VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MEDŽIAGOTYROS IR SUVIRINIMO KATEDRA

Kęstutis Dauskurdis

R65 TIPO BĖGIO KONTAKTINIO SUVIRINIMO JUNGTIES TYRIMAS

RESEARCH OF THE FLASH WELDING OF THE R65 TYPE RAIL JOINT

Baigiamasis magistro darbas

Medžiagų ir suvirinimo inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H70005

Pramonės inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2014

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MEDŽIAGOTYROS IR SUVIRINIMO KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

_____
(Parašas)

_____
(Vardas, pavardė)

2014- _____

Kęstutis Dauskurdis

R65 TIPO BĖGIO KONTAKTINIO SUVIRINIMO JUNGTIES TYRIMAS

RESEARCH OF THE FLASH WELDING OF THE R65 TYPE RAIL JOINT

Baigiamasis magistro darbas

Medžiagų ir suvirinimo inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H70005

Pramonės inžinerijos studijų kryptis

Vadovas: _____ _____ _____
(Moksl. laipsnis, vardas pavardė) (Parašas) (Data)

Konsultantas: _____ _____ _____
(Moksl. laipsnis, vardas pavardė) (Parašas) (Data)

Vilnius, 2014

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Mechanikos fakultetas
Medžiagotyros ir suvirinimo katedra

ISBN ISSN
Egz. sk.: 2
Data: 2014-05-26

Pramonės inžinerijos studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas: R65 tipo bėgio kontaktinio suvirinimo jungties tyrimas

Autorius: Kęstutis Dauskurdis **Vadovas:** doc. dr. Vitalijus Rudzinskas

Kalba

[X] lietuvių

[ ] anglų

Anotacija

Šiame baigiamajame magistro darbe tiriama R65 tipo bėgio kontaktinio suvirinimo jungtis. Supažindinama su pagrindiniais mokslininkų parašytais straipsniais, bėgių kontaktinio suvirinimo tematika. Pateikiama tyrimų metodika, kurią sudaro šios dalys: apžiūrimasis paviršiaus tyrimas, ultragarsinės kontrolės tyrimas, važiuojamasis paviršiaus kiečio bandymas, sulydimo zonos nustatymas, termiškai suminkštintos zonos kiečio matavimas, mikrokietumo matavimas, mikroskopinis jungties matomosios terminio poveikio ir sulydymo zonų tyrimas, smūginio tąsumo bandymas, cheminė analizė, aširačio bandažo ir bėgio sąveikos tyrimas baigtinių elementų metodu (BEM). Išanalizuoti gauti tyrimo rezultatai, kurie įvertina suvirinimo siūlės kokybę. Pateiktos tiriamojo darbo išvados.

Darbą sudaro: įvadas, literatūros apžvalga, tyrimo metodika, tyrimo rezultatai, išvados, literatūra.

Darbo apimtis: 80 p. teksto be priedų, 63 iliustr., 9 lent., 25 bibliografiniai šaltiniai.

Reikšminiai žodžiai: ardomoji kontrolė, bėgiai, defektai, jungtis, kontaktinis suvirinimas.

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

ISBN ISSN
Copies No.: 2
Date: 2014-05-26

Master Degree Studies Industrial Engineering Study Programme Final (Master's Thesis)

Title: Research of the Flash Welding of the R65 Type Rail Joint

Author: Kęstutis Dauskurdis **Academic supervisor:** doc. dr. Vitalijus Rudzinskas

Language

[ ] lithuanian

[X] english

Annotation

In the final thesis of masters degree I analyze the R65 type rail joint that were welded flash butt. Introducing with scientific articles about flash butt welding of rails. Survey methodology of the research, which consists of the following parts: visual surface review of welded joint, ultrasonic rail inspection, hardness test of upper part of the rail, fusion area research, the measurement test hardness of heat-softened area, the measurement test microhardness, microstructure research of the welded joint, impact strenght experiments, chemical analysis of welded joint, wheel-rail interaction research of the finite element method (FEM). Analyzes the results of the research, who assess the quality of weld. The conclusion is based on the results of this research.

The structure of thesis consists of parts: introduction, the overview of literature, methodology of the research, results of the research, conclusions and references.

This thesis consists of 80 pages of text without appendixes, 63 pictures, 9 tables and 25 bibliographical sources.

Keywords: defects, flash butt welding, rails, subversion control, weld.

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS 7

LENTELIŲ SĄRAŠAS 11

SANTRUMPOS 12

ĮVADAS 13

1. LITERATŪROS APŽVALGA 17

1.1. Bėgių kontaktinis suduriamasis suvirinimas 17

1.1.1. Suduriamasis aplydomasis suvirinimas 18

1.1.2. Suvirintosios siūlės metalo kristalizacija 20

1.1.3. Kontaktinio suvirinimo deformacijos 21

1.2. Geležinkelio bėgių, suvirintų kontaktiniu būdu, jungties mikrostruktūros ir liekamųjų įtempių pokyčiai 22

1.2.1. Eksperimentinė metodika 22

1.2.2. Rezultatai ir jų aptarimas 24

1.3. Horizontaliai lūžusių bėgių, suvirintų kontaktiniu būdu, jungties tyrimai 36

1.3.1. Tyriamieji metodai 36

1.3.2. Darbo rezultatai 36

2. TIRIAMOJO DARBO METODIKA 43

2.1. Apžiūrimasis paviršiaus tyrimas 43

2.2. Ultragarsinės kontrolės tyrimas 44

2.3. Važiuojamasis paviršiaus kiečio bandymas 46

2.4. Sulydymo zonos nustatymas. Forma ir matmenys 47

2.5. Termiškai suminkštintos zonos kiečio matavimas 48

2.6. Mikroskopinis jungties matomosios terminio poveikio ir sulydymo zonų tyrimas. Mikrokietumo matavimas 49

2.7. Smūginio tąsumo bandymas 52

2.8. Cheminė analizė 53
2.9. Aširačio bandažo ir bėgio sąveikos tyrimas baigtinių elementų metodu (BEM) 54
3. TIRIAMOJO DARBO REZULTATAI 56
3.1. Apžiūrimojo paviršiaus tyrimo rezultatai 56
3.2. Ultragarsinės kontrolės tyrimo rezultatai 56
3.3. Važiuojamojo paviršiaus kiečio bandymo rezultatai 57
3.4. Sulydymo zonos nustatymas. Forma ir matmenys 57
3.5. Termiškai suminkštintos zonos kiečio matavimo rezultatai 59
3.6. Mikrokietumo matavimo rezultatai 61
3.7. Mikroskopinio jungties matomosios terminio poveikio ir sulydymo zonų tyrimo rezultatai 64
3.8. Smūginio tąsumo bandymo rezultatai 69
3.9. Cheminės analizės rezultatai 70
3.10. Aširačio bandažo ir bėgio sąveikos tyrimas baigtinių elementų metodu (BEM) 71
3.10.1. Tiriamojo objekto konstrukcinis sukūrimas 73
3.10.2. Fizikinių dydžių ir parametrų priskirimas 73
3.10.3. Konstrukcinio modelio suskaidymas į baigtinius elementus („tinklelio“ sudarymas) 74
3.10.4. Kietų kūnų įtvirtinimas ir apkrovų priskirimas 75
3.10.5. Rezultatų pateikimas 76
IŠVADOS 77
LITERATŪRA 79
PRIEDAI 81

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1. pav. Kontaktiniu aplydomuoju būdu suvirintas R65 tipo bėgis.....15

1.1 pav. Bėgių kontaktinio suvirinimo mašinos: a – mobili, b – stacionari.....17

1.2 pav. Suduriamojo aplydomojo suvirinimo schema: P_{sl} – elektrodų slėgio jėga; P_{sus} – bėgių susodinimo jėga; Δ_{1sus}, Δ_{2sus} – bėgių susodinimo dydžiai; Δ_{apl} – aplydymo dydis l_1, l_2 – bėgių iškyšų ilgis.....18

1.3 pav. Suduriamojo aplydomojo suvirinimo proceso schema: a – pradinis bėgių kontaktas; b – skystų jungčių susidarymas ir dalinis metalo garavimas; c – skysto metalo, dujų garų ir oksidų išmetimas; d – išlajos formavimas po susodinimo ir metalo kristalizacija.....19

1.4 pav. Bėgių plieno suvirintosios jungties struktūra (padidinta 100 kartų): A–F – sulydymo sričių struktūros; I – suvirintosios siūlės išlydyto metalo sritis; II – terminio poveikio sritis; III – pagrindinio metalo sritis; T – temperatūra.....20

1.5 pav. UIC 60 tipo bėgio profilis (mm).....22

1.6 pav. Bėgio pjaustymas metalografiniams bandymams.....23

1.7 pav. Bėgių jungties, grūdelių augimo srities, mikrostruktūros (padidinta 100 kartų): a – šalia suvirinimo siūlės zonos vidurio; b – 6 mm toliau nuo suvirinimo siūlės zonos vidurio; c – 9 mm toliau nuo suvirinimo siūlės zonos vidurio.....24

1.8 pav. Rekristalizacinės srities mikrostruktūra suvirinimo siūlės zonoje. Padidinta 100 kartų.....25

1.9 pav. Pirmosios ir antrosios srities sulydymo mikrostruktūra suvirinimo siūlės zonoje. Padidinta 100 kartų.....25

1.10 pav. Dalinai transformuotos srities mikrostruktūra suvirinimo siūlės zonoje. Padidinta 100 kartų.....26

1.11 pav. Dalinai transformuotos srities, padidinto vaizdo, mikrostruktūros suvirinimo siūlės zonoje. Padidinta 100 kartų.....26

1.12 pav. UIC 60 tipo bėgio pagrindinio metalo mikrostruktūra. Padidinta 100 kartų.....27

1.13 pav. Bėgių, suvirintų kontaktiniu būdu, schematinė suvirinino siūlės zonos mikrostruktūros diagrama.....28

1.14 pav. MnS nuosėdų spektrinė analizė.....29

1.15 pav. MnS nuosėdos bėgių suvirinino siūlės zonoje.....30

1.16 pav. Poringumas bėgių suvirinino siūlės zonoje.....30

1.17 pav. Bėgių suvirinimo jungties, išilginio pjūvio, sulydymo makrošlifas.....31

1.18 pav. Bėgių galvutės suvirinimo jungties, išilginio pjūvio, sulydymo makrošlifas.....32
1.19 pav. Bėgių kakliuko suvirinimo jungties, išilginio pjūvio, sulydymo makrošlifas.....32
1.20 pav. Bėgių pado suvirinimo jungties, išilginio pjūvio, sulydymo makrošlifas.....33
1.21 pav. Bėgių galvutės, kakliuko ir pado, kontaktinės suvirinimo jungties, mikrokietumo rezultatai.....35
1.22 pav. Lūžę R65 tipo bėgiai suvirinti kontaktiniu būdu: 1, 2, 3 – bėgių lūžių eskizai.....36
1.23 pav. Suvirintų bėgių makroskopinio plyšio plitimo kryptis.....37
1.24 pav. Lūžusių bėgių paviršių sritys: a – makroskopinio lūžio paviršiaus vaizdas, b – schematiškas lūžio vaizdas su radialiniais ir ševroro ženklais bėgio kakliuko paviršiuje.....38
1.25 pav. Pusiau elipsinės srities kompleksinė paviršiaus morfologija: a, b – plyšio mikrostruktūros..38
1.26 pav. Pusiau elipsinės srities išorinis "vėduoklės" formos skilimas.....39
1.27 pav. Nedidelio padidinimo, pusiau elipsės formos nuovargio srities, fraktografija.....39
1.28 pav. Lūžio paviršiaus, prie sužadinimo srities, energijos dispersijos spektroskopijos analizė.....40
1.29 pav. Dideli oksidų intarpai, įstrigę pjaunant hidrauliniu pjovimo prietaisu susodintas medžiagas.....41
1.30 pav. Vertikali apkrova aširačiui pravažiuojant bėgiais ir susidarę tempimo komponentai kakliuke.....41
1.31 pav. Bėgių kakliuko vidurio, suvirinimo srities, vertikalus atasparumas liekamiesiems įtempiams.....42
2.1 pav. Nušlifuotas bėgių virintinės jungties rumbelės paviršius.....44
2.2 pav. Ultragarsinės defektoskopijos schema: 1 – tiriamasis objektas (suvirintų detalių jungtis); 2, 8 – akustinių virpesių imtuvai; 3 – atsispindėjusi banga; 4 – defektas; 5 – spinduliuojantis šaltinis (siųstuvas); 6 – išeinanti ultragarsinė banga; 7 – akustinis šešėlis.....44
2.3 pav. Bėgio ultragarsinės kontrolės schema: A – gaminio plotis; B – atstumas iki defekto; 1 – ultragarsinis keitiklis (ieškiklis); 2 – bėgis; 3 – defektas; 4 – defektoskopo ekranas; 5 – zonduojantis impulsas; 6 – aido signalas nuo defekto; 7 – signalas nuo kito gaminio paviršiaus.....45
2.4 pav. Paviršiaus kiečio bandymų vietos: 1 – bėgio viršaus centrinė linija; 2 – siūlės skersinė centrinė linija; 3 – bėgio važiuojamasis paviršius; a, b ,c – kiečio matavimo taškai.....46
2.5 pav. Sulydymo zonos forma išėsdintame išilginiame vertikaliajame pjūvyje: * – duomenų įspaudai ant pado krašto; 1 – sulydymo linija; 2 – bėgių galai prieš suvirinant; 3 – bėgio galvutė; 4 – bėgio padas.....48

2.6 pav. Išilginis bėgio termiškai suminkštintos zonos kiečio matavimas: 1 – storis nuo 3 mm iki 5 mm; 2 – pirminis bėgis; 3 – nepaveiktas pirminis bėgis; 4 – sulydymo zona.....49
2.7 pav. Kiečio matavimų grafikas: 1 – 1-a linija; 2 – 2-a linija; 3 – centrinė siūlės linija.....49
2.8 pav. Bėgio jungties bandinių paimimo vietos mikroskopinei analizei schema: 1 – matomosios terminio poveikio srities plotis, matuojamas išilginėje centrinėje siūlės linijoje ant važiuojamojo paviršiaus; 2 – matomoji terminio poveikio sritis; 3 – nepaveiktas pirminis bėgis; 4 – siūlės sulydymo sritis; 5 mikroskopiškai tiriamas sulydymo srities plotas; 6 – mikroskopiškai tiriamas matomosios terminio poveikio srities plotas.....50
2.9 pav. Įspaudo formavimo schema.....51
2.10 pav. Smūginio tąsumo švituoklinio muštuvo ir bandinio schema.....52
2.11 pav. Bėgio ir aširačio bandažo geometrijos, ir jų tarpusavio sąveika.....54
2.12 pav. Aširačio bandažo ir bėgio kontakto geometrija, slydimo ir sukibimo sritys.....55
3.1 pav. Bėgių, suvirintų kontaktiniu aplydomuoju būdu, sulydymo zonos geometrija (mm). TPZ – terminio poveikio zona.....58
3.2 pav. R65 tipo bėgio termiškai suminkštintos zonos kiečio matavimo schema: 1, 2, 3,..., 40 – kiečio matavimo taškai; TPZ – terminio poveikio zona.....59
3.3 pav. Bėgio galvutės kiečio matavimų grafikas.....60
3.4 pav. Bėgio pado kiečio matavimų grafikas.....60
3.5 pav. R65 tipo bėgio mikrokietumo matavimo schema: 1, 2, 3,..., 30 – mikrokietumo matavimo taškai; TPZ – terminio poveikio zona.....61
3.6 pav. Bėgio galvutės mikrokietumo matavimų grafikas.....62
3.7 pav. Bėgio kakliuko mikrokietumo matavimų grafikas.....62
3.8 pav. Bėgio pado mikrokietumo matavimų grafikas.....63
3.9 pav. Mikrošlifų išpjovimo vietos.....64
3.10 pav. R65 tipo bėgių, suvirintų kantaktiniu aplydomuoju būdu, galvutės mikrostruktūros, padidinta 100 kartų: A – siūlės; B – terminio poveikio zonos (TPZ); C – pagrindinio metalo.....65
3.11 pav. Bėgių, suvirintų kantaktiniu aplydomuoju būdu, kakliuko mikrostruktūros, padidinta 100 kartų: A – siūlės; B – terminio poveikio zonos (TPZ); C – pagrindinio metalo.....66
3.12 pav. R65 markės bėgių, suvirintų kantaktiniu aplydomuoju būdu, pado mikrostruktūros, padidinta 100 kartų: A – siūlės; B – terminio poveikio zonos (TPZ); C – pagrindinio metalo.....67
3.13 pav. Peraušinto austenito izoterminio skilimo diagrama.....68

3.14 pav. Smūginio tąsumo bandinukai: 1 – galvutės pagrindinio metalo; 2 – pado pagrindinio metalo; 3 – galvutės siūlės metalo; 4 – pado siūlės metalo.....70
3.15 pav. R65 tipo bėgio profilio geometrija.....72
3.16 pav. Aširačio bandažo, kontaktuojančiosios srities su bėgiu, paviršiaus geometrija.....72
3.17 pav. Bendras aširačio rato bandažo ir bėgio surinkimo erdvinis modelis.....73
3.18 pav. Tiriamojo objekto suskaidymas į baigtinius elementus.....74
3.19 pav. Aširačio bandažo ir bėgio įtvirtinimo schema.....75
3.20 pav. Tiriamojo objekto, įtempių pasiskirstymo, vaizdiniai ir skaitiniai rezultatai.....76

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. UIC 60 tipo bėgio plieno cheminė sudėtis.....22
1.2 lentelė. R65 tipo lūžusių bėgių pagrindinio metalo cheminė sudėtis.....37
2.1 lentelė. Didžiausi šlako ir smėlio defektų matmenys.....43
2.2 lentelė. Važiuojamojo paviršiaus kiečio bandymų intervalai.....47
2.3 lentelė. *x* vertės priklausomai nuo bėgio markės.....48
2.4 lentelė. Bėgių cheminė analizė.....53
3.1 lentelė. Kontaktinės aplydomosios jungties struktūros ir jų mikrokietumai.....69
3.2 lentelė. Smūginio tąsumo rezultatai.....69
3.3 lentelė. Kantaktinės aplydomosios jungties cheminė sudėtis.....71

SANTRUMPOS

R65; UIC 60 – bėgio tipas;

HB – Brinelio kietumas;

HRC – Rokvelio kietumas;

HV – Vikerso kietumas;

mm – milimetras;

m – metras;

A – srovės matavimo vienetas;

V – įtampos matavimo vienetas;

W – galios matavimo vienetas

J – energijos matavimo vienetas;

Pa – slėgio matavimo vienetas;

°C – laipsniai pagal Celsijų;

N – jėgos matavimo vienetas;

TPZ – terminio poveikio zona.

ĮVADAS

Vėžių kelias jau buvo žinomas antikinėje Graikijoje, tačiau tik XIX a. pr. anglies kasyklose imta naudoti ketaus bėgius su arklių traukiamais vagonais. O geležinkelio gimimo metais laikomi 1825–ieji, kai D. Stivensonas Anglijoje pagamino pirmąjį garvežį, ir jis įveikė 25 km Stoktono–Darlingtono trasą. 1837 m. jau ir Rusijoje prasidėjo geležinkelio tiesimo darbai, o Lietuvos geležinkelio kūrimo pradžia laikomi 1858 m.

Taigi nuo pirmųjų pasaulio geležinkelio žingsnių šią datą skiria vos 33 metai. Tad mūsų kraštas beveik koja kojon ėjo su naujausiais technikos išradimais.

Geležinkelis – viena svarbiausių transporto priemonių, atvėrusi kelią pramonės plėtrai XIX a. Lietuvoje, o geografinė padėtis nulėmė, kad Lietuva tapo tranzitine šalimi. Tai patvirtina 150 metų Lietuvos geležinkelio istorija, kurioje atsispindi ir XIX–XX a. sandūros šalies istoriniai, ekonominiai, politiniai bei socialiniai įvykiai. Geležinkelis ypač paveikė tolesnę pramonės ir žemės ūkio raidą ir plėtrą, jį nutiesus Lietuvai pavyko atsikratyti carinės imperijos užkampio vardo, žmonės išmoko vertinti laiką, spartėjo gyvenimo tempas, keliavimo kokybė, be to, geležinkelis buvo svarbus įrankis carinei Rusijai vykdant savo užsienio politiką.

Geležinkelį sudaro du plieniniai bėgiai, pakloti vienas nuo kito numatytu atstumu ant lygaus atraminio paviršiaus. Tokį kelią galima labai apkrauti, ir jo pasipriešinimas mažas. Tačiau tokiam keliui reikia sankasų, jos specialiai profiliuojamos, patys bėgiai klojami ant pabėgių, kurie paskirsto apkrovą sankasai.

Bėgiai yra pagrindiniai laikantieji viršutinės bėgių kelio konstrukcijos elementai. Pagrindinė bėgių paskirtis yra atlaikyti krūvius ir nukreipti geležinkelio transportą. Viršutinės bėgių kelio konstrukcijos elementai yra tiesiogiai veikiami apkrovų, kurias sukelia riedmenų ratai, todėl bėgiai turi atlaikyti dideles dinamines apkrovas vertikalia, išilgine ir skersine kryptimis. Siekiant užtikrinti saugų traukinių eismą, bėgiai turi būti lygūs, kad traukinio judėjimo pasipriešinimas būtų minimalus, pakankamai šiurkštūs, kad tarp aširačio ir bėgio susidarytų trinties sąveikos jėga ir traukinys galėtų pradėti judėti iš vietos ir padidinant trauką, taip pat klampūs (ne trapūs), kad sugertų dinaminę apkrovą, atsparūs dilimui, aplinkos korozijai, temperatūros svyravimams, turi pasižymėti patvarumu, technologiškumu ir ilgu tarnavimo laiku.

Bėgiai negali būti eksploatuojami, jei juose atsiranda defektų, keliančių pavojų saugiam traukinių eismui. Defektai klasifikuojami pagal jų rūšį, vietą, pagal bėgio aukštį ir ilgį, pagrindinę defekto

atsiradimo priežastį, o esant defektui suvirinimo siūlėje – pagal suvirinimo būdą. Suvirinimo jungčių defektams ir jų atsiradimo priežastims nustatyti yra naudojami neardomieji ir ardomieji bandymai.

Traukinių transporto veiklai svarbią reikšmę turi kelių tinklas. Bėgiai ir su jais susiję kiti kelio elementai, tiesiant ir eksploatuojant, turi atitikti daugelį standartų ir norminių dokumentų. Geležinkelio kelio elementai – bėgiai, turi užtikrinti patikimą, nepertraukiamą ir saugų traukinių eismą. Todėl jų būklė turi būti nuolatos tikrinama.

Dėl įvairių technologinių ir ekonominių reikalavimų sandūriniai keliai (bėgiai) buvo pakeisti besandūriais. Besandūriai keliai – tai 800–1500 m ilgio bėgiai, suvirinti iš paprastųjų 25 m ilgio bėgių. Dėl jų viršutinės bėgių kelio konstrukcijos elementai naudojami ilgiau, sudaromos mažesnės išlaidos kelio priežiūrai ir traukinių traukai. Besandūriais keliais traukiniai gali važiuoti didesniu greičiu.

Bėgiams suvirinti naudojami įvairūs būdai, dažniausiai termitinis ir kontaktinis, rečiau dujinis slėginis ir elektrošlakinis. Iš šių suvirinimo būdų Lietuvoje taikomas termitinis arba kontaktinis.

