas kokybiškai, nes, esant 402,0 MPa įtempių ribai, dažai neatsisluoksniavo ir nesutrūkinėjo. Bandiniui B4 pasiekus takumo ribą, ultragarso banga sulėtėja $0,024 \cdot 10^{-6}$ s. B4 bandiniu sklidusios ultragarsinės bangos laiko ir apskaičiuotos akustinės tamprumo konstantos priklausomybė nuo įtempių pateikta 4.7 paveiksle.



4.7 pav. Bandinio B4 grafiniai matavimo rezultatai

Termiškai atleisto bandinio TB9 takumo riba pasiekama susidarius 393,5 MPa tempimo įtempiams (F priedas, F9 lentelė). Tempimo metu bandiniui TB9 pasiekus takumo ribą, pradinis bangos sklidimo laikas sumažėjo $0,024 \cdot 10^{-6}$ s. TB9 bandiniu sklidusios ultragarsinės bangos laiko ir apskaičiuotos akustinės tamprumo konstantos priklausomybė nuo įtempių pateikta 4.8 paveiksle.

Pastebima, kad B4 ir TB9 bandiniams pasiekus takumo ribą, laiko sklidimo pokytis yra vienodas: $0,024 \cdot 10^{-6}$ s, tačiau šis pokytis yra santykinai 27,27 % didesnis nei bandinių, kurių paviršius yra be paruošimo ir 16,66 % didesnis nei smėliuotų ar šratuotų bandinių.



4.8 pav. Bandinio TB9 grafiniai matavimo rezultatai

Lyginant gautas akustinio tamprumo konstantas nustatyta, kad termiškai atleisto bandinio TB9 akustinio tamprumo konstanta ($K_{11/TB9} = -6,043 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$) yra 23,69 % mažesnė nei termiškai neatleisto bandinio B4 ($K_{11/B4} = -4,886 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$).

Termiškai neatleisto dažyto bandinio (B4) pradinis bangos sklidimo laikas yra 0,32 % didesnis nei bandinio be paviršiaus paruošimo (B1), 1,64 % didesnis nei smėliuoto bandinio (B2) ir 1,95 % didesnis nei šratuoto bandinio (B3). Termiškai atleisto dažyto bandinio (TB9) pradinis bangos sklidimo laikas yra 0,72 % didesnis nei bandinio be paviršiaus paruošimo (TB6), 1,19 % didesnis nei smėliuoto bandinio (TB7), 1,30 % didesnis nei šratuoto bandinio (TB8).

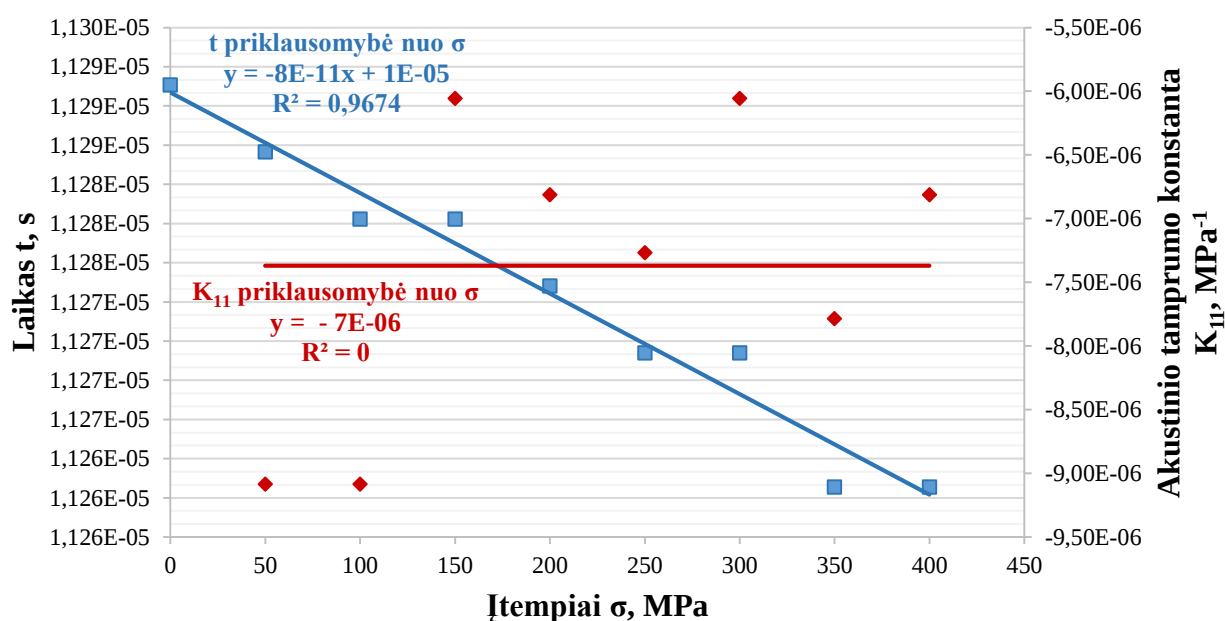
B4 bandinio akustinio tamprumo konstanta yra 10,81 % mažesnė už bandinio be paviršiaus paruošimo (B1) ir 13,20 % mažesnė už šratuoto bandinio (B3), tačiau 11,93 % didesnė nei smėliuoto bandinio (B2). TB9 bandinio akustinio tamprumo konstanta yra 12,41 % mažesnė už bandinio be paviršiaus paruošimo (TB6) ir 16,44 % mažesnė už šratuoto bandinio (TB8), tačiau 6,93 % didesnė nei smėliuoto bandinio (TB7).