Kontaktinis suvirinimo būdas pasižymi dideliu našumu, gaunama pagrindinio ir pagalbinio metalo ekonomika, taupiai naudojama elektros energija, bėgiai suvirinami mobiliuoju arba stacionariuoju būdu, visas procesas lengvai mechanizuojamas ir automatizuojamas, gaunamos aukštos kokybės ir patikimos jungtys, procesas nereikalauja aukštos kvalifikacijos suvirintojų. Tačiau šis suvirinimo metodas turi ir trūkumų, kurie mažiną paklausą pasirenkant suvirinimo būdą. Tai dideli įrangos gabaritai bei didelė technoginė siūlės sudarymo kaina.

Tiriamasis objektas

Tyrimams buvo pasirinktas R65 tipo bėgis (1 pav.). Tai bėgis, kuris suvirintas kontaktiniu aplydomuoju būdu. Jis nebuvo eksploatuojamas, o suvirintas tam, kad būtų patikrintos jungties mechaninės savybės ir / ar atsiradę defektai.



1. pav. Kontaktiniu aplydomuoju būdu suvirintas R65 tipo bėgis

Tyrimo tikslas

Šio tiriamojo darbo tikslas – ištirti R65 tipo bėgių, suvirintų kontaktiniu būdu, suvirinimo siūlės ir terminio poveikio sritis.

Uždaviniai:

1. Supažindinti su pagrindiniais mokslininkų parašytais straipsniais, bėgių kontaktinio suvirinimo tematika.
2. Pateikti tyrimų metodiką, kuri pakankamai leistų nustatyti suvirinimo jungties mechanines savybes, galimus defektus bei jų susidarymo priežastis.
3. Išanalizuoti tyrimo rezultatus, kurie įvertintų R65 tipo bėgio suvirinimo siūlės kokybę.

Darbo naujumas

Pirmą kartą kontaktinis bėgių suvirinimas buvo atliktas 1929 m. Sovietų Sąjungoje. Lietuvoje šis suvirinimo būdas taikomas nuo 2006 metų. Ilgabėgių kelių eksploatacijos metu atsiradus įvairių

defektų, bėgių mechaninis irimas dažniausiai vyksta bėgių suvirinimo jungties ir terminio poveikio srityse. Tačiau Lietuvoje išsamių mokslinių tyrimų apie kontaktiniu būdu suvirintų jungčių kokybę nėra daug. Pagrindinė priežastis – tokio suvirinimo būdo kaina, todėl pasirenkamas pigesnis metodas, pavyzdžiui, termitinis suvirinimo būdas, kuris yra plačiau ištirtas. Šalyse (Indija, Iranas ir kt.), kur daugiau taikomas kontaktinis bėgių suvirinimas, moksliškai įrodyta, kad naudojant šią technologiją gaunamos kokybiškesnės jungtys, negu virinant termitiniu būdu. Kontaktinis suvirinimas yra palankesnis tuo, kad defektai gali būti minimalūs arba jų visai nebūti.

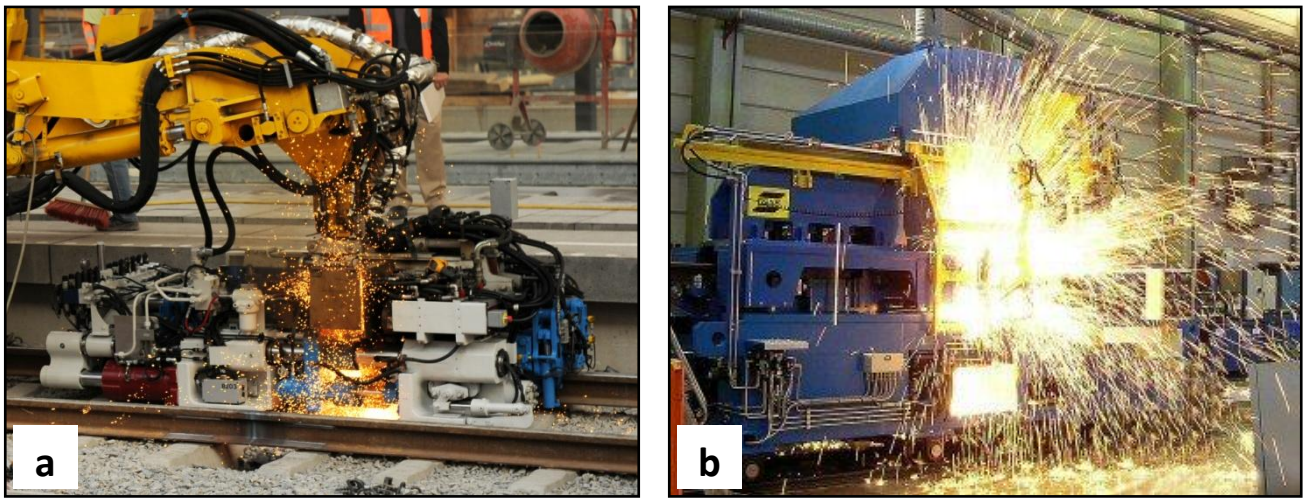
Darbo aktualumas

Tobulėjant traukos priemonėms, didėjant judėjimo greičiui, kai keliami vis didesni eismo saugumo reikalavimai, vis daugiau dėmesio skiriama traukinio aširačio su bėgiu sąveikos tyrimams. Tai leidžia nustatyti svarbius kelio ir riedmenų konstrukcinius parametrus, tinkamai parinkti medžiagas, atlikti bėgių suvirinimo procesus, įvertinti deformacijas, aširačio ir bėgio mechanines savybes ir / ar atsiradusius defektus. Įvairūs neardomieji ir ardomieji bėgių pagrindinio metalo ir suvirinimo jungties bandymai privalo užtikrinti eksploatuojamų arba dar tiesiamų kelių (bėgių) stiprumą, patikimumą ir ilgaamžiškumą, pasiekti kuo didesnį judėjimo tolygumą ir komfortiškumą.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Bėgių kontaktinis suduriamasis suvirinimas

Suduriamasis bėgių suvirinimas turi daug privalumų, palyginti su kitais suvirinimo būdais: aukštas darbo našumas, suvirinami įvairaus skerspjūvio ploto bėgiai, gaunamos aukštos kokybės ir patikimos virintinės jungtys, bėgiai suvirinami mobiliuoju arba stacionariuoju būdu (1.1 pav.).



1.1 pav. Bėgių kontaktinio suvirinimo mašinos: a – mobili, b – stacionari

Suduriamojo kontaktinio suvirinimo yra dvi rūšys: suduriamasis varžinis, kada srovė įjungiama suslėgus detales, ir suduriamasis aplydomasis, kai detalės suspaudžiamos jau įjungus įtampą.

Kontaktinio suduriamojo suvirinimo pagrindinis parametras – tai suvirinimo srovės dydis, kuris nustatomas antrinio kontūro įtampa U_2 (dažniausiai kontaktinėse mašinose reguliuojama tik antrinė įtampa). Įtampa U_2 yra susijusi su suvirinimo srove I_{suv} per antrinio kontūro varžą R_{suv} ir su bėgių iškyša nuo elektrodų. Tiksliai apskaičiuoti suvirinimo srovės dydį gana sunku, nes suvirinimo metu veikia daugybė veiksnių, turinčių įtakos suvirinimo procesui.

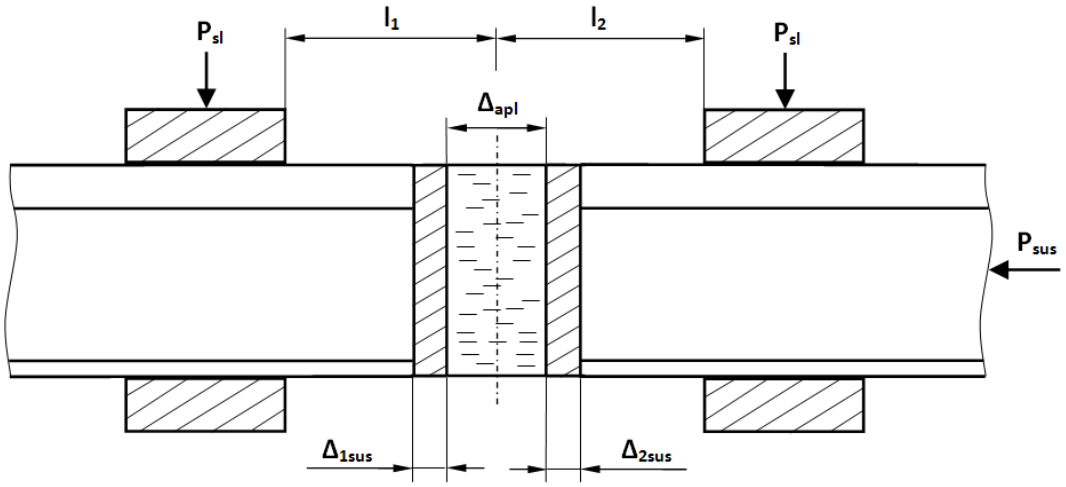
Klaidingai manoma, kad suvirinimo kokybę lemia tik bėgių įkaitinimas. Gerai kokybei gauti būtina tinkama bėgių susodinimo jėga ir susodinimo greitis, kurie priklauso nuo slėgio dinamikos. Per lėtas slėgio augimas neužtikrina geros jungties kokybės (gali išeiti nevisiškas įvirinimas), o per didelis turi įtakos galingam metalo ištėškimui ir netaisyklingai siūlės formai. Elektrinis kaitinimas turi būti trumpalaikis, esant pakankamam srovės dydžiui. Plieniniams bėgiams temperatūra kontakto plokštumoje turi būti 200–220 °C didesnė už naudojamų plieninių bėgių lydymosi temperatūrą. Tada

ant bėgio galo pasirodo plieno lydalo sluoksnelis. Šiuo momentu reikia staigiai bėgius suspausti šiek tiek mažesne jėga. Svarbiausia – išspausti skystą metalą iš kontakto plokštumos taip, kad ploniausias lydalo sluoksnis būtų išsaugotas. Tai padės išsaugoti praktiškai nepakitusią metalo kristalų struktūrą ant abiejų bėgio galų ir gauti jungtį, artimą idealiai (trumpalaikės srovės impulsas nespės pakeisti pagrindinio metalo struktūros).

1.1.1. Suduriamasis aplydomasis suvirinimas

Virinant kontaktiniu aplydomuoju būdu pirmiausia bėgiai įtvirtinami į specialius elektrodus, įjungiama įtampa, po to detalės supaudžiamos. Procesas sužadinamas ir palaikomas nuolat suartinant bėgius vienodu arba augančiu greičiu. Įkaitus detalėms iki reikiamos temperatūros, esantis prie bėgių skystas metalas ištėškiamas, o bėgiai susodinami (1.2 pav.). Lydalas su oksidais ištėškiamas iš jungties sandūros, o perkaitęs prie sandūros esantis metalas intensyviai deformuojasi.

Aplydomojo suvirinimo susodinimo jėga yra 2–5 kartus mažesnė negu varžinio, todėl jis dažniausiai naudojamas bėgiams suvirinti.



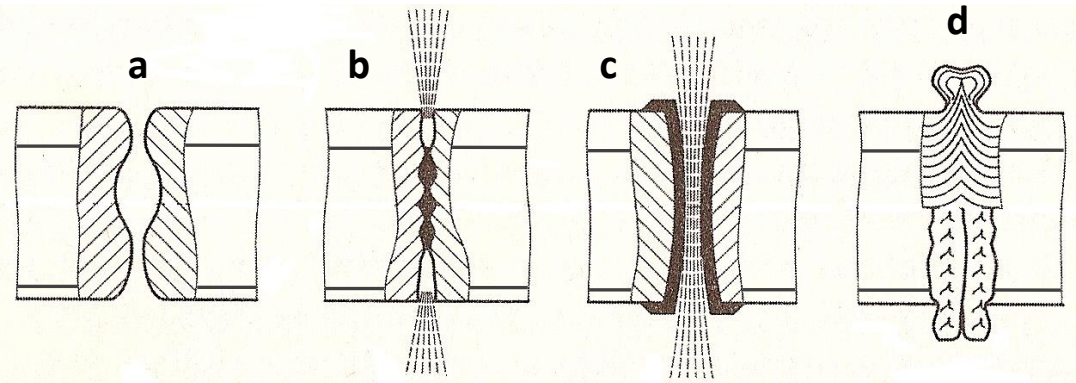
1.2 pav. Suduriamojo aplydomojo suvirinimo schema: P_{sl} – elektrodų slėgio jėga; P_{sus} – bėgių susodinimo jėga; Δ_{1sus}, Δ_{2sus} – bėgių susodinimo dydžiai; Δ_{apl} – aplydymo dydis l_1, l_2 – bėgių iškyšų ilgis

Dažnai detalės tai suliečiamos, tai atitraukiamos, kad susidarytų lankinė iškrova. Čia panaudojama dviguba energija – lankinis išlydis tarp suvirinamų bėgių paviršių ir išsiskirianti Džaulio energija. Išlydymas atsiranda dėl lankinio išlydžio. Šiluminio kaitinimo sritis susiaurėja, atsiranda tik lokalus

paviršiaus kaitinimas. Todėl sunaudojama mažiau energijos metalui išlydyti, o suvirinimo procesas baigiasi gana intensyviu išlydyto metalo ir oksidų ištėškimu (1.3 pav.).

Aplydomojo suvirinimo procesas vyksta keliomis stadijomis, kurios pateiktos 1.3 paveiksle.

Kontaktinis aplydomasis suvirinimas turi dvi atmainas, besiskiriančias viena nuo kitos aplydymo proceso eiga: su ištisiniu arba nutrūkstamu aplydymu. Esant ištisiniam aplydymui, bėgiai įtvirtinami tarp mašinos elektrodų su mažu tarpeliu tarp galų paviršių (1.3 pav., a). Įjungus srovę, bėgiai suartinami. Iš pradžių bėgių galai liečiami labai nedideliais paviršiais, per kuriuos prateka didelio tankio srovė. Tarp besiliečiančių bėgių galų paviršių pradeda lydytis metalas ir susidaro skysto metalo jungtys. Tuo pat metu išauga suvirinimo srovė ir temperatūra pakyla iki 800 °C. Veikiamos aukštos temperatūros jungtys pradeda garuoti (1.3 pav., b). Veikiant elektriniam laukui iš sandūros išmetama kibirkščių pavidalu dalis metalo ir dujų garų (1.3 pav., c), o kartu su metalu – ir įvairūs nešvarumai (daugiausia oksidų plėvelės, kurios buvo bėgių galų paviršiuje). Toliau artinant bėgius, paviršinių kontaktų (aplydomų iškylų) daugėja, kol gaunami vienodai tolygiai aplydyti visi suvirinamų bėgių galų paviršiai. Tuomet suvirinimo srovė išjungiama ir bėgiai susodinami, o skystas metalas ir dalis deformuoto metalo išspaudžiami į išorę ir sudaro atplaišas (1.3 pav., d).



1.3 pav. Suduriamojo aplydomojo suvirinimo proceso schema: a – pradinis bėgių kontaktas; b – skystų jungčių susidarymas ir dalinis metalo garavimas; c – skysto metalo, dujų garų ir oksidų išmetimas; d – išlajos formavimas po susodinimo ir metalo kristalizacija

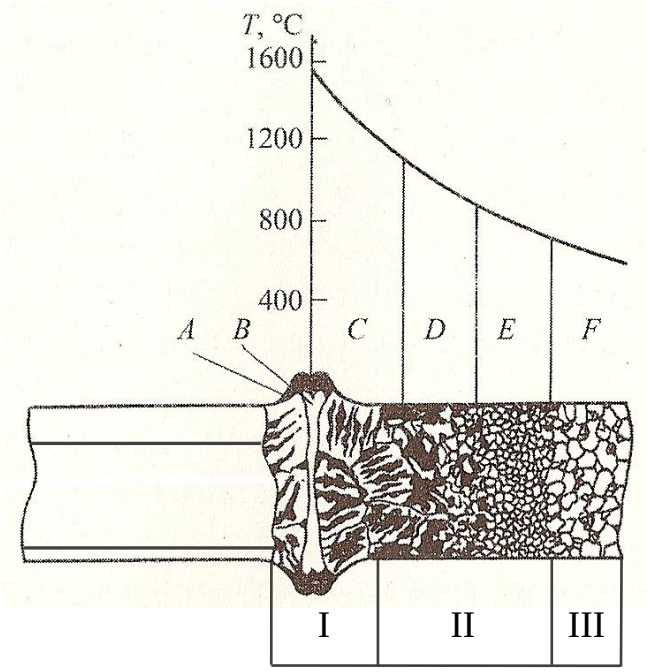
Pagrindiniai aplydomojo suvirinimo parametrai yra tokie: pirminis detalių iškyšos nuo elektrodų ilgis; visiško susodinimo jėga ir ilgis; aplydymo ir susodinimo greitis; lydymosi trukmė t_{lyd}; antrinio kontūro tuščiosios veiklos įtampa U_2. Iškyšos ilgis parenkamas įvertinant įkaitinimo srities plotą neprarandant bėgiams stabilumo. Kuo didesnė iškyša, tuo didesnis turi būti srovės tankis ir suvirinimo

grandinės įtampa. Esant mažoms iškyšoms, bėgiai įkaista nevienodai, išauga šilumos nuostoliai srovę tiekiančiuose gnybtuose ir tenka padidinti susodinimo slėgio jėgą.

1.1.2. Suvirintosios siūlės metalo kristalizacija

Kristalizacijos procesas prasideda nuo išsidėsčiusių išlydymo zonoje iš dalies aplydytų pagrindinio metalo grūdelių. Prie šių grūdelių kristalo gardelės prisijungia besikristalizuojančiosios fazės atomai. Pasibaigus kristalizacijai, išsilydymo zonoje susiformuoja grūdeliai, iš dalies susidedantys iš bėgių ir siūlės metalo, užtikrinantys suvirintąją jungtį. Slenkant suvirinimo vonelei išilgai bėgių briaunų, jų priešakinėje dalyje vyksta metalų lydymasis, o galinėje – kristalizacija. Suvirintosios jungties kristalizacija skiriasi nuo bėgių kristalizacijos dideliu įkaitimo ir aušimo greičiu, todėl siūlė nevienalytė pagal matmenis ir cheminę grūdelių sudėtį.

Suvirintosios jungties schemą galima suskirstyti į tris skirtingų mikrostruktūrų sritis (1.4 pav.): I sritis – suvirintosios siūlės sritis yra išlydyto metalo, II sritis – terminio poveikio ir III sritis – pagrindinio metalo. 1.4 paveiksle pavaizduota sąlyginė mažėjančios temperatūros pasiskirstymo kreivė išilgai bėgio profiliui srovės išjungimo metu.



1.4 pav. Bėgių plieno suvirintosios jungties struktūra (padidinta 100 kartų): A–F – sulydymo sričių struktūros; I – suvirintosios siūlės išlydyto metalo sritis; II – terminio poveikio sritis; III – pagrindinio metalo sritis; *T* – temperatūra

Slėgis išspaudžia dalį skysto metalo ir oksidų iš kontakto tarpelio ir paskirsto juos po visą sudūrimo sritį (A). Palei kontakto plokštumą beveik visada gaunamas būdingas baltas neėsdintas tarpsluoksnis (B), kuris siauriausias yra bėgio viduryje ir platėjantis link jo išorės. Tai paaiškinama nevienodu slėgio pasiskirstymu bėgių kontakto skerspjūvio plote. B sričiai būdingi stambūs grūdeliai, nes čia yra didžiausia temperatūra (daugiau kaip 1100 °C). Tai perkaitintas metalas, pasižymintis sumažėjusiu plastiškumu, kuris būdingas ir C sričiai. Srityje D temperatūra tokia, kad lėtai aušant palaipsniui susidaro vis mažesnių grūdelių struktūra ir srityje E jie tampa mažiausi. Srityje F jau nebūna jokių struktūros pokyčių.

1.1.3. Kontaktinio suvirinimo deformacijos

Kontaktiniame suvirinime deformacijos gali stipriai paveikti jungčių kokybę. Jeigu bėgiai suvirinant deformuojasi daugiau nei leistinos ribos – tai jau brokas. Todėl reikia imtis priemonių, kad visiškai išvengtume deformacijų arba jas sumažintume iki minimumo.

Tolstant nuo siūlės ašies, bėgių metalo temperatūra mažėja. Periferiniai metalo tarpsniai gali iš viso nekaisti. Kaitinant sujungiamuose bėgiuose kyla įtempiai ir dėl jų atsiranda deformacijų. Nustatyta, kad pagrindinės įtempių deformacijų priežastys yra šios:

- šiluminiai įtempiai, sukelti netolygaus metalo kaitinimo, kylant dėl lokalaus metalo kaitinimo suvirinimo srityje nuo aplinkos temperatūros iki lydymosi temperatūros su tolesniu staigiu aušimu;
- apvirinto metalo linijinis suslūgimas Auštančio metalo tūris mažėja, bet kadangi jis kietai sulydytas su pagrindiniu metalu, tai pereinamoje srityje atsiranda vidinių įtempių ir deformacijų;
- struktūriniai įtempiai, atsirandantys metale jam greitai aušant, kai perlitinė-feritinė ar austenitinė struktūra srityje prie siūlės pereina į martensitinę, kurios tūris didesnis už pradinį.

Laikinųjų suvirinimo įtempių atsiranda tik kai kuriais suvirinimo momentais kintant temperatūrai. Jeigu kaistant metalui šie įtempiai neviršija suvirinamo metalo tamprumo ribos, tai jie išnyksta bėgių metalui ataušus. Įtempiai, egzistuojantys po suvirinimo metalui ataušus, vadinami liekamaisiais suvirinimo įtempiais. Dažnai jie būna tokie dideli, kad sukelia bėgių metalo deformaciją, sumažina jo patvarumą ir dėl to gali atsirasti įtrūkių.

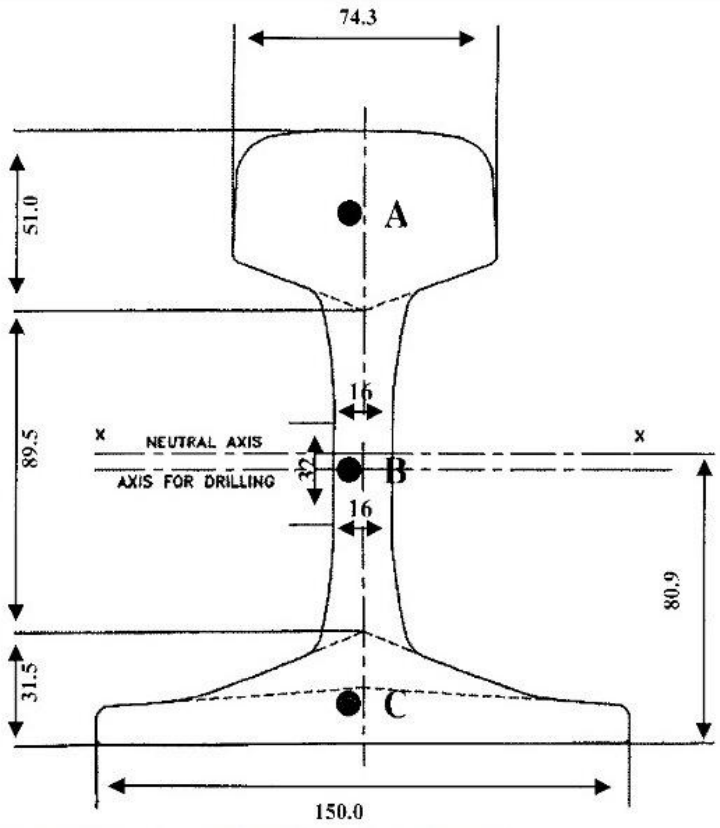
1.2. Geležinkelio bėgių, suvirintų kontaktiniu būdu, jungties mikrostruktūros ir liekamųjų įtempių pokyčiai

1.2.1. Eksperimentinė metodika

Bėgių kontaktinis suvirinimas buvo atliktas Irano geležinkelių kompanijos (angl. *Iranian Railway Company*) naudojant austrišką kontaktinio suvirinimo aparatą, kurio modelis K-355 APT. Šio aparato galia yra 150 kW, antrinė srovė ir įtampa – atitinkamai 20 kA ir 7,5 V. Suvirinimas buvo atliktas vietoje, tarp dviejų naujų UIC 60 tipo bėgių galų, kiekvieno ilgis 6 m. Bėgiai yra 172 mm aukščio (1.5 pav.), jų cheminė sudėtis nurodyti 1.1 lenetelėje.

1.1 lentelė. UIC 60 tipo bėgio plieno cheminė sudėtis

UIC 60 markės bėgis	**% elemento masėje**						
	C	**Mn**	**Si**	**S**	**P**	**Cr**	**Ni**
	0,59	1,09	0,27	0,01	0,008	0,02	0,01

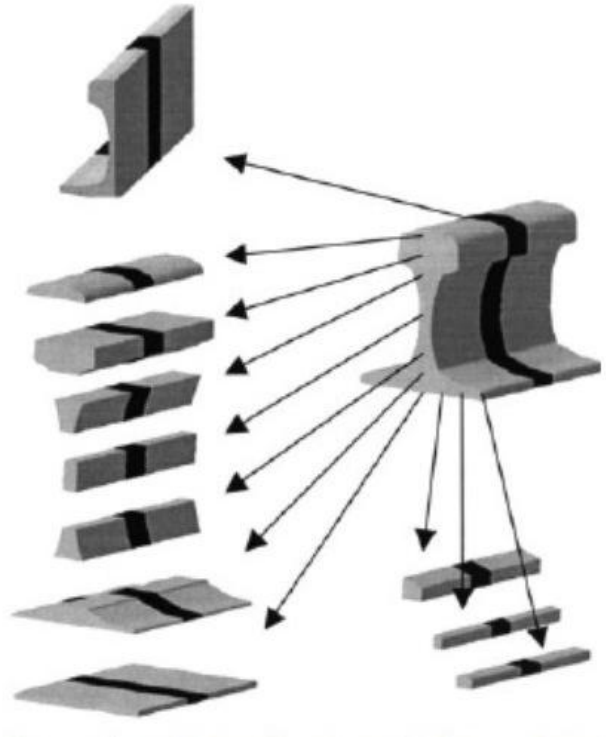


1.5 pav. UIC 60 tipo bėgio profilis (mm)

Suvirinimo trukmė buvo apie 3 min., o sujungimui sunaudota po 35 mm metalo iš abiejų bėgių.

Suvirinus, išpjauta apytiksliai 200 mm ilgio bėgio dalis su suvirinimo siūle naudojant bėgių pjūklą. Bėgių pjovimą dujų liepsna pakeitė pjūklas su ambrazyviniais diskais, aušinamais vandeniu, kad būtų išvengtas metalo įkaitinimas (ne daugiau kaip 100 °C). Siekiant ištirti bėgio jungties makrostruktūrą, mikrostruktūrą ir įvairių dalių sulydymo zonos plotus, naudojant juostinį pjūklą, daromas vienas išilginis bėgio pjūvis ir po kelis bėgio galvutėje, kakliuke ir pade (1.6 pav.).

Po visų bėgių bandinių pjūvių paviršių frezavimo, magnetinio šlifavimo ir poliravimo buvo atlikti metalografiniai bandymai. Be to, dėl tikslaus mikrostruktūrinių fazių nustatymo bėgių galvutės, kakliuko ir pado suvirinimo siūlės zonoje buvo atliekami Rentgeno spindulių difrakcijos bandymai.



1.6 pav. Bėgio pjaustymas metalografiniams bandymams

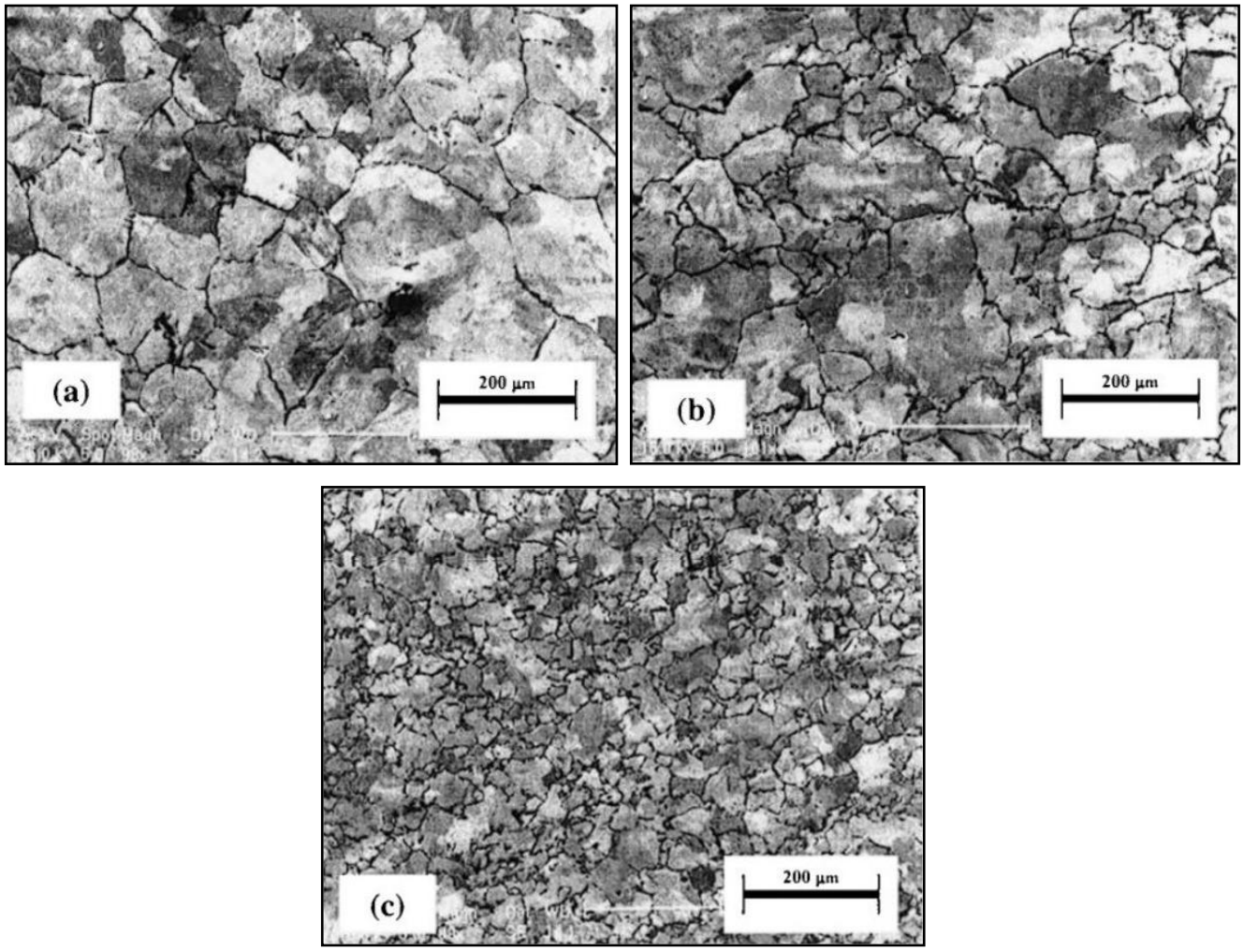
Iškart po suvirinimo buvo matuojamos bėgio siūlių temperatūros galvutėje, kakliuke ir pade (1.5 pav. Taškai: A, B ir C) išgręžiant juose skyles 5–10 mm atstumu nuo siūlės centrinės ašinės linijos naudojant chromo-aliuminio termoelementus. Neizoliuoti chromo-aliuminio termoelementų elektrodų kontaktai buvo pridėti skylių apačioje ir tada įvirinti jų sandūroje. Aplink termoelementų elektrodų kontaktus įterptos izoliacinės kvarco granulės.

1.2.2. Rezultatai ir jų aptarimas

Bėgių jungties mikrostruktūros tyrime buvo identifikuotos trys sritys.

1 sritis: grūdelių augimo sritis

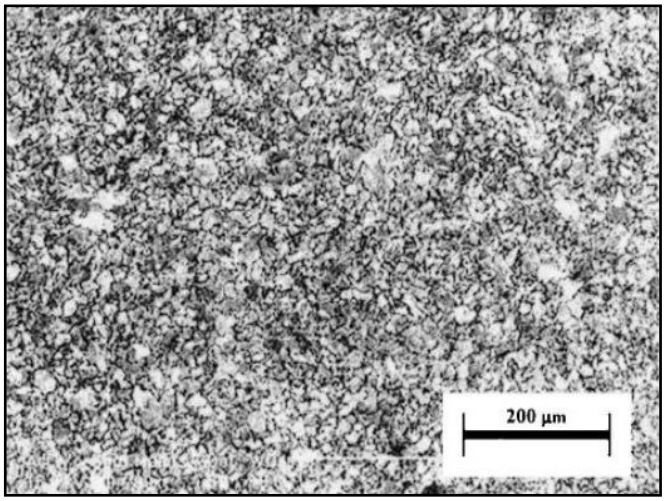
Pirmoji sritis yra šalia suvirinimo siūlės zonos vidurio. Čia grūdelių dydis mažėja, didėjant atstumui nuo jungties vidurio. Grūdelių dydis šios srities viduryje (suvirinimo siūlės zonos vidurys) yra šiek tiek mažesnis nei 254,0 µm ir mažėja, didėjant atstumui nuo jungties vidurio ir pasiekiant apie 63,5 µm šioje srityje. Šios srities plotis bėgio galvutės, kakliuko ir pado viduryje yra apie 20 mm. Šioje srityje, skirtingose mikrostruktūros vietose, yra perlito ir ferito (1.7 pav.).



1.7 pav. Bėgių jungties, grūdelių augimo srities, mikrostruktūros (padidinta 100 kartų): a – šalia suvirinimo siūlės zonos vidurio; b – 6 mm toliau nuo suvirinimo siūlės zonos vidurio; c – 9 mm toliau nuo suvirinimo siūlės zonos vidurio.

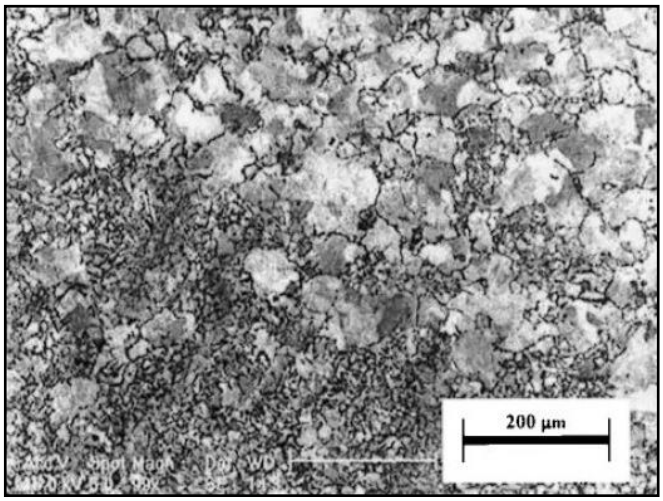
2 sritis: rekristalizacinė sritis

Antroji sritis yra toliau nuo jungties vidurio ir už pirmosios srities. Grūdelių dydis šioje srityje yra apie 15,9 µm, o šios srities plotis bėgio galvutės, kakliuko ir pado viduryje yra apie 13 mm. Antrosios srities mikrostruktūroje yra perlito ir ferito (1.8 pav.).



1.8 pav. Rekristalizacinės srities mikrostruktūra suvirinimo siūlės zonoje. Padidinta 100 kartų

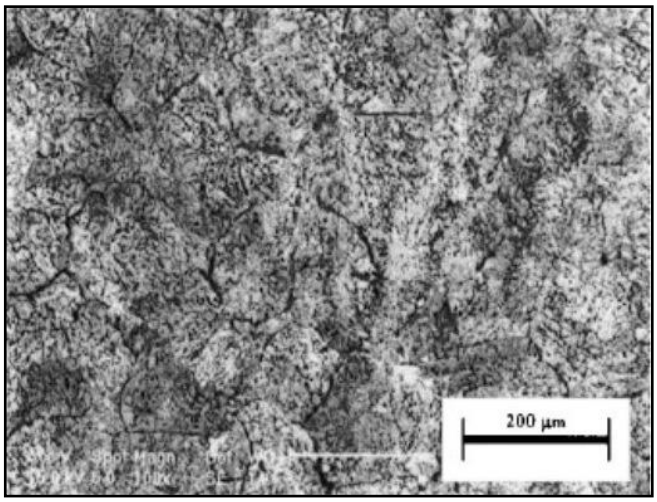
Pirmosios ir antrosios srities sulydyme yra smulkių ir rupių rekristalizacinių grūdelių nedideli ploteliai. Šių plotelių mikrostruktūrą sudaro perlitas ir feritas (1.9 pav.).



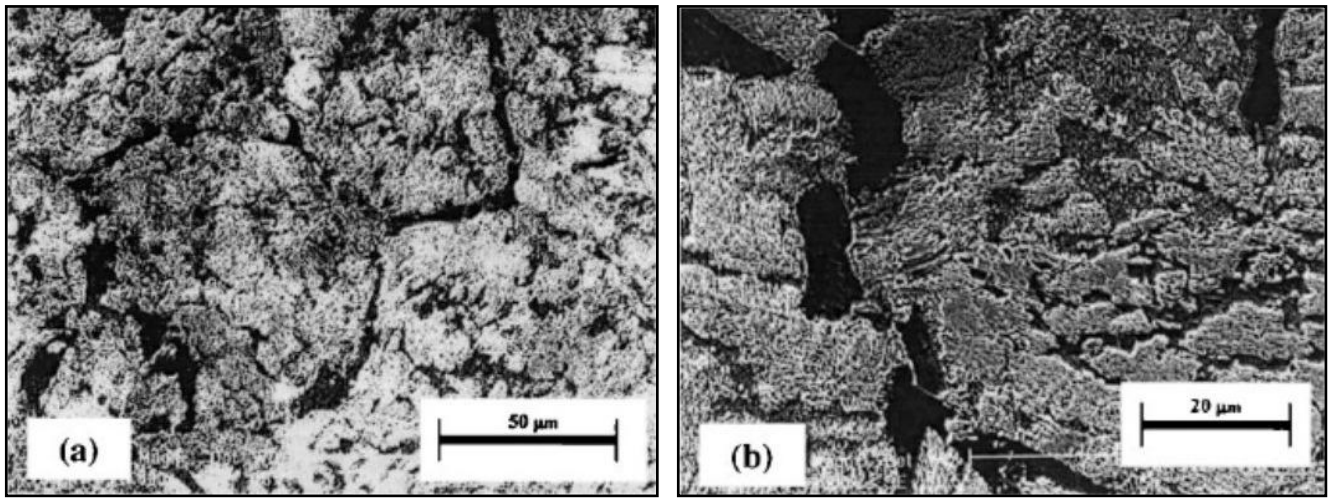
1.9 pav. Pirmosios ir antrosios srities sulydymo mikrostruktūra suvirinimo siūlės zonoje. Padidinta 100 kartų

3 sritis: dalinai transformuota sritis

Trečioji sritis yra toliau nuo jungties vidurio ir už antrosios srities. Šioje srityje yra daug mažų ferito grūdelių pirminiuose perlito grūdeliuose. Šios srities mikrostruktūra pavaizduota 1.10 paveiksle. Reikėtų atsižvelgti į tai, kad grūdelių ribos ir perlito grūdelių dydis šioje srityje yra toks pat, kaip ir bėgio pagrindiniame metale. Akivaizdus skirtumas tarp trečiosios srities ir pagrindinio metalo yra tas, kad šios srities ferito grūdeliai yra pirminiuose perlito grūdeliuose. Trečiosios srities, padidinto vaizdo, mikrostruktūros parodytos 1.11 paveiksle. Šios nuotraukos aiškiai rodo bendrą perlito ir smulkių ferito grūdelių mikrostruktūrą.

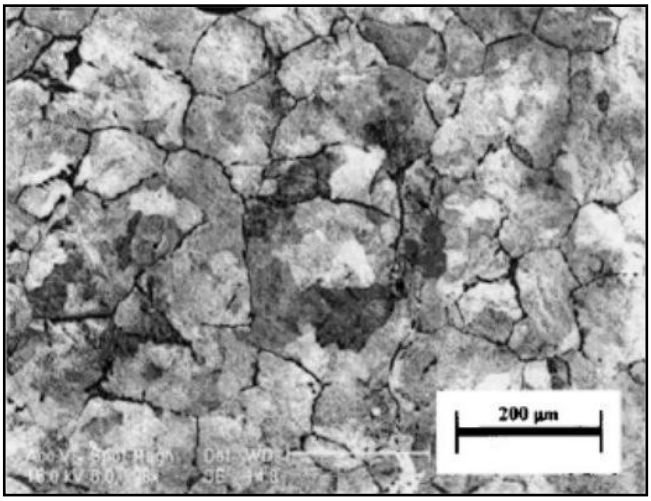


1.10 pav. Dalinai transformuotos srities mikrostruktūra suvirinimo siūlės zonoje. Padidinta 100 kartų



1.11 pav. Dalinai transformuotos srities, padidinto vaizdo, mikrostruktūros suvirinimo siūlės zonoje. Padidinta 100 kartų

Už trečiosios srities ir toliau nuo jungties vidurio yra pagrindinio metalo mikrostruktūra, kuriai neturi jokios įtakos kontaktinis suvirinimas, o grūdelių dydis yra 127,0 µm. Šios srities mikrostruktūra parodyta 1.12 paveiksle.

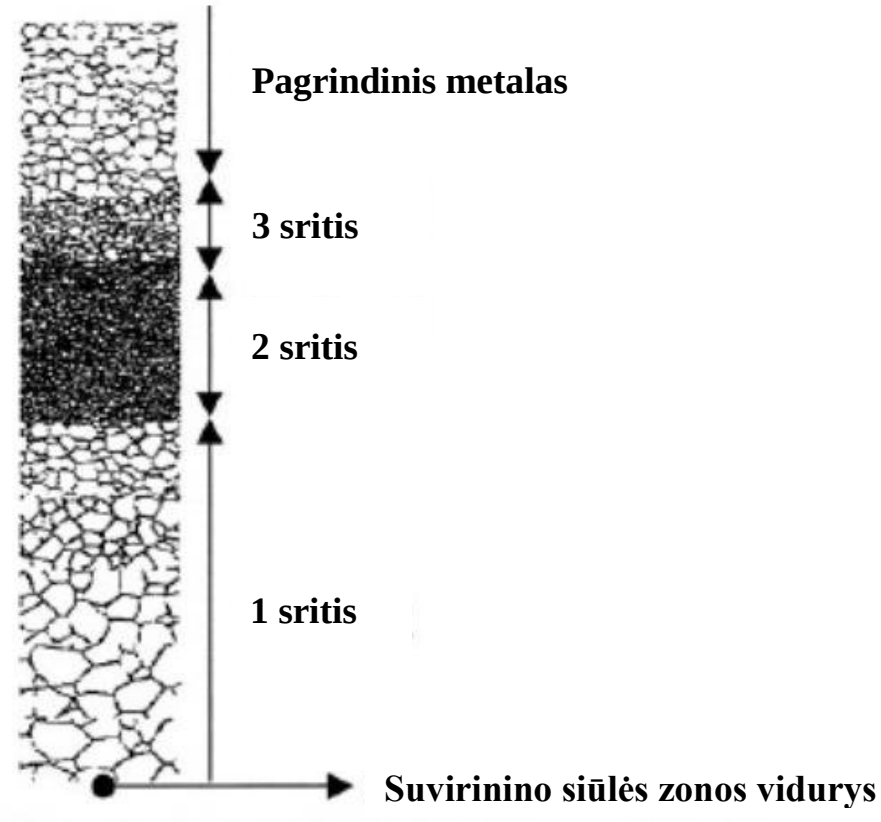


1.12 pav. UIC 60 tipo bėgio pagrindinio metalo mikrostruktūra. Padidinta 100 kartų

Trijų sričių ir pagrindinio metalo mikrostruktūros yra perlitinės ir feritinės. Ferito fazė užima apie 5–10 % mikrostruktūros ir apytiksliai padengia visą perlito grūdelių ribą, išskyrus 3 srityje, kuri turi ferito grūdelių ir papildomai feritą ant grūdelių ribų. Kadangi kontaktinio suvirinimo būdas neturi didelės įtakos suvirinamų bėgių metalų mikrostruktūrai, pavyzdžiui, nėra dendritinių grūdelių suvirinimo siūlės zonoje, visi grūdeliai yra pasiskirstę į visas puses vienodai. Schematinė bėgių suvirinimo siūlės zonos mikrostruktūros diagrama, kurią suformuoja kontaktinis suvirinimas, pavaizduota 1.13 paveiksle.

Baigiamajame bėgių suvirinimo ciklo etape (bėgių galų susodinimas) išlydytas metalas, kartu su oksidais ir priemaišomis, yra išstumiamas iš sujungiamų bėgių paviršiaus. Dėl susidariusių plastiškų zonų bėgių galuose ir jų suspaudimo (susodinimo) tam tikra jėga, atsiranda plastiška deformacija. Iškart po suvirinimo proceso prasideda rekristalizacija. Mikrostruktūros, kurios yra šalia jungties vidurio (1 sritis), deformuojasi labiau ir turi aukštesnę temperatūrą, palyginti su kitomis mikrostruktūros vietomis suvirinimo siūlės zonoje. Todėl šios mikrostruktūros turi stambių perkristalintų grūdelių. Šioje srityje didėjant atstumui nuo jungties vidurio temperatūra mažėja, todėl mažėja ir grūdelių dydis. Tuomet 2 srityje, kurios temperatūra iškart po suvirinimo dar yra didesnė nei A_3 temperatūra (Fe_3C fazės diagramoje) ir plastiška deformacija yra būtina rekristalizacijos atsiradimui bet kurioje vietoje, todėl rekristalizuotų grūdelių augimas yra mažas ir grūdeliai išlieka smulkūs. Tada

3 srityje temperatūra α + γ zonoje ir Fe_3C fazės diagramoje tampa pagrindine priežastimi susidarant ferito židiniams perlito grūdelių viduje.