4.5. Cinkuotų paviršių įtempių tyrimo rezultatai

Cinkuotų bandinių (B5 ir TB10) pradiniai paviršinės išilginės bangos sklidimo laikai yra artimi vienas kitam ($t_{0B5} = 11,306 \cdot 10^{-6} \text{ s}$, $t_{0TB10} = 11,290 \cdot 10^{-6} \text{ s}$). Ultragarstinės bangos sklidimo laikas artimas, nes cinkuojant bandinius B5 ir TB10, abu bandiniai buvo merkami ir laikomi karšto cinko vonioje. Esant 460 °C temperatūrai, B5 bandinyje padidėjo atomų paslankumas, atomai persitvarkė, sumažėjo kristalinės sandaros netobulumai, pasikeitė bandinio kietumas ir stiprumas, išnyko bandiniuose buvę liekamieji įtempiai.

Taip pat pastebima, kad cinkuotuose bandiniuose pradinis bangos sklidimo laikas yra didžiausias, lyginant su kitais tirtais bandiniais. Pasikeitimo priežastis – cinke ultragarsinės bangos sklidimo greitis yra mažesnis nei pliene (cinke $c_{PIB}=4170$ m/s, pliene $c_{PIB}=5920$ m/s), todėl PIB pereiti per cinko dangą ir pasiekti pagrindinį metalą reikia daugiau laiko.

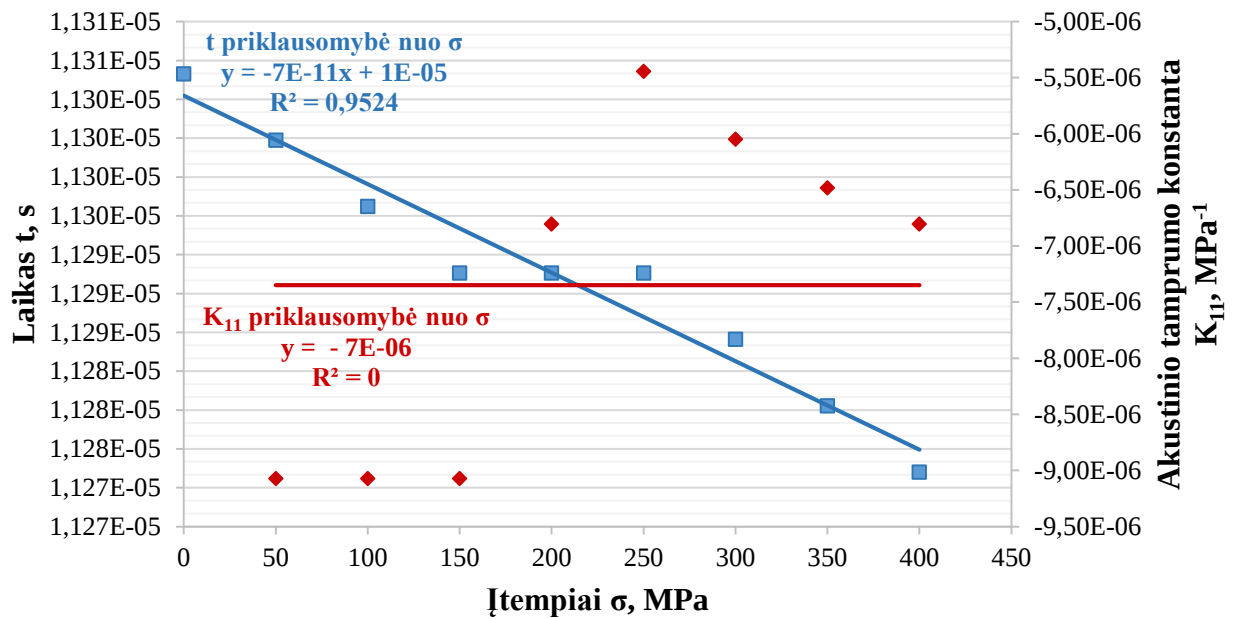
Bandiniui B5 atliekant tempimo bandymą, pasiekama takumo riba, kuri susidaro esant 402,8 MPa tempimo įtempiams (F priedas, F5 lentelė). Tempimo metu susidarius 402,8 MPa ribai, bandiniuose neįvyko jokie išoriniai cinko dangos pokyčiai. Bandiniui B5 pasiekus takumo ribą, ultragarso banga sulėtėja $0,031 \cdot 10^{-6}$ s. B4 bandiniu sklidusios ultragarsinės bangos laiko ir apskaičiuotos akustinės tamprumo konstantos priklausomybė nuo įtempių pateikta 4.9 paveiksle.