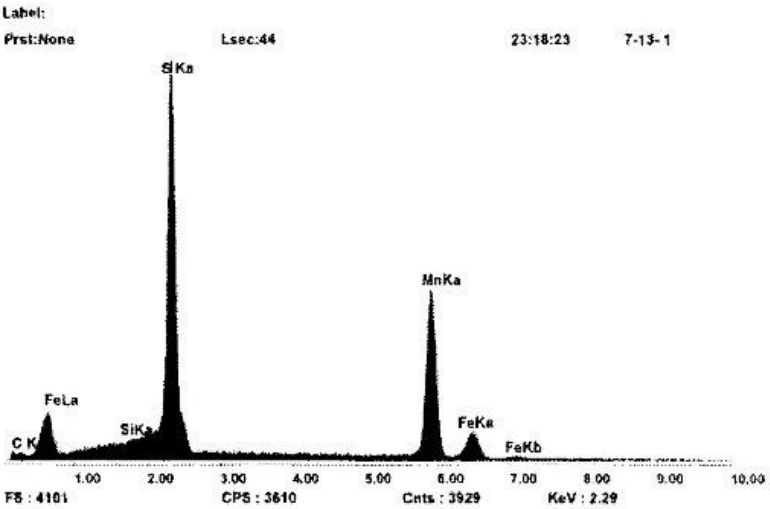
1.13 pav. Bėgių, suvirintų kontaktiniu būdu, schematinė suvirinino siūlės zonos mikrostruktūros diagrama

Rentgeno spindulių difrakcijos tyrimai parodė, kad bėgių galvutės, kakliuko ir pado suvirinimo siūlės srityse, skirtingose mikrostruktūrų vietose, yra panašios. Atitinkamai, skirtingų bėgių vietų aušinimo lygis (įskaitant bėgių galvutę, kakliuką ir padą) nebuvo pakankamai aukštas tam, kad susiformuotų beinitas ir martensitas, todėl fazės transformacija, atrodo, negali būti atsakinga už atsparumą liekamiesiems įtempiams suvirinimo siūlės zonoje ir pagrindiniame metale, esančiame šalia suvirinimo siūlės zonos bėgių kakliuke.

Buvo pastebėtas tolygus nuosėdų pasiskirstymas pagrindinio ir suvirinimo siūlės metalų mikrostruktūrose. Išsamiame šių nuosėdų tyrime, naudojant nuskaitantį elektroninį mikroskopą, buvo nustatytos MnS nuosėdos (1.14 pav.).

1.15 paveiksle, nuskaitančiuoju elektroniniu mikroskopu gautoje nuotraukoje aiškiai matyti viena iš šių nuosėdų. Skirtumas tarp MnS nuosėdų ir perlito-ferito matricos šilumos plėtimosi koeficientų

rezultatų yra mikroskopiniai įtrūkiai jų sandūroje. Taip pat buvo pastebėtas poringumas suvirinimo siūlės metale, kuris parodytas 1.16 paveiksle.



Standardless, Elements
PRI Default Set : 1

Element	K Ratio	Weight %	Atomic %
C K	0.0013	0.126	0.457
SiK	0.0080	0.801	1.238
S K	0.3565	35.653	48.257
MnK	0.5949	59.493	46.997
FeK	0.0393	3.927	3.051
Total		100.000	100.000

1.14 pav. MnS nuosėdų spektrinė analizė

Dėl MnS nuosėdų, mikroskopinių įtrūkių ir poringumo suvirinimo siūlės metalo sandūroje, sumažėja atsparumas liekamiesiems įtempiams, bėgių kakliuke, suvirinimo siūlės zonoje. Todėl svarbu atsižvelgti į pažangius plieno gamybos procesus, naudoti kokybiškesnes žaliavas su mažesniu kiekiu priemaišų – ypač sieros.

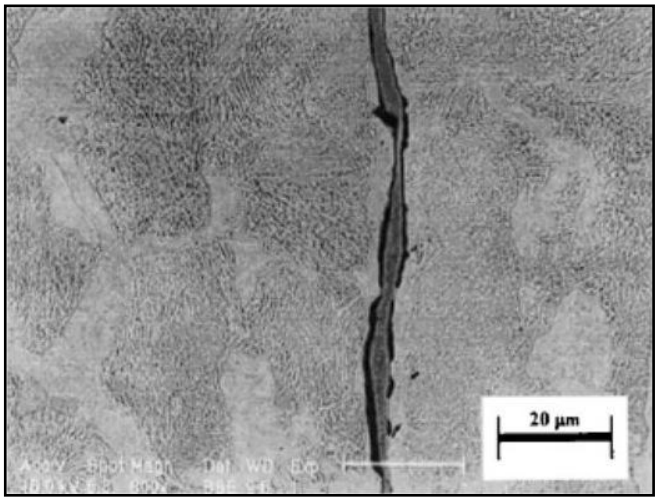
1.17 paveiksle parodyta suvirinimo siūlės zonos išilginio pjūvio makroskopinė nuotrauka, o 1.18–1.20 paveiksluose – bėgių galvutės, kakliuko ir pado suvirinimo siūlės zonos horizontaliųjų pjūvių makroskopinės nuotraukos.

Suvirinimo siūlės zonos, pirmosios srities, storis tam tikrose suvirinimo siūlės zonos vietose (bėgių galvutėte, kakliuke, pade) yra nevienodas. Šias vietas galima suskirstyti:

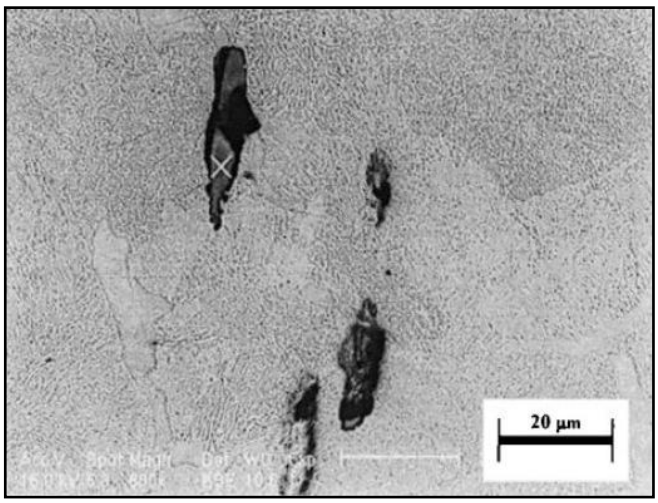
1. Vietos, kurios yra šalia šoninių bėgių pjūvių (makrošlifų) paviršių. Šios siūlės vietos yra pavaizduotos juodomis rodyklėmis (1.17–1.20 pav.).

2. Vieta, kuri ribojasi su bėgių galvutės ir kakliuko jungties vieta. Ši vieta pavaizduota pilka rodykle (1.17 pav.).

3. Vietos, kurios ribojasi su bėgių kakliuko ir pado jungties vieta. Šios siūlės vietos pavaizduotos baltomis rodyklėmis (1.17 pav.; 1.20 pav.).



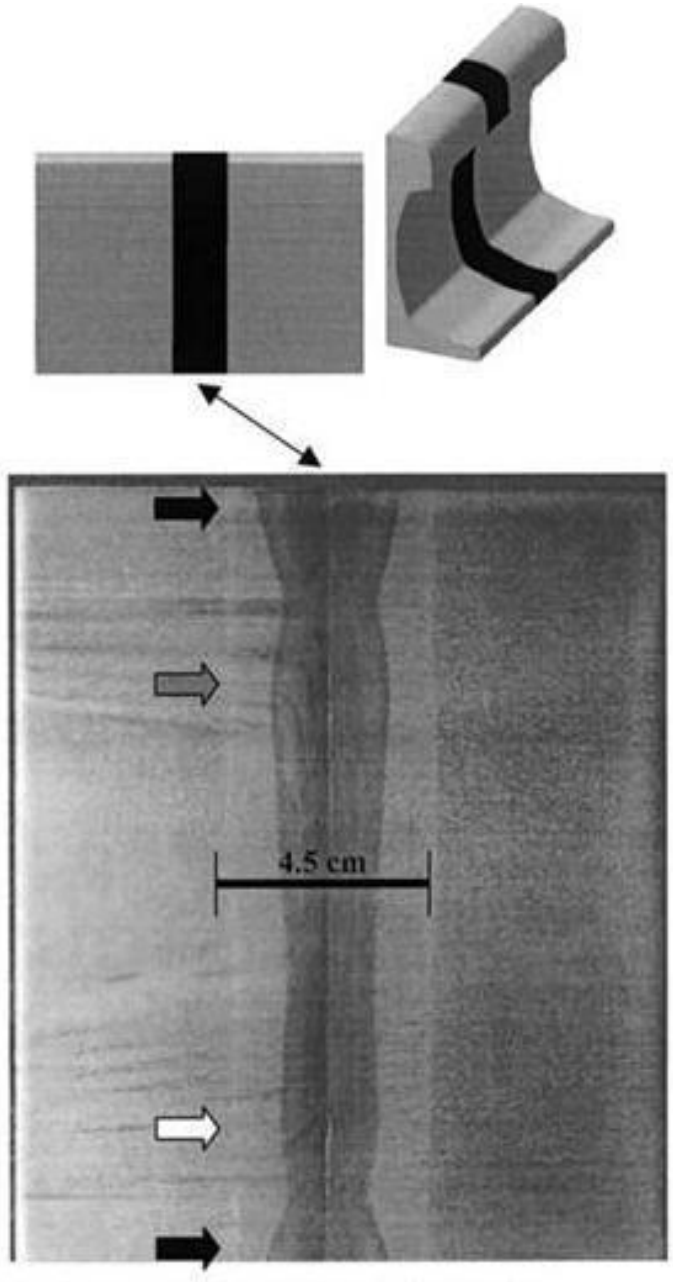
1.15 pav. MnS nuosėdos bėgių suvirinino siūlės zonoje. Padidinta 600 kartų



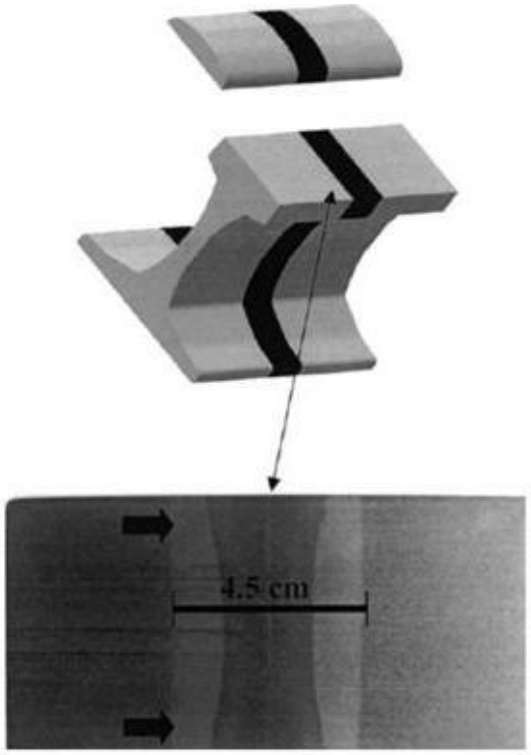
1.16 pav. Poringumas bėgių suvirinino siūlės zonoje. Padidinta 600 kartų

Kontaktinio suvirinimo metu, palyginti su kitomis suvirintomis vietomis, didesnė šiluma susikaupia anksčiau išvardintose vietose, o taip pat didesnis pastovaus srovės tankio perdavimas iš šių vietų. Kitaip tariant, bėgių paviršiniai sluoksniai perduoda elektros srovę lengviau, palyginti su bėgių vidine dalimi, todėl 1 srities suvirinimo siūlės metalo storis bėgių paviršiniuose sluoksniuose yra didelis. Taip pat, atsižvelgiant į UIC 60 profilį (1.5 pav.), elektros srovės tankis kaitina bėgių plotą, kuris ribojasi su

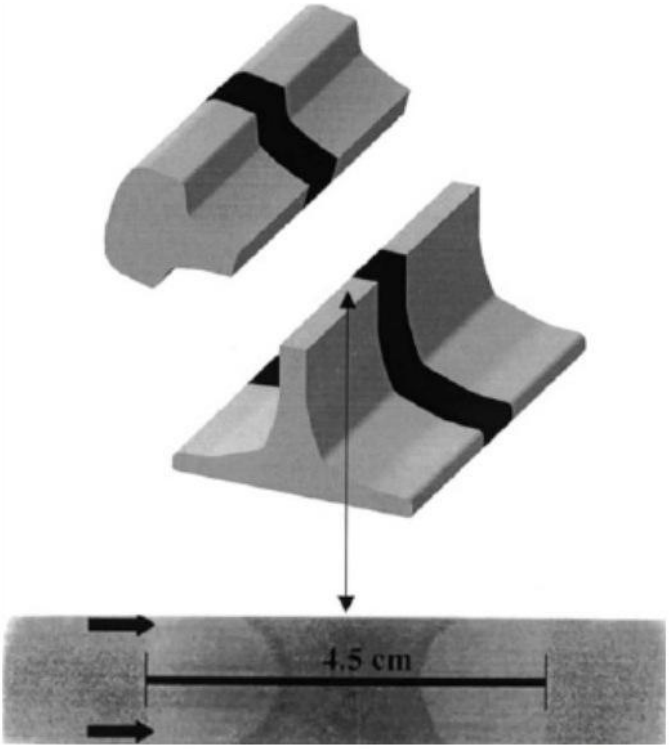
bėgių galvutės ir kakliuko jungimosi vieta, daugiausiai aprūpina srovės tankių suma. Ši perduoda šilumą iš bėgių galvutės ir kakliuko paviršinio sluoksnio vietų, kurios ribojasis su bėgių galvutės ir kakliuko jungimosi vieta. Pirmosios srities suvirinimo siūlės zonos storis šioje vietoje yra didesnis nei bėgių galvutėje ir kakliuke. Tomis pačiomis sąlygomis, elektros srovės tankio suma, kuri perduodama iš vietos, kuri ribojasi su pado ir kakliuko jungimosi vieta, yra didesnė ir todėl 1 srities suvirinimo siūlės zonos storis šioje vietoje yra didesnis nei bėgių pado ir kakliuko vidinėse dalyse.



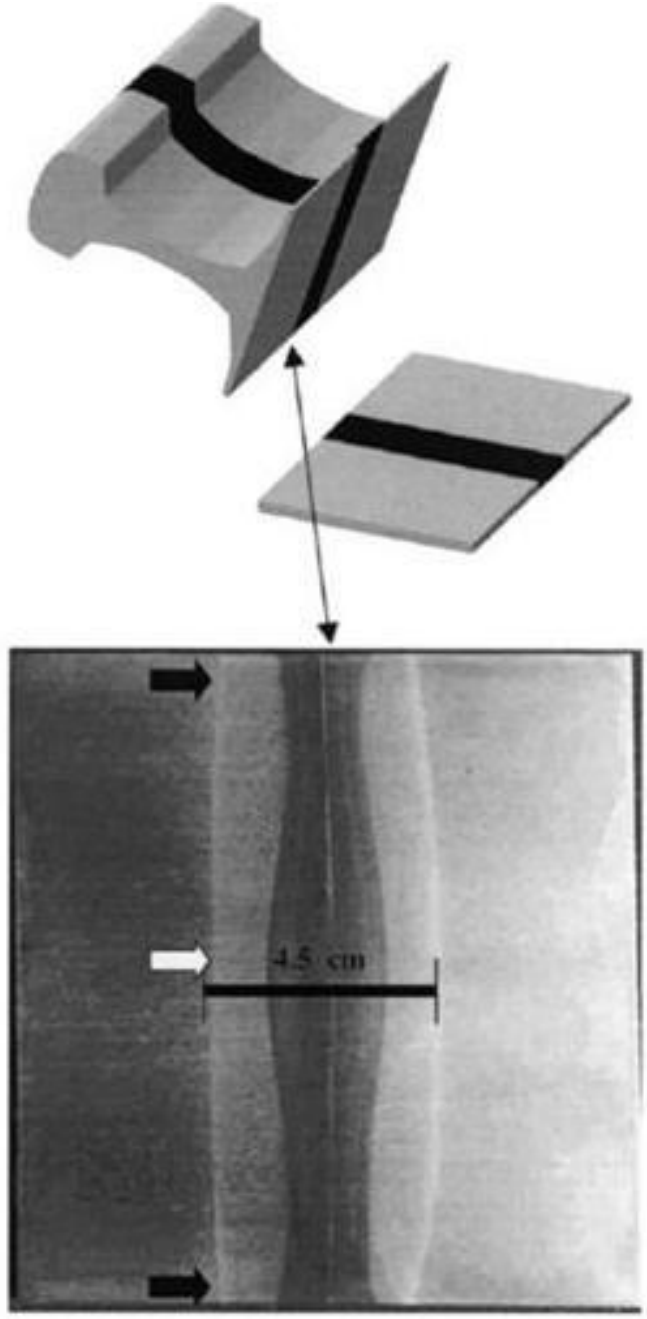
1.17 pav. Bėgių suvirinimo jungties, išilginio pjūvio, sulydymo makrošlifas



1.18 pav. Bėgių galvutės suvirinimo jungties, išilginio pjūvio, sulydymo makrošlifas



1.19 pav. Bėgių kakliuko suvirinimo jungties, išilginio pjūvio, sulydymo makrošlifas



1.20 pav. Bėgių pado suvirinimo jungties, išilginio pjūvio, sulydymo makrošlifas

Išilginiame suvirintų bėgių pjūvyje (1.17 pav.) bendras suvirinimo siūlės zonos storis (įskaitant 1, 2 ir 3 sritis) bėgių galvutėje, kakliuke ir pade yra vienodas, t. y. 4–5 cm. Todėl suvirinimo metu, lygūs bėgių galvutės, kakliuko ir pado ilgiai, yra veikiami panašios suvirinimo šilumos. Kitaip tariant, vienodi galvutės, kakliuko ir pado ilgiai turi temperatūras didesnes nei A_3 temperatūra (Fe_3C fazės diagramoje), t. y. įsisavinti šilumos vidurkiai tūrio vienete, suvirinimo siūlės zonos storyje, bėgių galvutėje, kakliuke ir pade yra lygūs. Kita vertus, tai yra todėl, kad šoninio paviršiaus ploto santykis su

kakliuko tūriu yra didesnis negu galvutėje ir pade. Virinimo metu, šiluma tiesiog iššvaistoma spinduliavimo ir konvekcijos būdu iš bėgių kakliuko, kuri yra didesnė nei pade ir galvutėje. To pasekoje, suvirinimo proceso metu, sugeneruotos šilumos kiekis kakliuko plote yra didesnis nei pade ir galvutėje, t. y. vidutinis srovės tankis, kuris pereina iš kakliuko vienetinio ploto yra didesnis nei pade ir galvutėje.

Nustatyta, kad grūdelių dydžiai bėgių galvutėje, kakliuke ir pade, ties suvirinimo zonos viduriu, yra lygūs 127,0 μm. Kadangi, plastiškos deformacijos dydis, atsiradęs bėgių galvutėje, kakliuke ir pade, galutiniame virinimo ciklo etape, yra vienodas, todėl tik suvirinimo zonos centrinės linijos temperatūra turi poveikį grūdelių dydžiui. Kai suvirinimo zonos centrinės linijos temperatūra iškart po suvirinimo yra didesnė, grūdelių augimo kiekis yra didesnis, ir kai aušinimo greitis suvirinimo zonos centrinėje linijoje yra mažesnis, grūdelių augimo kiekis yra didesnis. Kadangi šoninio paviršiaus ploto santykis su kakliuko apimtimi yra didesnis negu galvutėje ir pade, todėl po suvirinimo proceso, suvirinimo zonos centrinės linijos aušinimo greitis kakliuke yra didesnis negu galvutėje ir pade.

Buvo pastebėtas šiek tiek didesnis suvirinimo zonos centrinės linijos kietumas kakliuke, palyginti su galvute ir padu, atlikus mikrokietumo bandymus (1.21 pav.).

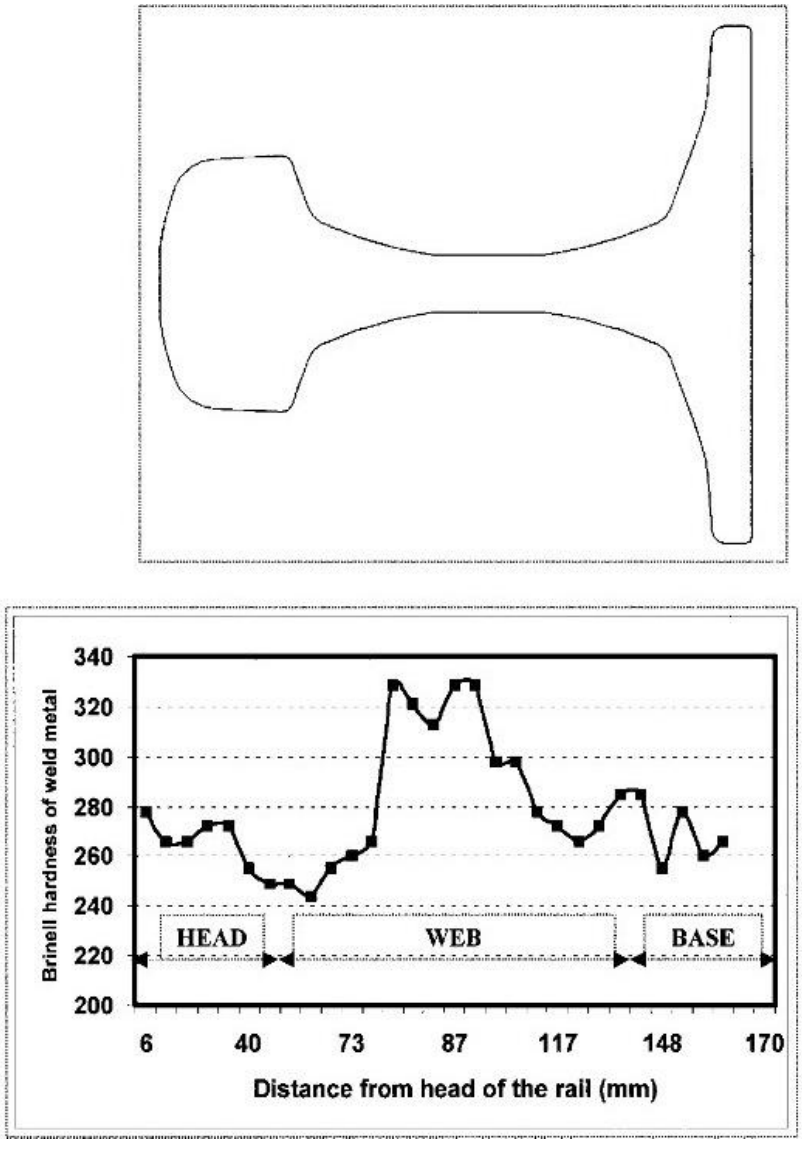
Iš kart po suvirinimo proceso, suvirinimo zonos centrinės linijos temperatūra kakliuke turi būti aukštesnė nei galvutėje ir pade. Todėl dar kartą reikia daryti išvadą, kad vidutinis srovės tankis, kuris eina iš kakliuko vienetinio ploto, yra aukštesnis nei iš galvutės ir pado.