4.9 pav. Bandinio B5 grafiniai matavimo rezultatai

Terminiškai atleisto bandinio TB10 takumo riba pasiekama susidarius 359,4 MPa tempimo įtempiams (F priedas, F10 lentelė). Tempimo metu bandiniui TB10 pasiekus takumo ribą, pradinis bangos sklidimo laikas sumažėjo $0,031 \cdot 10^{-6}$ s. TB10 bandiniu sklidusios ultragarsinės bangos laiko ir apskaičiuotos akustinės tamprumo konstantos priklausomybė nuo įtempių pateikta 4.10 paveiksle.

Pastebima, kad B5 ir TB10 bandiniams pasiekus takumo ribą, laiko sklidimo pokytis yra vienodas: $0,031 \cdot 10^{-6}$ s, tačiau šis pokytis yra santykinai 28,57 % didesnis nei bandinių, kurių paviršius yra dažytas (B4 ir TB9), 36,36 % didesnis be paviršiaus paruošimo esančių bandinių ir 33,37 % didesnis nei smėliuotų ar šratuotų bandinių.



4.10 pav. Bandinio TB10 grafiniai matavimo rezultatai

B5 bandinio, kuris padengtas cinko danga, pradinis bangos sklidimo laikas yra 16,91 % didesnis už dažytą bandinio (B4), 17,29 % didesnis nei bandinio be paviršiaus paruošimo (B1), 18,82 % didesnis nei smėliuoto (B2) ir 19,19 % didesnis nei šratuoto (B3) bandinio. TB9 bandinio pradinis bangos sklidimo laikas yra 15,35 % didesnis nei dažyto bandinio (TB9), 16,19 % didesnis nei bandinio be paviršiaus paruošimo (TB6), 16,73 % didesnis nei smėliuoto (TB7) ir 16,86 % didesnis nei šratuoto bandinio (TB8).

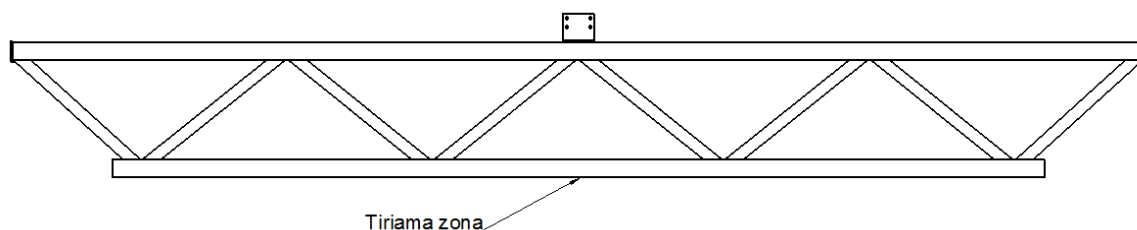
B5 bandinio akustinio tamprumo konstanta yra 25,58 % mažesnė už smėliuoto bandinio (B1), 33,51 % mažesnė už dažyto bandinio (B4), 40,70 % mažesnė už bandinio be paviršiaus paruošimo (B1) ir 42,29 % mažesnė už šratuoto bandinio (B3). TB10 bandinio akustinio tamprumo konstanta yra 12,33 % mažesnė už smėliuoto bandinio (TB7), 18,01 % mažesnė už dažyto bandinio (TB9), 28,19 % mažesnė už bandinio be paviršiaus paruošimo (TB6) ir 31,48 % mažesnė už šratuotuo bandinio (TB8).

Akustinio tamprumo konstantų dydžiai cinkuotuose bandiniuose yra mažiausi iš visų tirtų bandinių.

4.6. Liekamųjų ir tempimo įtempių nustatymas konstrukcijoje

Naudojant įtempių nustatymo algoritmą (3.5 skyrius) ir gautus eksperimentinio tyrimo rezultatus, atliekamas įtempių matavimas realioje konstrukcijoje. Liekamieji įtempiai matuojami keturiose vienodose konstrukcijose kurių žymenys K1, K2, K3 ir K4. Matuojama dviem etapais. Pirmame etape nustatomi neapkrautoje konstrukcijoje esantys liekamieji įtempiai, antrame etape – apkrautoje konstrukcijoje esantys suminiai tempimo ir liekamieji įtempiai. Kiekvienoje konstrukcijoje atliekami

keturi įtempių matavimai tempiamoje sijoje (I, II, III, IV) (4.11 pav.). Detalus santvaros brėžinys pateiktas G priede.

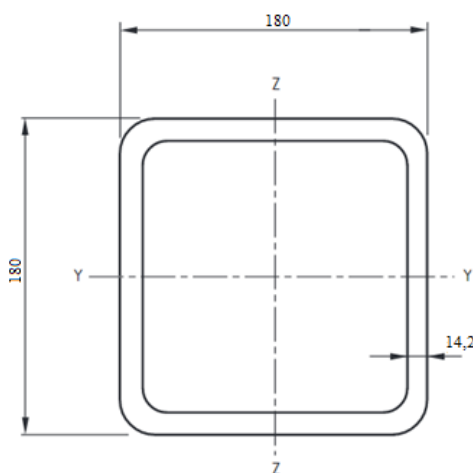


4.11. pav. Tikrinamos santvaros brėžinys

Prieš pradedant PIB metodu matuoti liekamuosius įtempius nustatomi pagrindiniai įtempių matavimo algoritme nurodyti reikalavimai.

Plieno ir jo paviršiaus identifikavimas

Įtempių matavimas atliekamas ant S355J2 plieno, trijų plokščių strypų santvaros su trikampių tinkleliu. Santvaros tempiama sija yra kvadratinio profilio (matmenys milimetrais pateikti 4.12 paveiksle), kuris atitinka standarto *LST EN ISO 10219-2:2006* keliamus reikalavimus.



4.12 pav. S355J2 plieno kvadratinis profilis

Santvaros plieno paviršius dažytas antikoroziniais epoksidiniais dažais *Interseal 1052*. Susidariusių dažų sluoksnio storis nustatytas įtempių matavimo vietose, naudojant dažų storio matuoklį *LIMIT 5100*. Dažų storio vidutinės reikšmės pateiktos 4.1 lentelėje.

Išmatavus dažų storį įsitikinta, kad konstrukcija atitinka sąlygas, pagal kurias buvo nustatyta akustinio tamprumo konstanta dažytame B4 bandinyje.

4.1 lentelė. Išmatuotas dažų storis konstrukcijose

	Vidutinis dažų storis, μm			
	I	II	III	IV
K1	65,1	62,4	66,3	64,3
K2	71,6	69,1	58,7	65,4
K3	62,4	66,3	59,9	67,4
K4	72,0	69,3	67,2	74,7

Ultragarso bangos sklidimo laikas

Pirmame etape nustatomi liekamieji įtempiai neapkrautose konstrukcijose, kurios yra gamybos aikštelėje. Ant tiriamųjų zonų dedami PIB keitikliai, kurie sugeneruoja PIB bangą matomą ultragarsinio defektoskopo ekrane. Kiekvienoje matavimo vietoje fiksuojamas bangos nueitas kelias (*l*). Gautas rezultatas išreiškiamas laiku (4.2 lentelė).

Antrame etape tiriamos jau sumontuotos konstrukcijos, todėl nustatomi ne tik liekamieji bet ir konstrukcijas veikiantys tempimo įtempiai. Ant tiriamųjų zonų dedami PIB keitikliai ir fiksuojamas bangos nueitas kelias (*l*). Gautas rezultatas išreiškiamas laiku (4.3 lentelė).