Suvirinimo metu ne tik kakliuko suvirinimo zonos, centrinėje linijoje, temperatūra yra aukštesnė, bet taip pat kakliuko temperatūra tarp elektros srovę perduodančių vario elektrodų (maždaug 30 cm ilgio) yra aukštesnė nei galvutės ir pado temperatūra. Tai galima paaiškinti dėl šių priežasčių:

1. Kadangi bėgių šoninio paviršiaus ploto santykis su kakliuko apimtimi yra didesnis nei galvutėje ir pade, o taip pat elektros srovė daugiausiai pereina iš metalo paviršiaus sluoksnių, todėl vidutinis srovės tankis, kuris pereina iš kakliuko vienetinio ploto, yra didesnis negu galvutėje ir pade.
2. Kakliuko skerspjūvio plotas beveik atitinka pusė galvutės ir pado skerspjūvio ploto. Bėgių galvutės, kakliuko ir pado skerspjūvio plotai, net jeigu vidutinės srovės tankiai, kurie pereina iš kakliuko, pado ir galvutės vienetinio ploto, yra vienodi, susidariusi šilumos varža kakliuke tarp elektros srovę perduodančių vario elektrodų yra didesnė nei galvutėje ir pade.
3. Kadangi elektros srovę perduodančių vario elektrodai sukabinami bėgių kakliuke ir yra didelė elektros varža sąsajoje tarp kakliuko ir vario elektrodų, todėl kakliuko temperatūra su vario elektrodais yra didesnė nei pado ir galvutės, kurie ribojasi su vario elektrodais, temperatūros.

4. Siekiant patvirtinti pirmiau išdėstytus svarstymus, po suvirinimo, naudojant chromo-aliuminio termoelementus, buvo pamatuotos palyginamosios temperatūros bėgių kakliuko, pado ir galvutės viduryse, 5–10 cm nuo suvirinimo centrinės linijos. Kakliuko temperatūra buvo apie 100 °C aukštesnė nei temperatūros bėgių galvutėje ir pade.

Aušinimo metu, suvirinimo zonos metalo susitraukimas, kuris atsiranda kakliuke nutraukus elektros srovę elektroduose, yra didesnis negu bėgių galvutėje ir pade. To pasekoje, kai pasiekiama kambario temperatūra (20 °C), kakliuko suvirinimo metalas ir pagrindinis metalas turi išilginį atsparumą liekamiesiems įtempiams. Tuo pačiu aušinimo metu, bėgių galvutės ir pado suvirinimo metalai ir besiribojantis pagrindinis metalas turi gniuždymo liekamųjų įtempių.



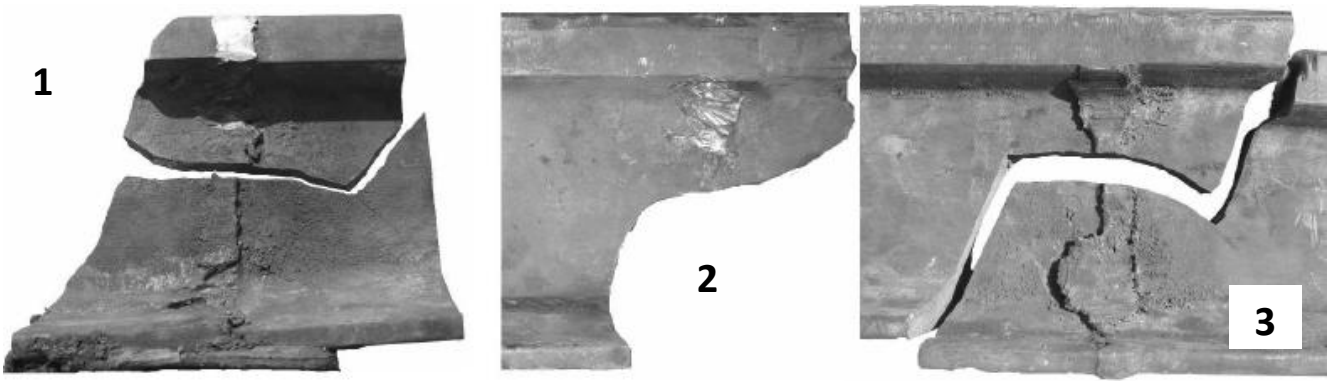
1.21 pav. Bėgių galvutės, kakliuko ir pado, kontaktinės suvirinimo jungties, mikrokietumo rezultatai

1.3. Horizontaliai lūžusių bėgių, suvirintų kontaktiniu būdu, jungties tyrimai

1.3.1. Tyriamieji metodai

Buvo tiriami trys horizontaliai kakliuko srityse lūžę R65 tipo bėgiai suvirinti kontaktiniu aplydomuoju būdu (1.22 pav.). Pagrindinio metalo cheminė sudėtis nustatyta naudojant standartinį spektrometro analizatorių. Lūžę suvirinti bėgiai, apžiūrimosios kontrolės metu, analizuojami tokios būklės, kokie buvo gauti iš avarijos vietos. Atlikta makrofraktografija ir nuotraukų dokumentacija. Suvirinimo jungčių mikrostruktūriniams ir mikrofraktrografiniams tyrimams buvo išpjauti badiniai iš bėgių galvutės, kakliuko ir pado.

Sulūžusių bėgių cheminė analizė atlikta naudojant optinės emisijos spektroskopiją. Mikrostruktūriniam tyrimui bandyniai buvo paruošti pagal standartinius metalografinius metodus, t. y. jų paviršiai šlifuojami, poliruojami, tada išėsdinami 2 % nitalio tirpalu, tiriami optiniu mikroskopu. Lūžio vietos buvo nuvalytos ultragarsu naudojant 6 N hidrochloro rūgšties tirpalą (2 g/L), kuriame yra heksametilentetraminas kaip inhibitorius, ir ištirtos naudojant nuskaitantyjį elektroninį mokroskopą, kuriame sumontuota energijos dispersinės analizės įranga.



1.22 pav. Lūžę R65 tipo bėgiai suvirinti kontaktiniu būdu: 1, 2, 3 – bėgių lūžių eskizai

1.3.2. Darbo rezultatai

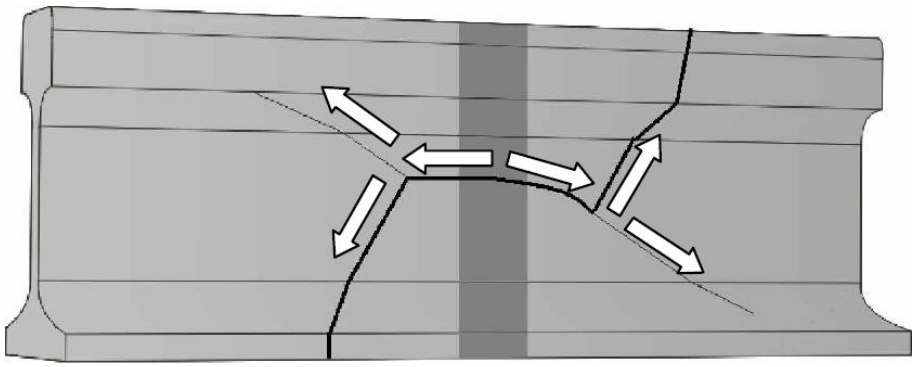
Trijų lūžusių bėgių pagrindinio metalo cheminė sudėtis pateikta 1.2 lentelėje. Bėgių plieno sudėtis analogiška standartinei bėgių plieno 900A cheminei sudėčiai. Šio plieno stiprumas apytiksliai yra 900 MPa. Kaip matyti 1.2 lentelėje anglies kiekis yra šiek tiek mažesnis nei eutektoidinio plieno, todėl bėgių mikrostruktūra iš esmės susideda iš perlito su nedideliu kiekiu ferito lūžiu, kuris apima perlito

grūdelių ribas. Perlitinis bėgių plienas daugiausiai naudojamas dėl jų gero atsparumo nusidėvėjimui, plokštelinės kietos fazės (cementito), plastinių deformacijų, kurios susidaro, dėl kontaktinių įtempių tarp aširačio ir bėgio paviršių eksploatavimo metu. Kietos cementito mikrostruktūros, palyginti su beinitinėmis ar martensitinėmis mikrostruktūromis, pasižymi geresniu atsparumu nusidėvėjimui. Pastarosios negali būti pritaikytos bei gerinamos jų mikrostruktūrinės savybės.

1.2 lentelė. R65 tipo lūžusių bėgių pagrindinio metalo cheminė sudėtis

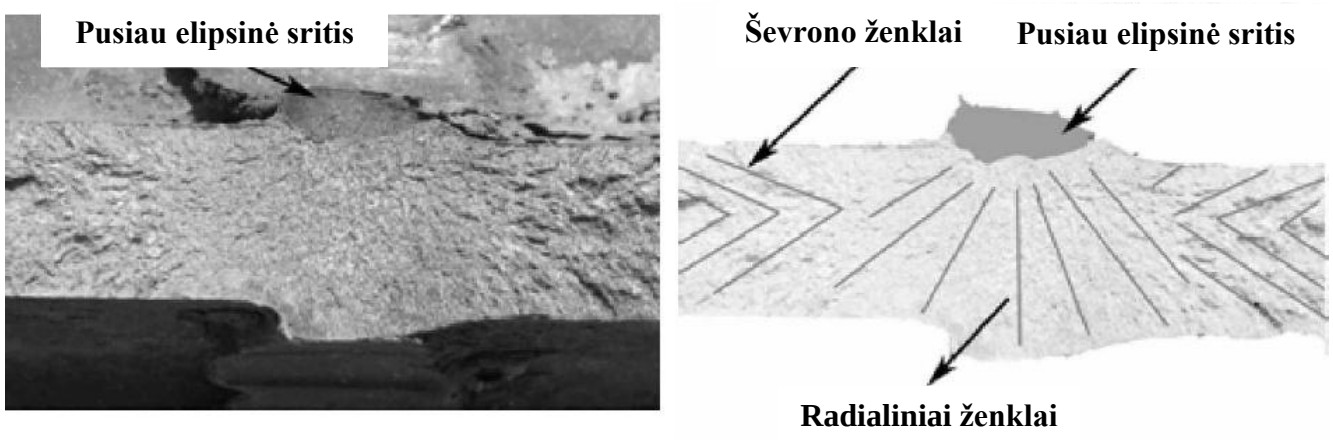
R65 markės bėgiai	**% elemento masėje**					
	C	**Si**	**Mn**	**P**	**S**	**Fe**
1	0,76	0,29	1,05	0,009	0,014	Balansas
2	0,74	0,27	0,94	0,011	0,016	Balansas
3	0,75	0,25	0,91	0,018	0,035	Balansas
900A	0,6–0,8	0,5–0,1	0,8–1,3	0,04 max	0,04 max	Balansas

Trys lūžę suvirinti bėgiai, turi panašias lūžių ypatybes (1.22 pav.). Beveik horizantali lūžio plokštuma, kertanti suvirintos jungties lūžį ir plyšio plitimo makroskopinę kryptį, kuri nustatoma ševrono ženklų pagalba ant lūžio paviršiaus, pavaizduota 1.23 paveiksle. Plyšiai plinta lygiagrečiai bėgių paviršiui (horizontaliai), t. y. bėgių kakliuku ir tuomet keičia kryptį link bėgių galvutės ir pado plokštumų 45° laipsnių kampu.



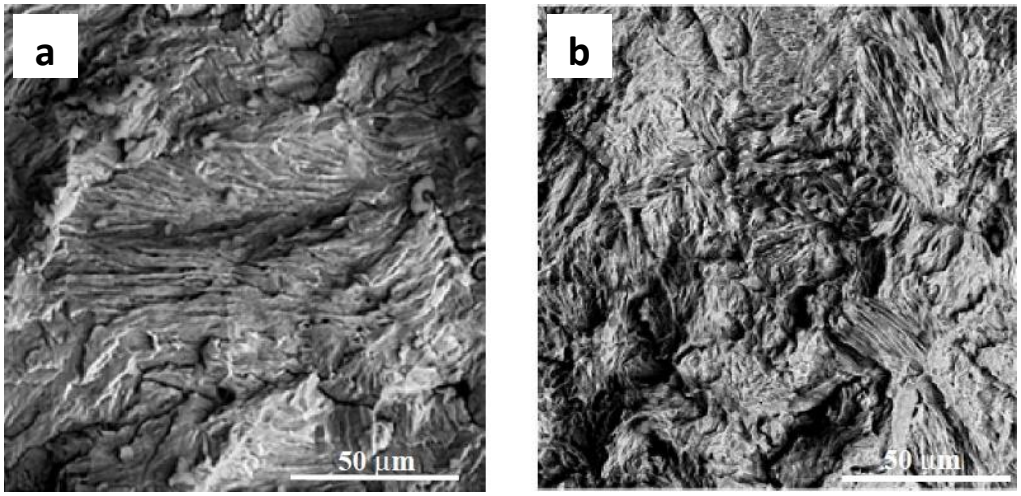
1.23 pav. Suvirintų bėgių makroskopinio plyšio plitimo kryptis

Kaip parodyta 1.24 paveiksle (a, b), pusiau elipsinė sritis gali būti gerai matoma horizontalaus lūžio paviršiuje su aiškiai apibrėžtomis ribomis. Ši sritis, kuri pasižymi lygia plokštuma, buvo tiksliai šalia pašalintų medžiagų nuovargio metu (nuvargusios medžiagos). Radialiniai ir ševrono ženklai pastebimi labiau šiurkštesnėse paviršių srityse už pusiau elipsnės srities. Dvi lūžio paviršiaus atskiros makroskopinės sritys aiškiau pavaizduotos schematiškame paveiksle (1.24 pav., b).



1.24 pav. Lūžusių bėgių paviršių sritys: a – makroskopinio lūžio paviršiaus vaizdas, b – schematiškas lūžio vaizdas su radialiniais ir ševroro ženklais bėgio kakliuko paviršiuje

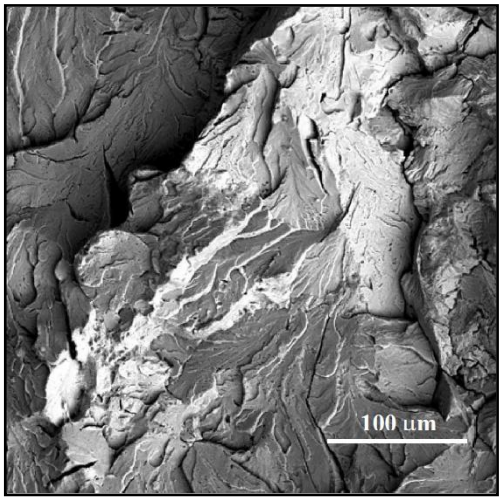
Pusiau elipsinės srities lūžio paviršius susideda iš kompleksinės paviršiaus topografijos. Lūžio paviršiaus tyrimas, didelio priartinimo fraktografu (1.25 pav.), atskleidžia gretimas sritis su skirtingai orientuotomis lygiagrečiomis žymėmis, kurios turi didelę mikrostruktūros įtaką mikroskopinio plyšio augimo krypčiai per lėtą ir stabilų jo didėjimą. Mikrostruktūriniai tyrimai parodė, kad šio tipo plyšio morfologija yra glaudžiai susijusi su sloksniuota perlito struktūra, kuri susideda iš ferito ir cementito.



1.25 pav. Pusiau elipsinės srities kompleksinė paviršiaus morfologija: a, b – plyšio mikrostruktūros

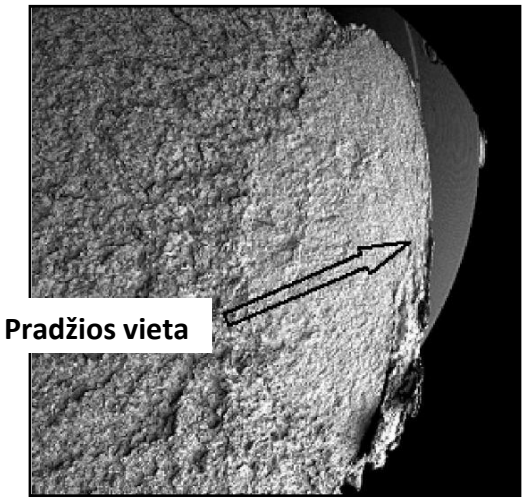
Plyšio paviršius parodo aiškų pokytį lūžio mechanizme už pusiau elipsinio regiono srities. Dominuojantis lūžis morfologiškai keičiasi į “vėduoklės” formos skilimą, būdingą mažos energijos

trapiems plyšio procesams (1.26 pav.). Vadinasi, pusiau elipsinės srities riba aiškiai apriboja plyšio pradžią nuo perėjimo iš lėto ir stabilaus cikliško plyšio didėjimo iki staigaus galutinio plyšio.



1.26 pav. Pusiau elipsinės srities išorinis "vėduoklės" formos skilimas

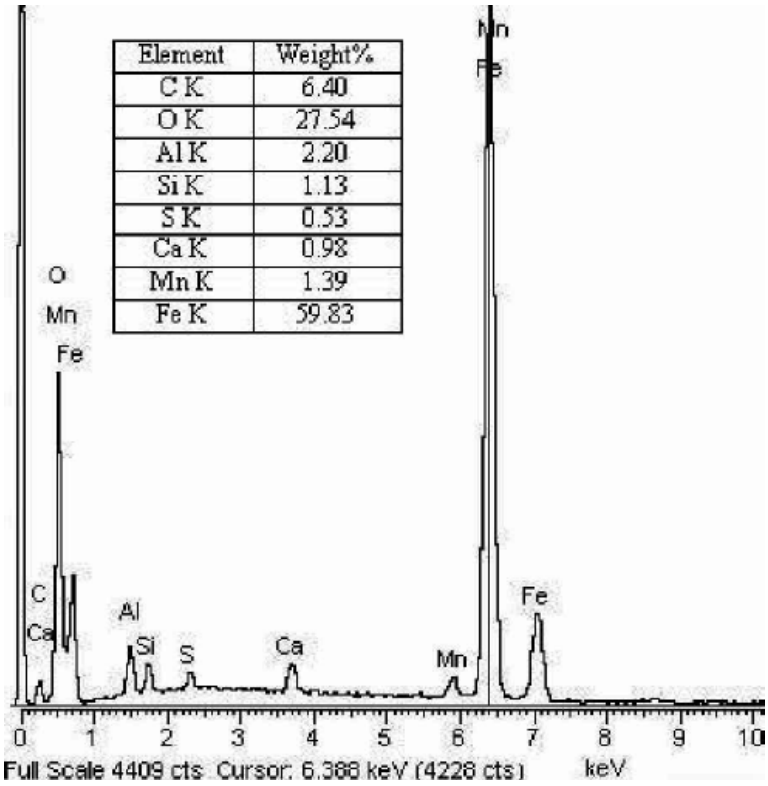
Remiantis minėtais makroskopiniais ir mikroskopiniais tyrimais, ciklišKas plyšio didėjimas dėl nuovargio gali būti identifikuotas kaip pagrindinis papildomas faktorius įvykus suvirintų bėgių avarijai. Mažas pusiau elipsinio plyšio dydis nestabilaus lūžio pradžioje yra tiesiogiai susijęs su bėgių plieno nedidelio lūžio stiprumu, kuris yra 30 MPa ir aukštais įtempių lygiais.



1.27 pav. Nedidelio padidinimo, pusiau elipsės formos nuovargio srities, fraktografija

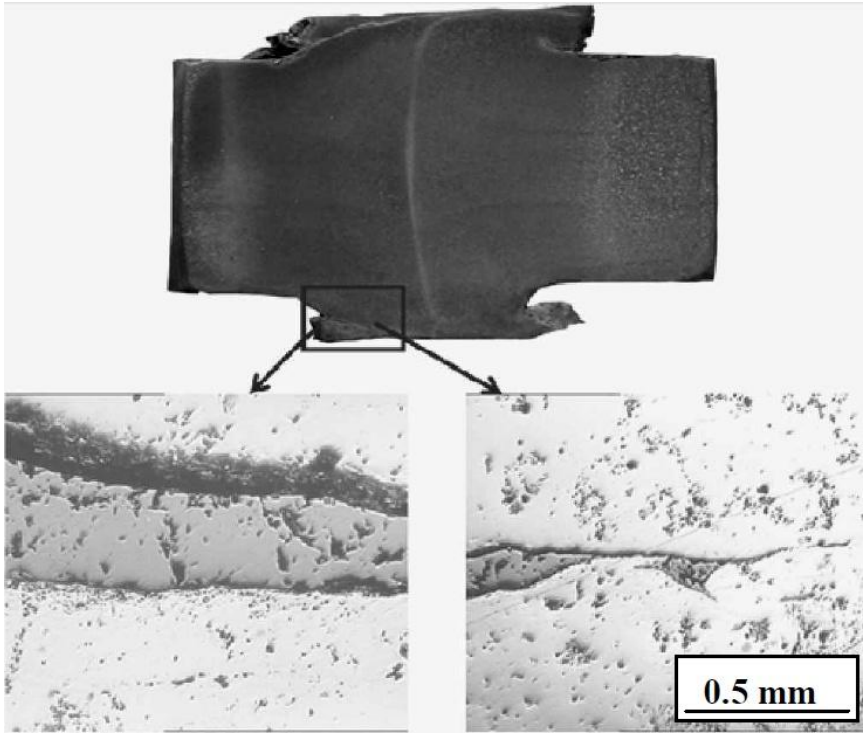
1.27 paveiksle parodyta gauta elektroninės mikroskopijos analizės, nedidelio padidinimo, pusiau elipsės formos nuovargio srities, fraktografija. Progreso ženklai, pasirodantys nuovargio lūžio

paviršiuje ir nurodantys besivystančio plyšio pradžios tolimesnes vietas (angl. *Beach marks*), ir nesugrįžtamo proceso linijos (angl. *Ratchet lines*) pastebimos ant nuovargio lūžio paviršiaus, kurios padeda aptikti plyšio sužadinimo vietą, susijusią su nuvargusia medžiaga suvirinimo siūlės bėgių paviršiuje. Lūžio paviršiaus, prie sužadinimo srities, energijos dispersijos spektroskopijos analizė nustatė oksidų buvimą šioje srityje (1.28 pav.).



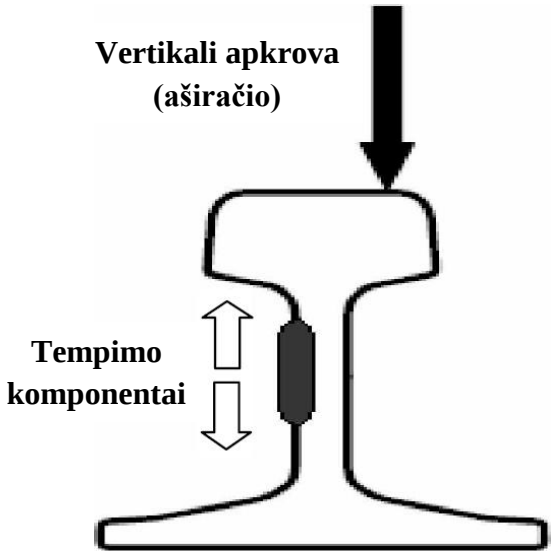
1.28 pav. Lūžio paviršiaus, prie sužadinimo srities, energijos dispersijos spektroskopijos analizė

Oksidų priemaišų buvimą tiesiogiai po lūžio paviršiumi patvirtina atlikti mikrostruktūriniai tyrimai. Dideli oksidų intarpai, kurie buvo įstrigę pjaunant hidrauliniu pjovimo prietaisu susodintas medžiagas suvirinimo pabaigoje, puikiai matomi 1.29 paveiksle. Papildomai, lietos struktūros ir dekarbonizuotos medžiagos gali būti pastebimos suvirinimo paviršiuje. Akytos ir kietųjų dalelių medžiagos, kurios nebuvo įterptos bėgių susodinimo metu, taip pat pastebimos. Statmenai nuovargio plyšio, mikrostruktūrinis tyrimas parodė, kad suvirinimo paviršius yra akytas ir turi uždarytų oksidų besiskverbiančių į 3 mm gylį po paviršiumi. Šie defektai stipriai sumažina suvirinimo paviršiaus kokybę, padidina ir pagreitinia nuovargių lūžių susidarymą.