Įtempių nustatymas

Naudojant eksperimentinio tyrimo metu nustatytą dažyto bandinio B4 pradinį bangos sklidimo laiką ($t_0=9,670 \cdot 10^{-6}$ s) ir akustinio tamprumo konstantą ($K_{11}=-4,886 \cdot 10^{-6}$ MPa⁻¹), pagal 3.3 formulę apskaičiuojami įtempiai esantys konstrukcijoje. Gauti rezultatai pateikti 4.2 ir 4.3 lentelėse. Taip pat šios santvaros įtempiai gali būti nustatyti pagal dažyto bandinio B4 diagrama (4.10 pav.). Nustatyta, kad įtempių vidurkis neapkrautoje konstrukcijoje yra 75,93 MPa, o apkrautoje – 156,09 MPa.

4.2 lentelė. Nesumontuotos santvaros PIB sklidimo laikas ir įtempiai

	K1		K2		K3		K4	
	t, s	σ, MPa	t, s	σ, MPa	t, s	σ, MPa	t, s	σ, MPa
I	$9,668 \cdot 10^{-6}$	38,09	$9,668 \cdot 10^{-6}$	38,09	$9,665 \cdot 10^{-6}$	105,83	$9,665 \cdot 10^{-6}$	105,83
II	$9,667 \cdot 10^{-6}$	74,08	$9,666 \cdot 10^{-6}$	84,66	$9,666 \cdot 10^{-6}$	84,66	$9,667 \cdot 10^{-6}$	74,08
III	$9,667 \cdot 10^{-6}$	74,08	$9,667 \cdot 10^{-6}$	74,08	$9,667 \cdot 10^{-6}$	74,08	$9,666 \cdot 10^{-6}$	84,66
IV	$9,665 \cdot 10^{-6}$	105,83	$9,667 \cdot 10^{-6}$	74,08	$9,668 \cdot 10^{-6}$	38,09	$9,666 \cdot 10^{-6}$	84,66

4.3 lentelė. Sumontuotos santvaros PIB sklidimo laikas ir įtempiai

	K1		K2		K3		K4	
	t, s	σ, MPa	t, s	σ, MPa	t, s	σ, MPa	t, s	σ, MPa
I	$9,663 \cdot 10^{-6}$	148,16	$9,661 \cdot 10^{-6}$	190,48	$9,663 \cdot 10^{-6}$	148,16	$9,661 \cdot 10^{-6}$	190,48
II	$9,662 \cdot 10^{-6}$	169,32	$9,663 \cdot 10^{-6}$	148,16	$9,662 \cdot 10^{-6}$	169,32	$9,661 \cdot 10^{-6}$	190,48
III	$9,662 \cdot 10^{-6}$	169,32	$9,663 \cdot 10^{-6}$	148,16	$9,662 \cdot 10^{-6}$	169,32	$9,663 \cdot 10^{-6}$	148,16
IV	$9,663 \cdot 10^{-6}$	148,16	$9,663 \cdot 10^{-6}$	148,16	$9,661 \cdot 10^{-6}$	190,48	$9,662 \cdot 10^{-6}$	169,32

4.7. Ketvirtojo skyriaus išvados

1. Analizuojant gautas diagramas matyti, kad įtempiai tiesiogiai priklauso nuo ultragarsinės bangos sklidimo laiko – didėjant įtempiams, mažėja bangos nueitas kelias, tuo pačiu mažėja ir bangos sklidimo laikas.

2. Ultragarsinės bangos pradinis sklidimo laikas yra didžiausias cinkuotuose bandiniuose. Cinkuotame, termiškai neatleistame bandinyje bangos sklidimo laikas yra 17,29 % didesnis už

bandinio be paviršiaus paruošimo, o termiškai atleistame – didesnis 16,20 %. Ultragarstinės bangos pradinio sklidimo laiko skirtumas tarp be paviršiaus paruošimo, smėliuotų, šratuotų ir dažytų bandinių svyruoja nuo 0,3 iki 2,0 %.

3. Gauti rezultatai parodė, kad pradinio bangos sklidimo laiko t_0 ir laiko, kai bandiniuose susidarę 400 MPa įtempiai, skirtumas lygus tarp termiškai atleistų ir neatleistų bandinių, kurių paviršiai vienodi. Paviršiuose be paruošimo laiko skirtumas yra $0,019 \cdot 10^{-6}$ s, smėliuotuose ir šratuotuose bandiniuose – $0,021 \cdot 10^{-6}$ s, dažytuose – $0,024 \cdot 10^{-6}$ s, cinkuotose bandiniuose – $0,031 \cdot 10^{-6}$ s.

4. Smėliuoto ir termiškai neatleisto bandinio akustinio tamprumo konstanta yra 28,96 % mažesnė nei šratuoto bandinio ir 21,31 % mažesnė nei bandinio be paviršiaus paruošimo. Lyginat atleistus bandinius, smėliuoto bandinio akustinio tamprumo konstanta yra 27,96 % mažesnė nei šratuoto bandinio ir 18,09 % mažesnė nei bandinio be paviršiaus paruošimo.

5. Tiriant bandinius kurių paviršius padengtas dažų ar cinko danga pastebėta, kad akustinio tamprumo konstanta didesnė dažytuose nei cinkuotuose bandiniuose. Dažyto ir termiškai neapdoroto bandinio akustinio tamprumo konstanta yra 33,51 % didesnė už cinkuoto bandinio. Dažytą bandinį atleidus, akustinio tamprumo konstanta 18,01 % didesnė už termiškai atleisto cinkuoto bandinio.

6. Prieš dažymą bandinių paviršiai valomi šratais, todėl dažytų bandinių akustinio tamprumo konstantai įtaką daro ne tik dažymo, bet ir šratavimo procesas. Lyginat akustinio tamprumo konstantas tarp šratuotų ir dažytų termiškai neatleistų bandinių, pastebima, kad dažyto bandinio akustinio tamprumo konstanta 13,02 % mažesnė už šratuoto ir 10,08 % mažesnė už bandinio be paviršiaus paruošimo. Kai dažytas bandinys termiškai atleidžiamas, akustinio tamprumo konstanta 16,44 % mažesnė už šratuoto ir 12,41 % mažesnė už bandinio be paviršiaus paruošimo.

7. Cinkuoti bandinių paviršiai prieš cinkavimą valomi smėlio srautu, todėl akustinio tamprumo konstantai įtaką daro ne tik cinkavimo, bet ir smėliavimo procesas. Cinkuoto, termiškai neatleisto bandinio akustinio tamprumo konstanta yra 25,58 % mažesnė nei smėliuoto bandinio ir 40,70 % mažesnė už bandinio be paviršiaus paruošimo. Termiškai atleisto cinkuoto bandinio akustinio tamprumo konstanta yra 12,33 % mažesnė nei smėliuoto bandinio ir 28,19 % mažesnė už bandinio be paviršiaus paruošimo.

8. Eksperimentinio tyrimo metu nustatyta, kad termiškai atleistų bandinių akustinio tamprumo konstantos yra mažesnės nei bandinių be terminio atleidimo. Be paviršiaus paruošimo esančiuose bandiniuose po terminio atleidimo akustinio tamprumo konstanta sumažėja 21,44 %, smėliuotuose bandiniuose – 18,14 %, šratuotuose – 19,06 %, dažytuose bandiniuose – 23,67 %, o cinkuotuose tik – 0,28 %. Dėl cinkavimo karšto cinko vonioje dalinai atsipalaiduoja bandiniuose esantys įtempiai, todėl terminis atleidimas neturi įtakos cinkuotų bandinių akustinio tamprumo konstantai.

BENDROSIOS IŠVADOS

1. Eksperimentinio tyrimo metu nustatyta, tiesinė priklausomybė tarp ultragarso paviršinės išilginės bangos sklidimo laiko ir įtempių (žr. 4.1 – 4.10 pav.).

2. Nustatytos akustinio tamprumo konstantos termiškai neapdorotų bandinių: paviršiaus be paruošimo – $K_{11/B1} = -3,813 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$; smėliuoto paviršiaus – $K_{11/B2} = -5,469 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$; šratuoto paviršiaus – $K_{11/B3} = -4,241 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$; dažyto paviršiaus – $K_{11/B4} = -4,886 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$; cinkuoto paviršiaus – $K_{11/B5} = -7,349 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$. Taikant PIB metodą įtempių nustatymui, eksperimentiniu būdu patvirtinta, kad akustinio tamprumo konstanta priklauso nuo bandinių paviršiaus paruošimo.

3. Nustatytos akustinio tamprumo konstantos termiškai atleistų bandinių: paviršiaus be paruošimo – $K_{11/TB6} = -4,631 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$; smėliuoto paviršiaus – $K_{11/TB7} = -6,461 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$; šratuoto paviršiaus – $K_{11/TB8} = -5,049 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$; dažyto paviršiaus – $K_{11/TB9} = -6,043 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$; cinkuoto paviršiaus – $K_{11/TB10} = -7,370 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$. Tyrimo rezultatai parodė, kad terminis atleidimas daro įtaką akustinio tamprumo konstantai.