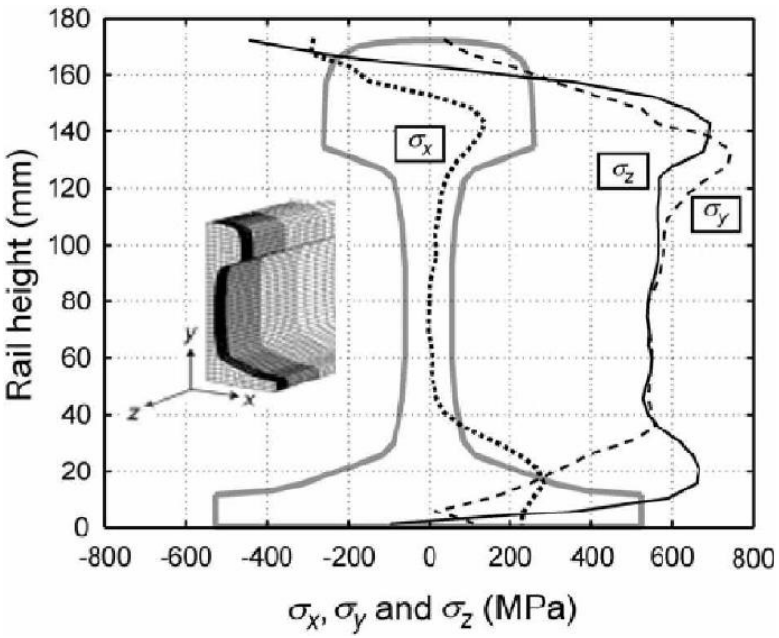
1.29 pav. Dideli oksidų intarpai, įstrigę pjaunant hidrauliniu pjovimo prietaisu susodintas medžiagas

Atsparumas cikliškam tempimui statmenai nuovargio plyšio paviršiui yra būtina sąlyga stebimam nuovargio plyšio plitimui. Iš tiesų, atsparumo pobūdžio tempimui komponentai turi plisti netoli bėgių kakliuko srities vertikalia kryptimi. 1.30 paveiksle matomi atsparumas tempimui komponentai gali plisti dėl neįprastos vertikalios apkrovos aširačiui pravažiuojant bėgiais.



1.30 pav. Vertikali apkrova aširačiui pravažiuojant bėgiais ir susidarę tempimo komponentai kakliuke

Didelis atsparumas liekamiesiems įtempiams gali būti plėtojamas kaip kontaktinio suvirinimo proceso terminis ciklas. Suvirinimo sritis bėgių kakliuke, tiek vertikalūs, tiek išilginiai liekamųjų įtempių srities komponentai yra labai atsparūs. Vertikalus atasparumas liekamiesiems įtempiams suvirinimo srityje, kakliuko viduryje, buvo pastebėtas atlikus kai kuriuos tyrimus. Pasitelkiant modeliavimą ir eksperimentinius matavimus buvo ištirta, kad vertikalus atsparumas liekamiesiems įtempiams suvirinimo srityje, kakliuko viduryje, yra maždaug 500 MPa (1.31 pav.). Mažesni atsparumai gniuždymui ar tempimui, kurie gali atsirasti aširačiui pravažiuojant bėgiais, sumažina atsparumą liekamajam tempimui, todėl sukuriami prastesni cikliški tempimo atsparumai. Daugiau prastų ciklišku tempimo atsparumų atsiranda tuomet, kai padidėja sukimosi apkrova, pavyzdžiui, kai vertikali apkrova tenka šalia bėgių išorinėje pusėje ir / arba horizontali aširačio apkrova padidėjusi dėl įlinkio ar vibracijos.



1.31 pav. Bėgių kakliuko vidurio, suvirinimo srities, vertikalus atasparumas liekamiesiems įtempiams

Dėl aširačio įlinkio ir vibracijos, bėgių važiuojamosios dalies pažeidimų, dviejų gretimų bėgių suvirinimo atsiradę dinaminiai efektai gali žymiai padidinti apkrovas ir padidinti tokio lūžio tendenciją. Dinaminės jėgos gali žymiai sumažinti kritišką nuovargio plyšio dydį. Jei jos atsiranda pakankamai dažnai, tada gali padidinti nuovargio plyšio augimo rodiklius.

2. TIRIAMOJO DARBO METODIKA

Atsižvelgiant į tiriamojo R65 tipo bėgio būklę buvo parinkti ardomieji ir neardomieji tyrimai. Jie suskirstyti taip:

- apžiūrimasis paviršiaus tyrimas;
- ultragarsinės kontrolės tyrimas;
- važiuojamasis paviršiaus kiečio bandymas;
- sulydymo zonos nustatymas. Forma ir matmenys;
- termiškai suminkštintos zonos kiečio matavimas;
- mikroskopinis jungties matomosios terminio poveikio ir sulydymo zonų tyrimas. Mikrokietumo matavimas;
- smūginio tąsumo bandymas;
- cheminė analizė;
- aširačio ir bėgio sąveikos tyrimas baigtinių elementų metodu (BEM)

2.1. Apžiūrimasis paviršiaus tyrimas

Virintinės bėgių siūlės rumbelės paviršius turi būti valomas ir šlifuojamas. Tada apžiūrimas jo vientisumas (LST EN 17637:2011):

- neturi būti jokių 2 mm ar didesnių ilgio įtrūkių;
- bandinyje negali būti didesnių kaip 3 mm porų, neturi būti daugiau kaip trijų porų, kurių dydis – 2–3 mm;
- šlako ir smėlio intarpai neturi viršyti ribų, kurios pateiktos 2.1 lentelėje. Joks defektas neturi patekti į bėgio skerspjūvį ar siekti siūlės rumbelės ir bėgio susikirtimo briauną.

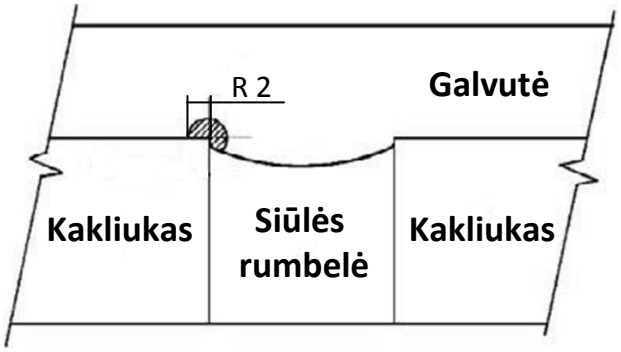
2.1 lentelė. Didžiausi šlako ir smėlio defektų matmenys

Paviršiaus matmuo (maks.), mm	***Storis (maks.), mm***
10	3
15	2
20	1

Bėgių galvutė ir nušlifuotas siūlės rumbelės paviršius abiejose bėgių galvutės pusėse turi atitikti šiuos reikalavimus:

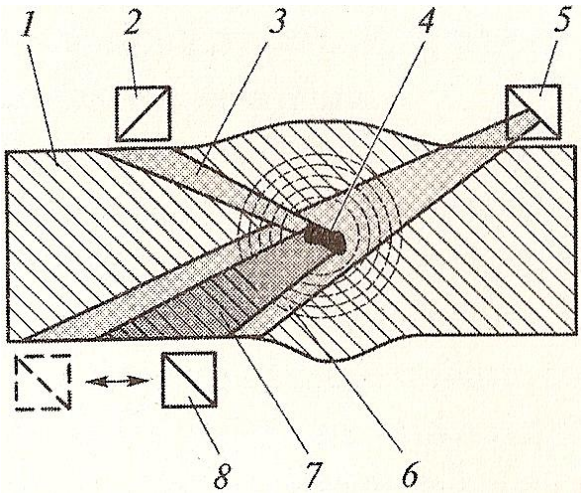
- neturi būti jokių įtrūkių;

- negali būti jokių defektų (porų, šlako intarpų, metalo purslų), kurių matmenys didesni kaip 1 mm. Geležinkelio administracijos nustatymu defektai gali būti didesni už ribą, jeigu riba yra mažesnė už 1 mm;
- daugiausia ne didesnio kaip 2 mm matmens defektas turi būti priimtinas 2.1 paveiksle užbrūkšniuotoje 1 zonoje ne daugiau kaip 10 % bandomųjų siūlių arba vienoje siūlėje, jeigu iš viso yra mažiau kaip 10 siūlių.



2.1 pav. Nušlifuotas bėgių virintinės jungties rumbelės paviršius

2.2. Ultragarsinės kontrolės tyrimas



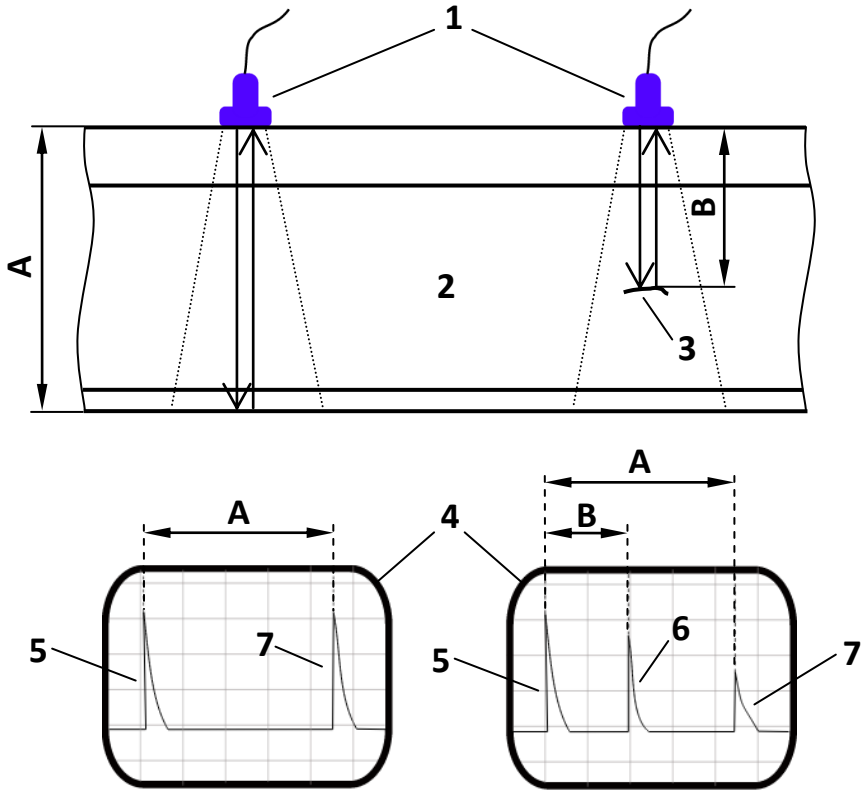
2.2 pav. Ultragarsinės defektoskopijos schema: 1 – tiriamasis objektas (suvirintų detalių jungtis); 2, 8 – akustinių virpesių imtuvai; 3 – atsispindėjusi banga; 4 – defektas; 5 – spinduliuojantis šaltinis (siųstuvas); 6 – išeinanti ultragarsinė banga; 7 – akustinis šešėlis

Geležinkelio bėgių būklės diagnostikai bei vidiniams įtrūkimams aptikti jau seniai naudojamos ultragarsinės diagnostikos priemonės, kurių veikimas yra paremtas išspinduliuotų ultragarsinių bangų,

atsispindėjusių nuo vidinių medžiagos defektų, priėmimu, jų amplitudės, grįžimo laiko, formos ir kitų charakteristikų analizavimu.

Bėgių suvirinimo siūlės ir šalia jos easnčių vidinių zonų ultragarsinei kontrolei atlikti taikomas veidrodinis šešėlinis metodas (2.2 pav.). Taikant šį metodą, nereikia dvipusio priėjimo prie gaminio. Čia defekto aptikimo kriterijus yra nuo priešingo paviršiaus atsispindėjusio signalo amplitudės sumažėjimas. Naudojami du PE keitikliai: siųstuvas ir imtuvas.

Spinduliuojančio šaltinio *5* virpesių bangos (akustinis laukas) praeina per suvirintą jungtį *1*. Jeigu yra defektas *4* – keičia akustinio lauko struktūra (pasirodo akustinis šešėlis *7* ir tasispindėjusi banga *3*). Imtuvas *2* registruoja atsispindėjusią nuo defekto bangą, o imtuvas *8* – susilnėjusią (šešėlinę) bangą. Pagal šių imtuvų rodmenis nustatomas ne tik defekto dydis, bet ir apibūdinama jo konfiguracija ir vieta. Ultragarsu galima aptikti iki 0,5 µm dydžio defektus bet kurio storio metale pradedant ≈ 1 mm gyliu.



2.3 pav. Bėgio ultragarsinės kontrolės schema: A – gaminio plotis; B – atstumas iki defekto; 1 – ultragarsinis keitiklis (ieškiklis); 2 – bėgis; 3 – defektas; 4 – defektoskopo ekranas; 5 – zonduojantis impulsas; 6 – aido signalas nuo defekto; 7 – signalas nuo kito gaminio paviršiaus

Suvirintinių jungčių kontrolė ultragarsu atliekama remiantis šiais standartais: LST EN ISO 17640:2011 „Virintinių siūlių neardomoji kontrolė. Suvirintųjų sujungimų ultragarsinė kontrolė”; LST

EN 11666:2011/A1(A2) „Neardomoji virintinių siūlių kontrolė. Ultragarsinė suvirintųjų jungčių kontrolė. Priėmimo lygmenys". LST EN 23279:2010/A1(A2) „Virintinių siūlių neardomoji bandymai. Ultragarsiniai bandymai. Rodmenų siūlėse apibūdinimas". LST EN 17640:2011/A1(A2) „Neardomoji virintinių siūlių bandymai. Ultragarsinis suvirintųjų sujungimų bandymas".

Taikant ultragarsinės kontrolės metodą aptinkami vidiniai defektai: plyšiai, šlakai, poros, intarpai, nesulydymai ir kt. Galima apskaičiuoti ir nustatyti aptiktų defektų matmenis, padėtį ir orientaciją.

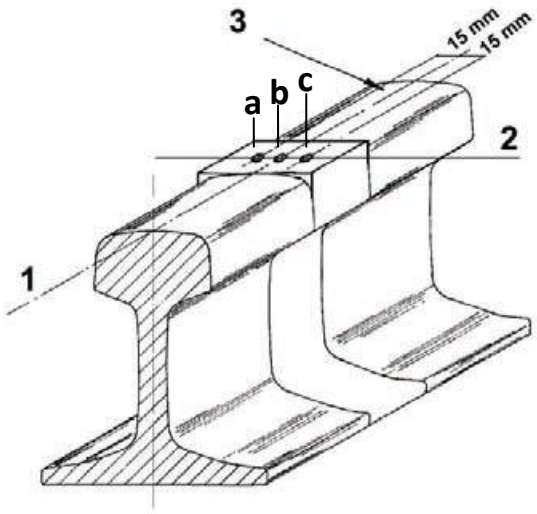
2.3 paveiksle pavaizduoti sveiko bėgio ir su vidiniu įtrūkimu signalai, kurie fiksuojami ultragarsinio defektoskopo ekrane. Svarbu tai, kad kontrolės zona priklauso nuo gaminio medžiagos, storio ir nuo kampo, kuriuo ultragarsas įterpiamas į gaminį.

2.3. Važiuojamasis paviršiaus kiečio bandymas

Paviršiaus kiečio matavimo procedūra, Brinelio metodu, turi būti atliekama pagal EN ISO 6506-1:2006 „Metalai. Brinelio kiečio nustatymas. 1 dalis. Bandymo metodas" standarto reikalavimus naudojant:

- 10 mm skersmens volframo karbido rutuliuką;
- 3000 kg bandymo apkrovą;
- apkrovos trukmę, lygią 15 s.

Virintinės bėgių siūlės viršus turi būti nušlifuotas 0,5 mm sluoksnis iki plokščio paviršiaus, kuris yra bėgio viršaus susikirtimo su vertikaliąja bėgio ašimi taško liestinėje (2.4 pav.).



2.4 pav. Paviršiaus kiečio bandymų vietos: 1 – bėgio viršaus centrinė linija; 2 – siūlės skersinė centrinė linija; 3 – bėgio važiuojamasis paviršius; a, b ,c – kiečio matavimo taškai

Nustatomos trys kiekvienos siūlės kiečio vertės, kaip parodyta 2.4 pav. Bėgių paviršiaus kiečio bandymų intervalai pateikti 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. Važiuojamojo paviršiaus kiečio bandymų intervalai

Bėgio markė	***Kiečio intervalas HBW***	
	Bėgio važiuojamasis paviršius ant nepaveikto pirminio bėgio	***Siūlės centrinė linija***
R200	nuo 200 iki 240	230±20
R220	nuo 220 iki 260	250±20
R260	nuo 260 iki 300	280±20
R260Mn	nuo 260 iki 300	280±20
R320Cr	nuo 320 iki 360	330±20
R350HT	nuo 350 iki 390	350±20
R350LHT	nuo 350 iki 390	350±20

2.4. Sulydymo zonos nustatymas. Forma ir matmenys

Šiam tyrimui atlikti, pirmiausia, turi būti išilgai perpjautas suvirintas bėgis. Dažnai šiam procesui naudojamos juostinio pjūklo pjovimo staklės, kurios pjovimo metu aušina skysčiu. Svarbu tai, kad pjaunamas metalas neįkaistų (ne daugiau kaip 100 °C), nes priešingu atveju gali pasikeisti metalo struktūra ir pakenkti tyrimams.

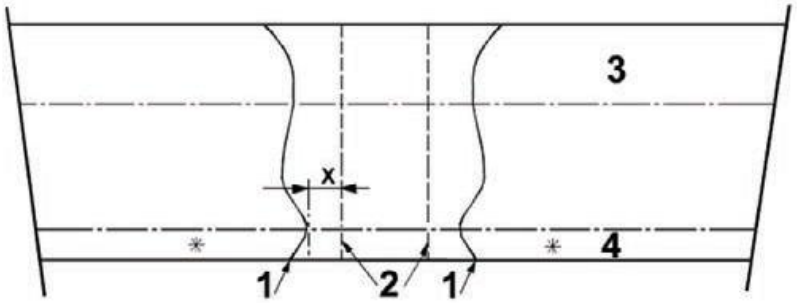
Gauta plokštuma, dėl didelio paviršiaus šiurkštumo, turi būti šlifuojama. Grubūs nelygumai nuimami skirtingo rupumo švitriniais popieriais, pradedant rupiausiais ambrazyvo grūdeliais, kurių matmenys yra 160–200 µm dydžio ir baigiant labai smulkiais ambrazyvo grūdeliais – 1–2 µm dydžio. Šlifavimo metu, paviršius turi būti aušinas vandeniu. Kai ant nušlifuotos plokštumos bus matomi tik pačių smulkiausių ambrazyvo grūdelių įbrėžimai, tada pereinama prie paviršiaus poliravimo.

Esant didelei bėgio plokštumai, poliravimo procesui patogu naudoti kampinį poliruoklį, kurio diskas gali būti aptrauktas zomšu, fetru, arba minkšta medžiaga. Poliruojamas disko paviršius nuolat drėkinamas poliravimo skysčiais. Jį sudaro aliuminio, chromo ir kitų oksidų miltelių vandens suspensijos. Poliravimas baigiamas tada, kada plokštumos paviršius įgyja veidrodinį blizgesį.

Nupoliruotas bėgio paviršius turi būti išėsdintas, tolygiai panardintas į 4 % nitalio tirpalą, išlainat apie 5–6 s. Tada nuplaunamas distiliuotu vandeniu ir džiovinamas, galiausiai nuriebalinamas paviršius techniniu spiritu. Galima matyti išryškintos sulydymo zonos formą ir matmenis.

Po ėsdinimo turi būti išmatuota sulydymo zona (2.5 pav.). pavaizduotuose pjūviuose. Mažiausias atstumas *x* (2.5 pav.) tarp pirminio bėgio galo prieš suvirinimą ir sulydymo linijos turi būti ne mažesnis

kaip 3 mm. Atstumas *x* turi būti matuojamas naudojant duomenų įspaudus bėgių galų pradinėms padėtims nustatyti.



2.5 pav. Sulydymo zonos forma išėsdintame išilginiame vertikaliajame pjūvyje: * – duomenų įspaudai ant pado krašto; 1 – sulydymo linija; 2 – bėgių galai prieš suvirinant; 3 – bėgio galvutė; 4 – bėgio padas

2.5. Termiškai suminkštintos zonos kiečio matavimas

Bėgio termiškai suminkštintos zonos Vikerso kiečio matavimo procedūra atliekama pagal EN ISO 6507-1:2006 „Metalai. Vikerso kiečio nustatymas. 1 dalis. Bandymo metodas" standartą ir naudojant 30 kg apkrovą. Įspaudai turi būti linijoje, easnčioje nuo 3 mm iki 5 mm žemiau bėgio važiuojamojo paviršiaus išilginėje bėgio ašyje.

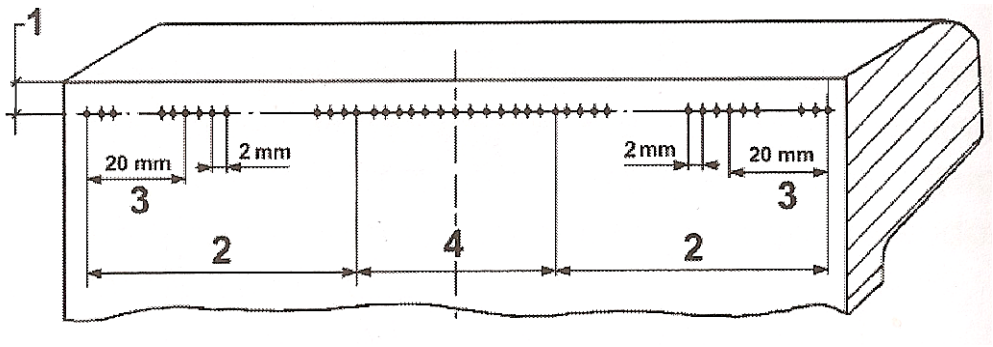
Kiečio matavimo zona turi tęstis skersai siūlės ir į abi puses, kol bus pasiekta 20 mm nepaveikto pirminio bėgio kiečio. Matavimai turi būti atliekami kas 2 mm žingsniu. Tai parodyta 2.6 paveiksle.

Vidutinis pirminio bėgio kietis abiejose siūlės pusėse skaičiuojamas iš bent dešimties kiečio matavimų nepaveiktame pirminiame bėgyje.

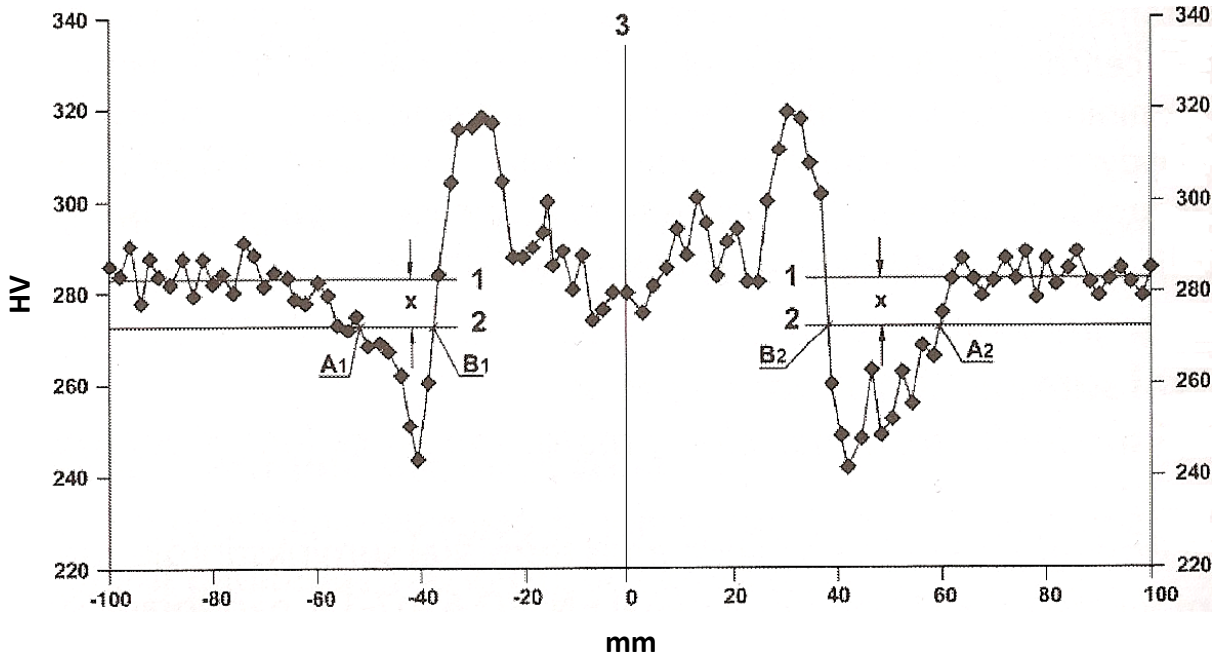
Gauti kiečio matavimo rezultatai turi būti užrašyti skaitinėmis vertėmis ir užrašyti grafiškai (2.7 pav.). 1 linija – tai vidutinį kietį atitinkanti linija, kuri grafike nubrėžiama abiejose siūlės pusėse. 2 linija – matavimo kiečio linija, kuri nubrėžiama lygiagrečiai su vidutinio kiečio linija atstumu *x* (2 linija turi būti žemiau vidutinio kiečio linijos (1 linija)). *x* vertė priklauso nuo bėgio markės (2.3 lent.). Atstumas tarp taškų A ir B (A_1 ir B_1; A_2 ir B_2) – termiškai suminkštintos zonos plotis.

2.3 lentelė. *x* vertės priklausomai nuo bėgio markės

Bėgio markė	**R200**	**R220**	**R260**	**R260Mn**	**R320Cr**	**R350HT**	**R350LHT**
***x* vertė**	10	10	10	10	10	25	25



2.6 pav. Išilginis bėgio termiškai suminkštintos zonos kiečio matavimas: 1 – storis nuo 3 mm iki 5 mm; 2 – pirminis bėgis; 3 – nepaveiktas pirminis bėgis; 4 – sulydymo zona



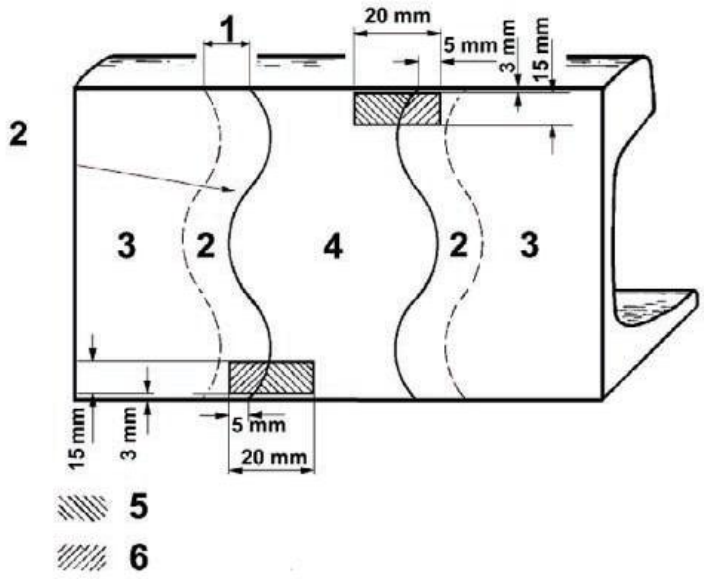
2.7 pav. Kiečio matavimų grafikas: 1 – 1-a linija; 2 – 2-a linija; 3 – centrinė siūlės linija

2.6. Mikroskopinis jungties matomosios terminio poveikio ir sulydymo zonų tyrimas. Mikrokietumo matavimas

Mikroskopinė analizė (mikroanalizė) – tai metalų ir lydinių sandaros (mikrosandaros) tyrimas optiniu mikroskopu, paprastai padidinus nuo 50 iki 500 kartų (LST EN ISO 17639:2013). Šiai analizei turi būti išpjauti bandiniai su specialiai paruoštais jų paviršiais (mikrošlifais). Šis tyrimas pagrystas tuo, kad besikristalizuojančiame lydinyje susidaro įvairios fazės, t. y. skirtingų savybių tūriai, kurie skirtingai reaguoja su ėsdinančiais tirpalais ir skirtingai atspindi šviesą. Per mikroskopą matoma metalo struktūra yra vadinama mikrostruktūra.

Šia analize galima nustatyti metalų bei jų lydinių struktūros grūdelių dydžius, lydinių struktūrinių komponentų skaičių, jų kiekius ir išsidėstymą, struktūros pokyčius, įvykusius per terminį, termocheminį, mechaninį arba kitokį apdorojimą, metalo defektus (šlako intarpus, poras, plyšius ir kt.), ir nemetalinius intarpus metale (oksidus, sulfidus, fosfidus, nitridus ir kt.).

Bėgio jungtyje pasirenkmos tokios bandinių išpjovimo vietos, kurios geriausiai parodo tiriamojo metalo struktūrą. Bandinių paimimo vietos nurodytos 2.8 paveiksle, kuriose būtų įterptos pagrindinės bėgio jungties sritys, t. y. siūlės, terminio poveikio ir pagrindinio metalo.



2.8 pav. Bėgio jungties bandinių paimimo vietos mikroskopinei analizei schema: 1 – matomosios terminio poveikio srities plotis, matuojamas išilginėje centrinėje siūlės linijoje ant važiuojamojo paviršiaus; 2 – matomoji terminio poveikio sritis; 3 – nepaveiktas pirminis bėgis; 4 – siūlės sulydymo sritis; 5 mikroskopiškai tiriamas sulydymo srities plotas; 6 – mikroskopiškai tiriamas matomosios terminio poveikio srities plotas

Išpjauti bandiniai (mikrošlifai) pasižymi paviršiniais nelygumais, kurie turi būti nušlifuoti. Patogu naudoti specialius mechaninius šlifavimo įrenginius, turinčius 250–300 mm skersmens besisukančius diskus. Prie šių diskų pritvirtinamas švitrinis popierius. Visas procesas turi būti aušinamas vandeniu, nes kitu atveju, įkaitus metalui daugiau kaip 100 °C, gali pasikeisti jo struktūra, o tai pakenktų tolesniems mikroanalizės tyrimams. Baigus šlifuoti švitriniais popieriais, mikrošlifų plokštumos poliruojamos.

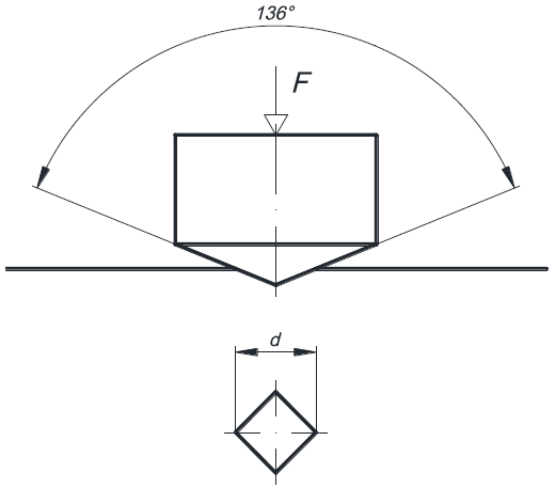
Mechaniniu būdu bandinių paviršiai poliruojami besisukančiais 250–500 mm skersmens diskais, aptrauktais zomšu, fetru arba minkšta medžiaga. Poliruojamas disko paviršius nuolat drėkinamas poliravimo pasta arba emulsija su ambrazyviniais milteliais. Poliravimas laikomas baigtu, kada plokštumos paviršius įgyja veidrodinį blizgesį, ir žiūrint pro mikroskopą joje nematyti įbrėžimų.

Bandinių nupoliruoti paviršiai turi būti išėsdinti, tolygiai panardinus į 4 % nitalio tirpalą, išlainat apie 5–6 s. Tada nuplaunami distiliuotu vandeniu ir džiovinami, paskui nuriebalinami paviršiai techniniu spiritu.

Mikrokietumo matavimas

Mikrokietumo matavimai taikant Vikerso metodą atliekami remiantis LST EN ISO 4516:2002 „Metalinės ir kitos neorganinės dangos. Vikerso ir Knopo mikrokietumo bandymai" standartu. Šis tyrimas leidžia nustatyti metalų bei jų lydinių struktūros grūdelių (atskirų fazių) kietumus, naudojant 200 g apkrovą. Struktūros grūdelių kiečio matavimai labai palengvina nustatant įvairias struktūras, kai tai problematiška naudojantis katalogais.

Nustatant metalų ir jų lydinių kietumą Vikerso metodu į paviršių įspaudžiama keturbriaunė deimantinė piramidė, viršūnės kampas – 136° (2.9 pav.). Žinant apkrovos dydį apskaičiuojamas kietumas HV.



2.9 pav. Įspaudo formavimo schema

2.7. Smūginio tąsumo bandymas

Mechaninės medžiagų charakteristikos, gautos statiniais bandymais (tempiant, gniuždant, lenkiant, sukant), t. y., kai atitinkamos apkrovos didėja pamažu, netiksliai apibūdina tų medžiagų atsparumą smūgiams. Be to, dažnai plastiškos medžiagos tam tikromis sąlygomis (slėgis, temperatūra) veikiant jas smūgiais suyra kaip trapios. Visais atvejais medžiagų atsparumą smūgiams galima nustatyti tik atliekant smūginį bandymą. Taip tikrinamos detalės, kurios darbo metu yra veikiamos smūgių arba jose staigiai keičiasi įtempiai.

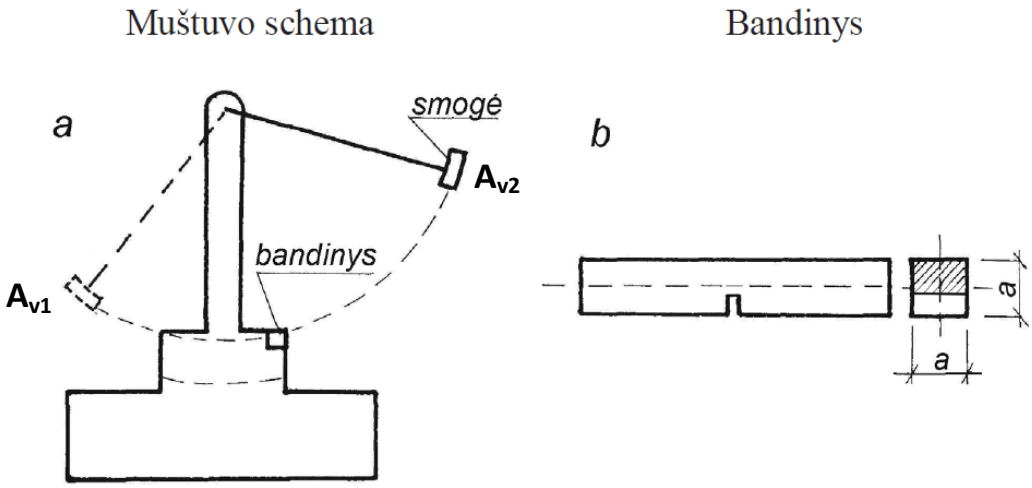
Smūginio tąsumo bandymai turi būti atliekami pagal LST EN ISO 9016:2013 „Metalų virintinių siūlių ardomieji bandymai. Smūginio tąsumo bandymai" reikalavimus. Bandinio vieta, įpjovos orientacija ir tyrimas" standartus. Smūginis tąsumas – tai atitinkamos skerspjūvio formos bandynio smūginio lenkimo darbo (A_v) ir bandinio skerspūvio ploto lūžio vietoje (S) santykis:

$$a_k = A_v / S \ (\mathrm{J/cm^2}) \qquad (2.1)$$

Šiam tyrimui naudojami standartiniai bandiniai: kvadratinio skerspjūvio – 10 x 10 mm ir 55 mm ilgio – su „U" formos įpjovą (2.10 pav., b). Pastaroji daroma įtempių koncentracijai (lūžio vietai) sukelti.

Šiam bandymui atlikti dažniausiai naudojami švituokliniai muštuvai (2.10 pav., a).

Kuo trapesnė medžiaga, tuo a_k mažesnis (lūžyje pastebimi stambūs blizgantys grūdai – kristalinė struktūra).



2.10 pav. Smūginio tąsumo švituoklinio muštuvo ir bandinio schema

2.8. Cheminė analizė

Cheminius elementus, įvedus į plieną lydymo metu, galima pakeisti jos struktūrą ir savybes. Dažniausiai plienai legiruojami metaliniais elementais: Cr, Ni, Mn, Si, Mo, W, V, Ti, Co, Nb, Al, Cu. Plienai, skirti tam tikrai konstrukcijai, šiuo atveju – bėgiams, turi specialias kiekvieno elemento koncentracijos vertes. Šių elementų kiekius pliene turi norodyti tiekėjai. Faktinės vertės turi nesiskirti daugiau kaip darbinis intervalas, kuris turi neviršyti leidžiamojo verčių intervalo (2.4 lent.).

Cheminės analizės esmė – nustatyti elementų sūdėtį bei jų koncentracijos vertes pliene. Tyrimas turi būti atliktas bėgio siūlės važiuojamojo paviršiaus sulydymo srityje bent 5 mm atstumu nuo siūlės skersinės ašies ir bent 5 mm atstumu nuo sulydymo srities ribos. Analizės rezultatai neturi viršyti suvirinimo darbų atlikėjo nurodytų intervalų ribų.

2.4 lentelė. Bėgių cheminė analizė

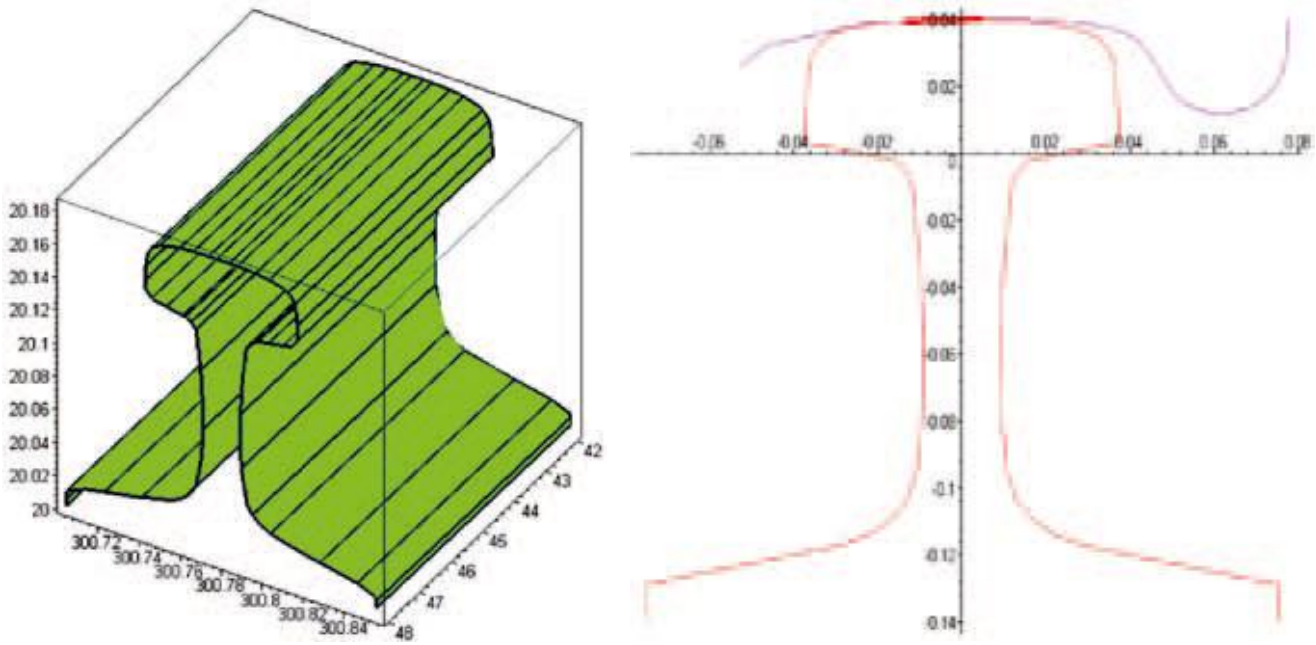
Elementas	**Leidžiamas intervalas, %**		**Darbinis intervalas**	**Bėgio markė EN 13671-1**
	mažiausias	**didžiausias**		
Anglis (C)	0,30	0,55	±0,12	R200
	0,35	0,70	±0,12	R220
	0,40	0,75	±0,12	R260, R260Mn
	0,50	0,85	±0,12	R320Cr, R350HT, R350LHT
Silicis (Si)	0,00	1,20	±0,25	Visos
Mangasnas (Mn)	0,40	1,00	±0,20	R200
	0,45	1,20	±0,20	R220
	0,50	1,40	±0,20	R260, R260Cr
	0,50	1,60	±0,20	R260Mn, R350HT, R350LHT
Fosforas (P)	0,00	0,035	-	Visos
Siera (S)	0,00	0,035	-	Visos
Chromas (Cr)	0,00	0,20	-	R200, R220, R260,
	0,00	0,80	±0,20	R260Mn, R320Cr, R350HT, R350LHT
Molibdenas (Mo)	0,00	0,10	-	Visos
Nikelis (Ni)	0,00	0,10	-	Visos
Aliuminis (Al)	0,02	0,60	±0,20	Visos
Varis (Cu)	0,00	0,20	-	Visos
Alavas (Sn)	0,00	0,02	-	Visos
Stibis (Sb)	0,00	0,02	-	Visos
Titanas (Ti)	0,00	0,05	-	Visos
Niobis (Nb)	0,00	0,01	-	Visos
Vanadis (V)	0,00	0,25	-	R200, R220, R260,
	0,00	0,45		R260Mn,
	0,00	0,65		R320Cr, R350HT, R350LHT

2.9. Aširačio bandažo ir bėgio sąveikos tyrimas baigtinių elementų metodu (BEM)

Tik atsiradus geležinkelio technikai, vis dažniau analizuojama geležinkelio bėgių ir riedmenų aširačių tarpusavio sąveika. Šie tyrimai yra būtini kuriant ir eksploatuojant geležinkelio riedmenis ir kelią, nustatant jų konstrukcinius normatyvus, eksploatavimo ir remonto taisykles.

Pagrindiniai aširačio elementai yra šie: stebulė, ašis, tvirtinamosios bei jungiamosios detalės, ratlankis ir bandažas. Bandažas – tai plieninė valcuota rato dalis, kuri yra presuojama ant disko. Bandažams keliami ypatingi reikalavimai, ypač dideliu greičiu važiuojantiems sunkiasvoriams traukiniams, nes riedėjimo paviršius yra veikiamas įvairių apkrovų. Aširatis liesdamasis su bėgiu, apytiksliai 2,5 mm^2 paviršiumi, perduoda dideles statines ir dinamines apkrovas, todėl didėja įtempiai bėgių ir aširačių medžiagose.

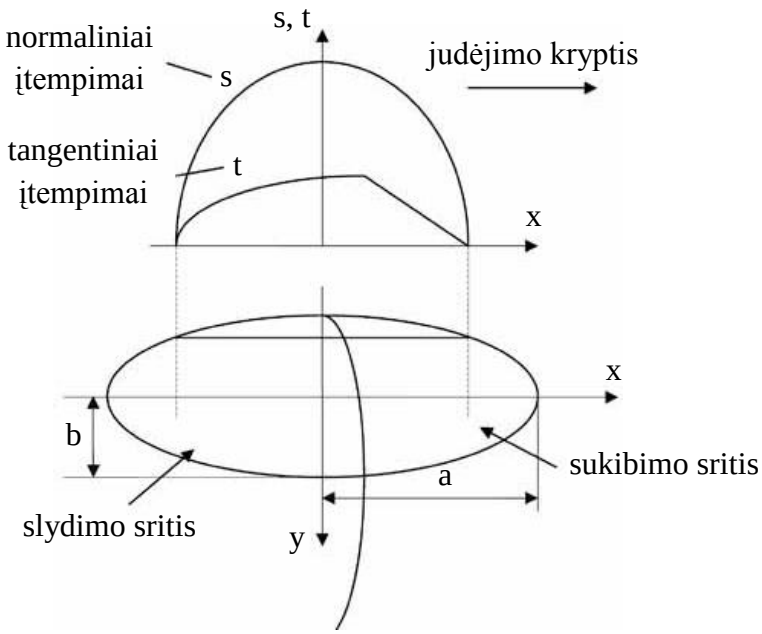
Dviejų tampriųjų kūnų kontakte, tarp bėgio ir aširačio bandažo, veikia tangentiniai τ_{zx}, τ_{zy} ir normaliniai σ_{zz} įtempiai. Kai vyksta dviejų kūnų slydimas vienas kito atžvilgiu, kontakte tam tikruose taškuose atsiranda slydimas, t. y. dviejų kūnų kontakto taške kūnų greičiai yra skirtingi. Tarp dviejų kūnų trinties jėga nelygi nuliui, kai yra tarp kūnų kontaktas, kūnų greičiai yra skirtingi ir prispaudimo jėga nelygi nuliui. Todėl kontakto plote atsiranda trinties jėgos ir šių jėgų momentas.



2.11 pav. Bėgio ir aširačio bandažo geometrijos, ir jų tarpusavio sąveika

Nagrinėjant aširačio bandažo ir bėgio paviršiaus sąveiką, reikia žinoti kreivumo kūnų spindulius. Bandažo ir bėgio geometrija yra gana sudėtinga, t. y. kiekvieno kūno paviršiuje kreivumo spindulys yra kintamas (2.11 pav.).

Aširačio bandažo ir bėgio kontakto geometrija – elipsė, kurios pusašės yra a ir b. Priklausomai nuo judėjimo sąlygų, bėgio ir bandažo kontakte atsiranda sritys, kuriose nėra slydimo ir yra nedidelis slydimas (2.12 pav.).



2.12 pav. Aširačio bandažo ir bėgio kontakto geometrijos, slydimo ir sukibimo sritys

Geležinkelio inžinerijoje vienas svarbiausių uždavinių yra užtikrinti saugų riedmenų judėjimą. Projektuojant geležinkelio riedmenis, dažniausiai susiduriama su įvairiomis dinaminėmis problemomis, aširačių ir bėgių konstrukciniu patikimumu, esant tarpusavio kontaktiniam tampriajam būviui, veikiant įtempiams.

„ANSYS" modeliavimo baigtiniais elementais sistemos leidžia globaliai nagrinėti aširačių bandažų ir bėgių sąveiką, sukuriant objekto ir jo darbinės terpės skaitinį modelį. 3D modeliavimas suteikia inžinieriams ir analitikams pilną spektrą inžinerinio dizaino analizavimo ir optimizavimo funkcijų, įskaitant modeliavimą ir elementų suderinimą, grafines ir dizaino optimizavimo savybes.