4. Remiantis tyrimo rezultatais ir taikant sudarytą PIB metodo algoritmą, nustatyti įtempiai konstrukcijose, kurios pagaminta iš konstrukcinio plieno S355J2. Tiriamų konstrukcijų paviršiai šratuoti ir padengti 70 μm epoksidinių dažų sluoksniu. Gauti rezultatai parodė, kad neapkrautos konstrukcijos įtempių vidurkis apie 80 MPa, o apkrautos – apie 160 MPa.

NAUDOTA LITERATŪRA

- Mikuckis, F. 2008. *Medžiagų atsparumas*. Kaunas: Ardiva.
- Bereišis, J.; Stasiškis, A. 2010. *Inžinerinė medžiagų mechanika*. Kaunas: Technologija.
- Valiulis, A. V. 2005. *Naujos medžiagos*. Vilnius: Technika.
- Bendikas, J. 2003. *Suvirintos konstrukcijos*. Vilnius: Technika.
- Jurčius, A. 2010. *Konstrukcinio plieno liekamųjų įtempių vibracinio atleidimo tyrimai*. Daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius: Technika.
- Tall, L. 1991; Residual Stresses in Welded Plates a Theoretical Study, in *Welding Journal* (43). Bethlehem: Lehigh University. 10–21.
- Rumbutis, L.; Višniakas, I.; Jurčius, A. 2010. Konstrukcinio plieno suvirinimo siūlių tyrimas suvirinimo metu naudojant vibracijos energiją iš *Mechanika, medžiagų inžinerija, pramonės inžinerija ir vadyba*: Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „Mokslas Lietuvos ateitis“. Vilnius: Technika. 73–76.
- Lu, J.; Flavenot, J. F. 1988. Prediction of Residual Stress Relaxation during Fatigue & taking into Account These Stresses in Multiaxial Fatigue Criterion, in *Congress Experimental Mechanics*. Cambridge: University of Cambridge. 278–285.
- Tosha, K., et. al. 2005. Shot Peening and Grit Blasting - Effects on Surface Integrity-, in *Conf Proc: ICSP-9*. United States: American Institute of Physics. 400–405.
- Žiliukas, A. 2009. *Irimo mechanika*. Vilnius: Technika.
- Totten, G.; Howes, M.; Inoue, T. 2002. *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*. United States: ASM International.
- Leaf, W. 1952. Techniques in Residual Stress Analysis, in *SESA*, Vol. IX, No. 2. Japan: Singapore University.
- French, D.N.; MacDonald, B. A. 1969. Experimental Methods of X-ray Stress Analysis, in *Experimental Mechanics*, Oct. '69. Cambridge: University of Cambridge. 242–273.
- Abuku, S.; Cullity, B. D. 1971. A Magnetic Method for the Determination of Residual Stress, in *Experimental Mechanics*, May. Cambridge: University of Cambridge. 217–223.
- Lihavainen, V. 2004. Fatigue Strength of Longitudinal Attachment Improved by Ultrasonic Impact Treatment, in *Journal Welding in the World* 48. Springer. 5–12
- Kulikauskas, L. 1997. *Medžiagotyra. Konstrukcinės medžiagos*. Vilnius: Žara.
- Gargasas, J.; Gedzevičius, I.; Nagurnas, S. 2011. Terminiškai purkštų dangų tyrimas ultragarsiniais metodais iš *Mechanika, medžiagų inžinerija, pramonės inžinerija ir vadyba*: Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „Mokslas Lietuvos ateitis“. Vilnius: Technika. 75–78.

Marcinkiewicz, A. 2010. *Coure of the lectures to the ultrasonic technique of the nondestructive testing*. Minsk.

Sajauskas, S. 2002. *Paviršinės išilginės bangos*. Kaunas: Technologija.

Walaszek, H., et. al. 2006. Ultrasonic Stress Measurement: Application to Welded Joints, in *Journal ECNDT*. France: ECNDT. 12-18.

Walaszek, H., Bouteille, P. 2007. Application of Ultrasonic Stress Measurement to Preload Assessment on Already Tightened Bolts, in *Journal CETIM*. France: CETIM. 21-29.

LST EN ISO 10025-2:2005/AC:2005 Karštai valcuoti konstrukcinio plieno gaminiai. 2 dalis. Nelegiruoto konstrukcinio plieno techninės tiekimo sąlygos. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas. 5 p.

LST EN ISO 6507-1:2006 Metalai. Vickerso kietumo nustatymas. 1 dalis. Bandymo metodas (tapatus ISO 6507-1:2005). Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas. 21 p.

LST EN ISO 6892-1:2016 Metalinės medžiagos. Tempimo bandymai. 1 dalis. Bandymo kambario temperatūroje metodas (tapatus ISO 6892-1:2016). Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas. 81 p.

LST EN ISO 1090-2: 2008+A1:2011 Plieninių ir aliuminių konstrukcijų darbų atlikimas. 2 dalis. Techniniai plieninių konstrukcijų darbų atlikimo reikalavimai. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas. 209 p.

LST EN ISO 17663:2009 Suvirinimas. Suvirinimui ir panašioms procesams naudojamo terminio apdorojimo kokybės reikalavimai (tapatus ISO 17663:2009). Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas. 16 p.

LST EN ISO 4287:2007 Geometrinės gaminio specifikacijos (GGS). Paviršiaus reljefas. Profilio metodas. Terminai, apibrėžtys ir paviršiaus reljefo parametrai (tapatus ISO 4287:1997+ Cor.1:1998 +Cor2:2005). Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas. 32 p.

LST EN ISO 8503-1:2012 Plieninio pagrindo paruošimas prieš dengiant dažais ir su jais susijusiais produktais. Srautinio valymo būdu paruošto plieno pagrindo šiurkštumo charakteristikos. 1 dalis. ISO paviršiaus profilio komparatoriaus, naudojamo abrazyvinio srautinio valymo būdu paruoštam paviršiui įvertinti, techniniai reikalavimai ir apibrėžtys (tapatus ISO 8503-1:2012). Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas. 11 p.

LST EN ISO 8503-2:2012 Plieninio pagrindo paruošimas prieš dengiant dažais ir su jais susijusiais produktais. Srautinio valymo būdu paruošto plieninio pagrindo šiurkštumo charakteristikos. 2 dalis. Abrazyvinio srautinio valymo būdu paruošto plieno paviršiaus profilio klasifikavimo metodas. Komporatoriaus naudojimas (tapatus ISO 8503-2:2012). Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas. 7 p.

LST EN ISO 12944-4:2000 Dažai ir lakai. Plieninių konstrukcijų apsauga nuo korozijos apsauginėmis dažų sistemomis. 4 dalis. Paviršiaus tipai ir paviršiaus paruošimas (tapatus ISO 12944-4:1998). Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas. 28 p.

LST EN ISO 8501-1:2007 Plieninio pagrindo paruošimas prieš padengiant dažais ir su jais susijusiais produktais. Regimasis paviršiaus švarumo įvertinimas. 1 dalis. Nepadengtų plieninių pagrindų ir plieninių pagrindų, nuo kurių visiškai pašalinta ankstesnioji danga, surūdijimo ir paruošimo laipsniai (tapatus ISO 8501-1:2007). Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas. 68 p.

LST EN ISO 11124:2002 Plieninio pagrindo paruošimas prieš padengiant dažais ir su jais susijusiais produktais. Srautinio valymo metalinių abrazyvų techniniai reikalavimai. 2 dalis. Grūdintos geležies žvirgždas (tapatus ISO 11124-2:1993). Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas. 8 p.

LST EN ISO 10289:2004 Metalinių ir kitų neorganinių dangų ant metalinio pagrindo korozijos tyrimo metodai. Pavyzdžių ir gaminių, patikrintų korozijos tyrimais, įvertinimas (tapatus ISO 10289:1999). Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas. 24 p.

LST EN ISO 14713-2:2010 Cinko dangos. Konstrukcijose esančios geležies ir plieno apsaugos nuo korozijos gairės ir rekomendacijos. 2 dalis. Karštas cinkavimas (tapatus ISO 14713-2:2009). Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas. 21 p.

LST EN ISO 1461:2009 Ketaus ir plieno gaminių dangos, gautos karštojo cinkavimo būdu. Techniniai reikalavimai ir bandymo metodai (tapatus ISO 1461:2009). Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas. 19 p.

LST EN ISO 12668-1:2010 Neardomieji bandymai. Ultragarsinės kontrolės įrangos apibūdinimas ir patikra. 1 dalis. Matuokliai. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas. 45 p.

LST EN ISO 10219-2:2006 Nelegiruoto ir smulkiagrūdžio plieno šaltai formuoti suvirintieji tuščiaviduriai statybiniai profiliuočiai. 2 dalis. Leidžiamosios nuokrypos, matmenys ir profilio charakteristikos. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas. 36 p.