Lokomotyvo aširačio bandažo ir bėgio modeliavimas baigtinių elementų metodu (BEM) susideda iš tokių etapų:

- tiriamojo objekto konstrukcinis sukūrimas;
- fizikinių dydžių ir parametrų priskirimas;

- konstrukcinio modelio suskaidymas į baigtinius elementus („tinklelio“ sudarymas);
- kietų kūnų įtvirtinimas ir apkrovų priskirimas
- rezultatų pateikimas.

3. TIRIAMOJO DARBO REZULTATAI

3.1. Apžiūrimojo paviršiaus tyrimo rezultatai

Virintinės bėgių siūlės rumbelės paviršius būvo nuvalytas ir nušlifuotas. Apžiūrėjus suvirintosios jungties rumbelę nebuvo pastebėta jokių 2 mm ar didesnių ilgio įtrūkių, taip pat didesnių kaip 3 mm porų ir nebuvo daugiau, kaip trijų porų, kurių dydis – 2–3 mm. Šlako ir smėlio intarpai neviršijo ribų, kurios pateiktos 2.1 lentelėje. Nepastebėta jokių defektų, kurie būtų patekę į bėgio skerspjūvį ar siekę siūlės rumbelės ir bėgio susikirtimo briauną.

Bėgių galvutėje ir nušlifuotoje siūlės rumbelės paviršiuje abiejose bėgių galvutės pusėse nebuvo aptikti jokie įtrūkiai, nepastebėta porų, šlako intarpų, metalo purslų, kurių matmenys didesni kaip 1 mm.

Kaip parodė siūlės rumbelės paviršiaus tyrimas, kokybę galima įvertinti artimą idealiai. Tai yra todėl, kad atlikus suvirinimą kontaktiniu būdu buvo tinkamai parinkti pagrindiniai parametrai, t. y. suvirinimo srovės dydis ir suvirinimo greitis, bėgių susodinimo jėga ir susodinimo greitis.

3.2. Ultragarsinės kontrolės tyrimo rezultatai

Buvo visapusiškai tikrinama bėgių vidinė diagnostika galvutėje, kakliuke ir pade. Kontroliuojant suvirintinę jungtį ir šalia jos easnčias vidines zonas susidurta su sudėtinga jų forma kontrolės požiūriu. Nebuvo galima kontroliuoti siūlę ir kitas vidines vietas stačiai jų ašies, tad buvo naudojami prizminiai (kampiniai) ieškikliai.

Kontrolės metu, ultragarsiniu keitikliu (ieškikliu), tikrinant įvairias bėgio vidines vietas, defektoskopo ekrane, zonduojančių impulsų pagalba (signalo padėtis ekrane (laiko ašis) ir signalo dydis (aukštis)) neaptikta jokių plyšių, šlakų, porų, intarpų, nesulydymų ir kt.

3.3. Važiuojamojo paviršiaus kiečio bandymo rezultatai

Atlikus važiuojamojo paviršiaus kiečio matavimo procedūrą Brinelio metodu buvo gauti tokie rezultatai: bėgio važiuojamojo paviršiaus ant nepaveikto pirminio bėgio taško a (2.4 pav.) kietis lygus 378 HB; siūlės centrinės linijos taško b kietis buvo gautas 359 HB; bėgio važiuojamojo paviršiaus ant nepaveikto pirminio bėgio taško c kietis buvo lygus 370 HB. Šiuos rezultatus palyginti su važiuojamojo paviršiaus leistinaisiais bėgio markės kiečio bandymų intervalais, galima teigti, kad jie tenkina reikalavimus, t. y. bėgio važiuojamojo paviršiaus ant nepaveikto pirminio bėgio kiečio intervalas turi būti nuo 350 iki 390 HB, o siūlės centrinės linijos – 350±20 HB.

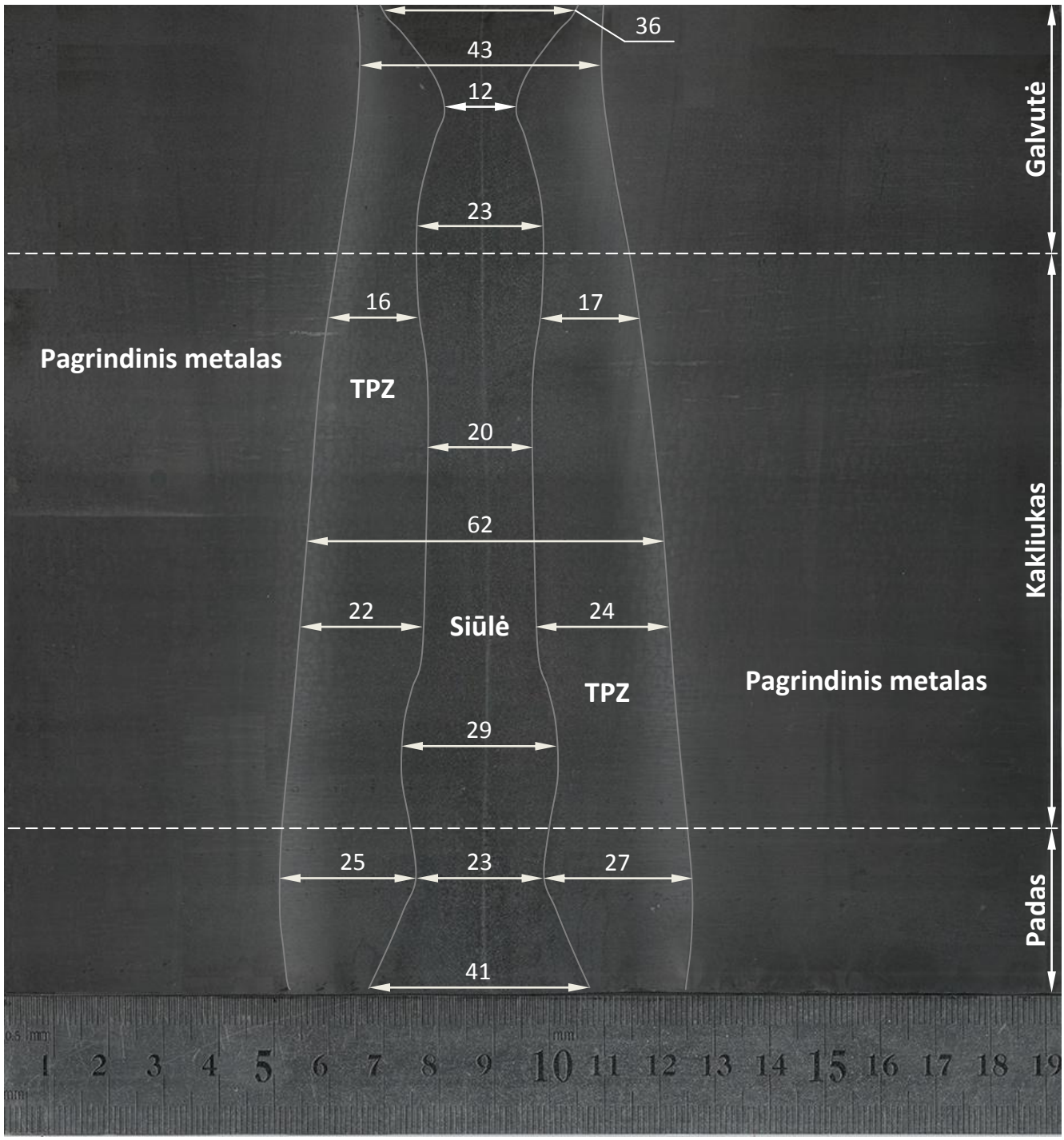
3.4. Sulydymo zonos nustatymas. Forma ir matmenys

Suvirintas R65 markės bėgis buvo išilgai perpjautas. Grubūs paviršiaus nelygumai, aušinant vandeniu, nušlifuoti skirtingo rupumo švitriniais popieriais, pradedant rupiausiais ambrazyvo grūdeliais, kurių matmenys yra 160–200 μm dydžio ir baigiant labai smulkiais ambrazyvo grūdeliais – 1–2 μm dydžio. Kai ant nušlifuotos plokštumos matomi tik pačių smulkiausių ambrazyvo grūdelių įbrėžimai, buvo atliekamas paviršiaus poliravimas.

Nupoliruotas bėgio paviršius išėsdintas tolygiai panardintas į 4 % nitalio tirpalą, išlaikius apie 5–6 s. Tada nuplautas distiliuotu vandeniu ir džiovintas, galiausiai nuriebalintas paviršius techniniu spiritu. Buvo nustatytos išryškintos sulydymo zonos formą ir matmenis.

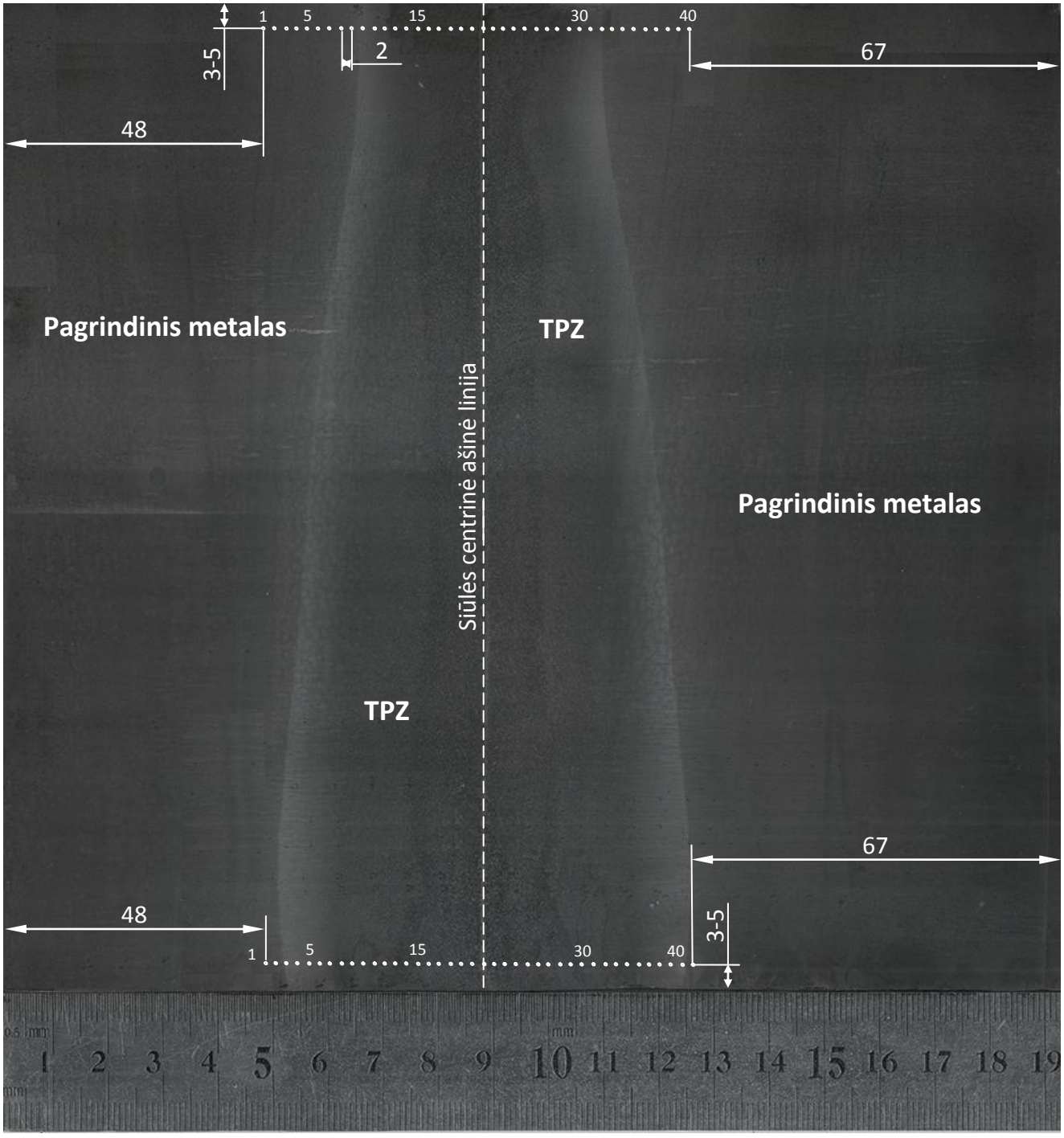
Gauti rezultatai parodė nemažus skirtumus palyginti su termitiniu būdu gautomis sulydymo zonos geometrijomis (3.1 pav.). Juos galima išskirti taip:

- Bėgio galvutės sulydymo zonos geometrija, suvirinant kontaktiniu būdu, palyginti su termitiniu būdu gautomis sulydymo zonos geometrijomis (pateikta priede Nr. 2), pasižymi du kartus siauresne siūlės sritimi (≈ 36 mm – kontaktinio suvirinimo ir ≈ 70 mm – termitinio suvirinimo) ir net daugiau kaip du kartus terminio poveikio sritimi (≈ 43 mm – kontaktinio suvirinimo ir ≈ 112 mm – termitinio suvirinimo). Jungtys, gautos kontaktiniu būdu, yra kokybiškesnės negu termitinės;
- Veikiant darbo ir liekamiesiems įtempiams (aširačio ir bėgio tarpkontaktinė sąveika), esant siauresnei terminio poveikio zonai, mažesnė tikimybė susidaryti plyšiams;
- Suvirinimo metu, siauresnės geometrijos jungtys gali išvengti karštųjų plyšių kristalizuojantis metalui, veikiant tempimo įtempiams.



3.1 pav. Bėgių, suvirintų kontaktiniu aplydomuoju būdu, sulydymo zonos geometrija (mm). TPZ – terminio poveikio zona

3.5. Termiškai suminkštintos zonos kiečio matavimo rezultatai

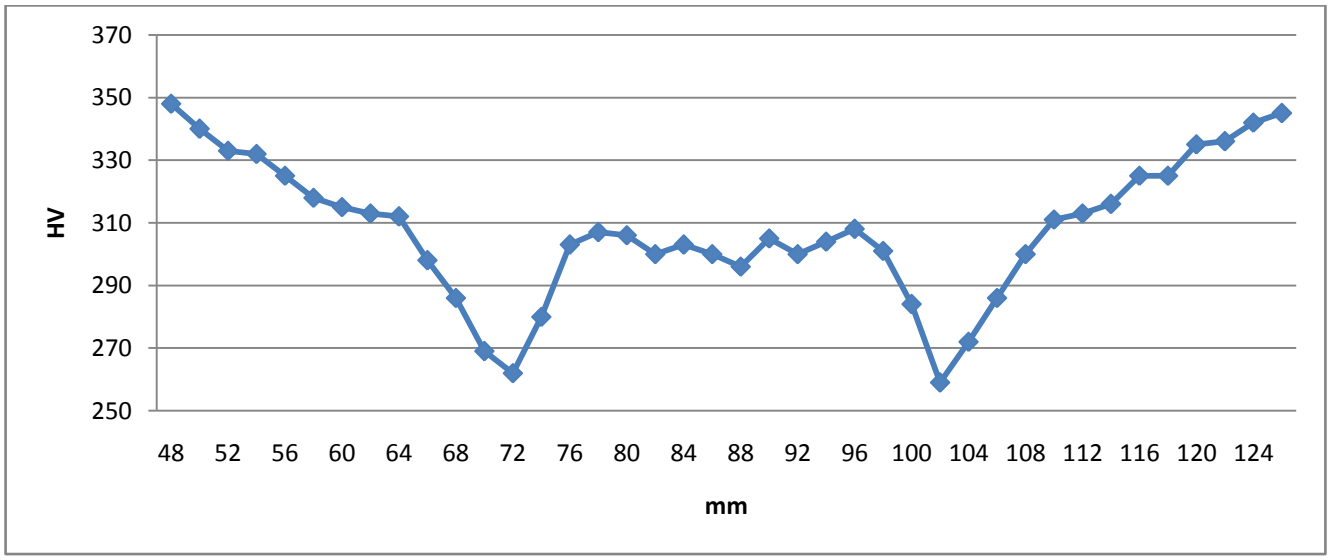


3.2 pav. R65 tipo bėgio termiškai suminkštintos zonos kiečio matavimo schema: 1, 2, 3,..., 40 – kiečio matavimo taškai; TPZ – terminio poveikio zona

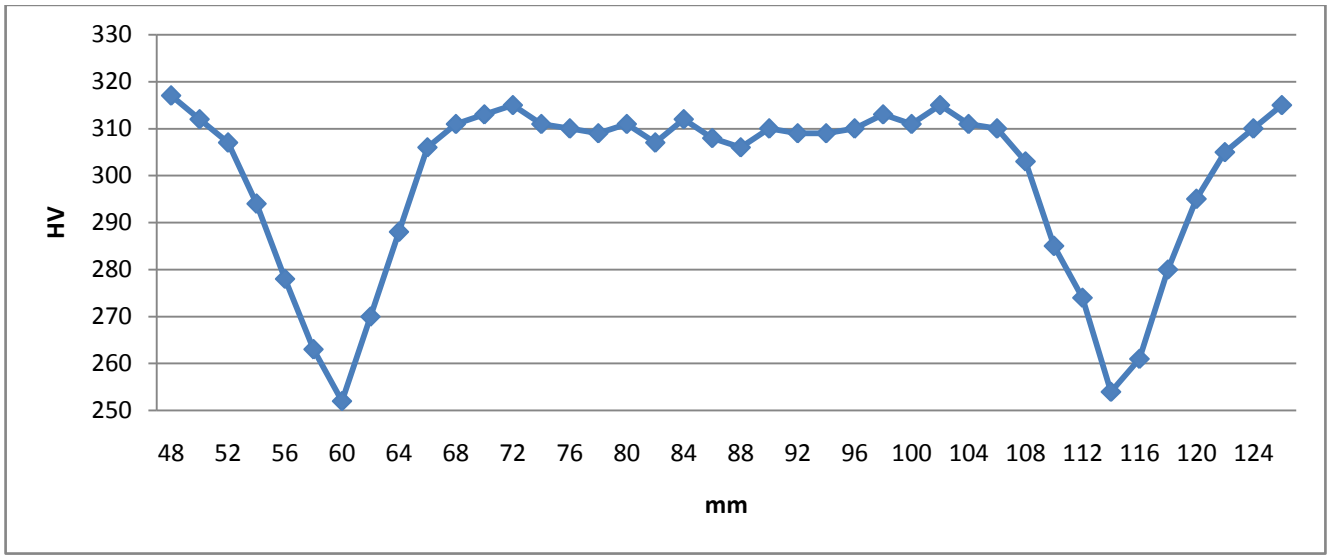
R65 markės bėgio termiškai suminkštintos zonos Vikerso kiečio matavimas buvo aliktas naudojant 30 kg apkrovą. Įspaudai įspausti linijoje, easnčioje nuo 3 mm iki 5 mm žemiau bėgio važiuojamojo

paviršiaus išilginėje bėgio ašyje. Matavimai buvo atlikti kas 2 mm žingsniu. Tyrimo atlikimo schema parodyta 3.2 paveiksle.

Didžiausia termiškai suminkštintos zonos kiečio vertė gauta bėgio galvutės pagrindiniame metale (3.3 pav.), kuri yra 348 HV, tuo tarpu pade – 317 HV. Mažiausia kiečio vertė gauta pado terminio poveikio zonoje (3.4 pav.), kuri yra 252 HV, o galvutėje – 259 HV.

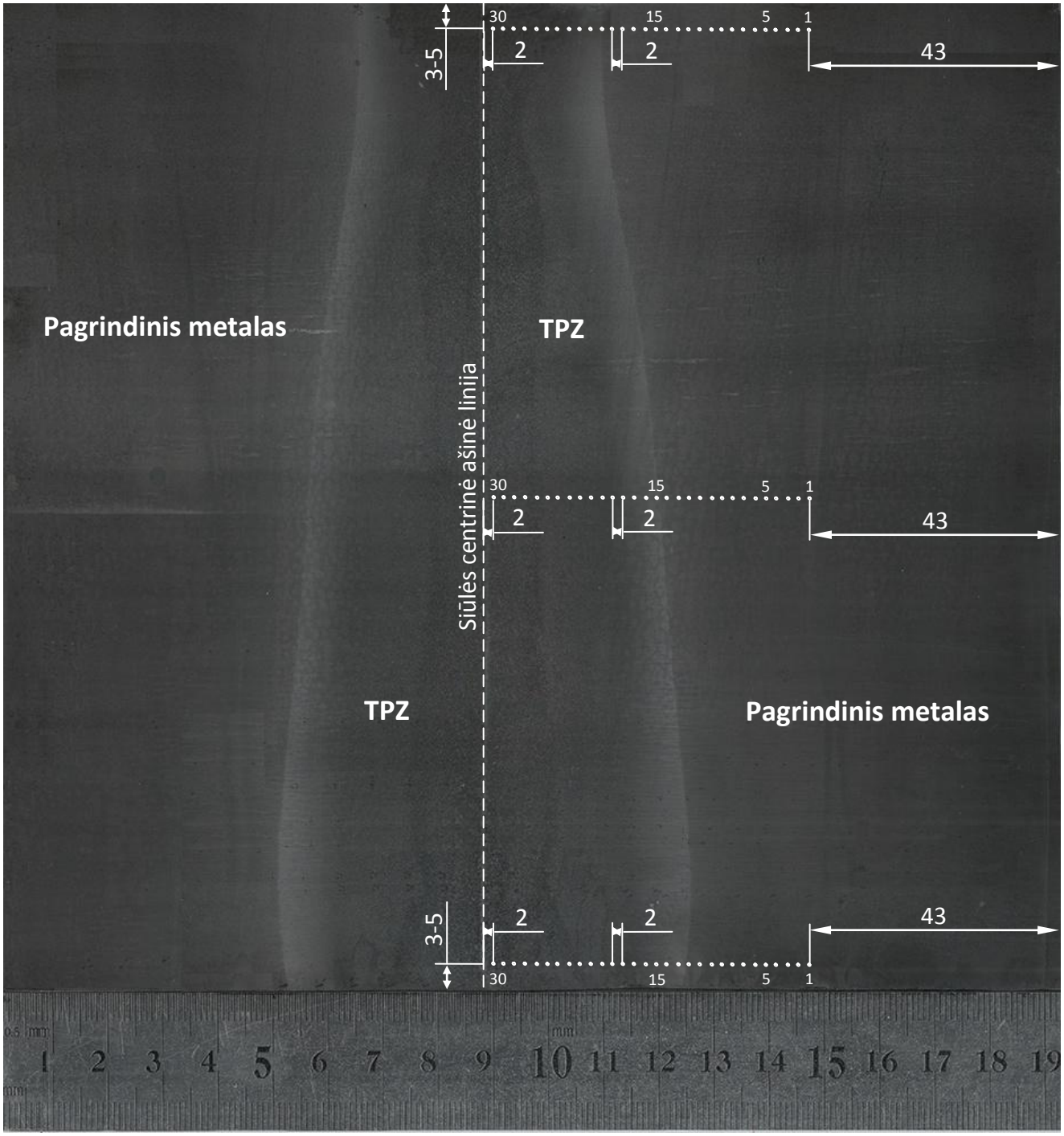


3.3 pav. Bėgio galvutės kiečio matavimų grafikas



3.4 pav. Bėgio pado kiečio matavimų grafikas

3.6. Mikrokietumo matavimo rezultatai

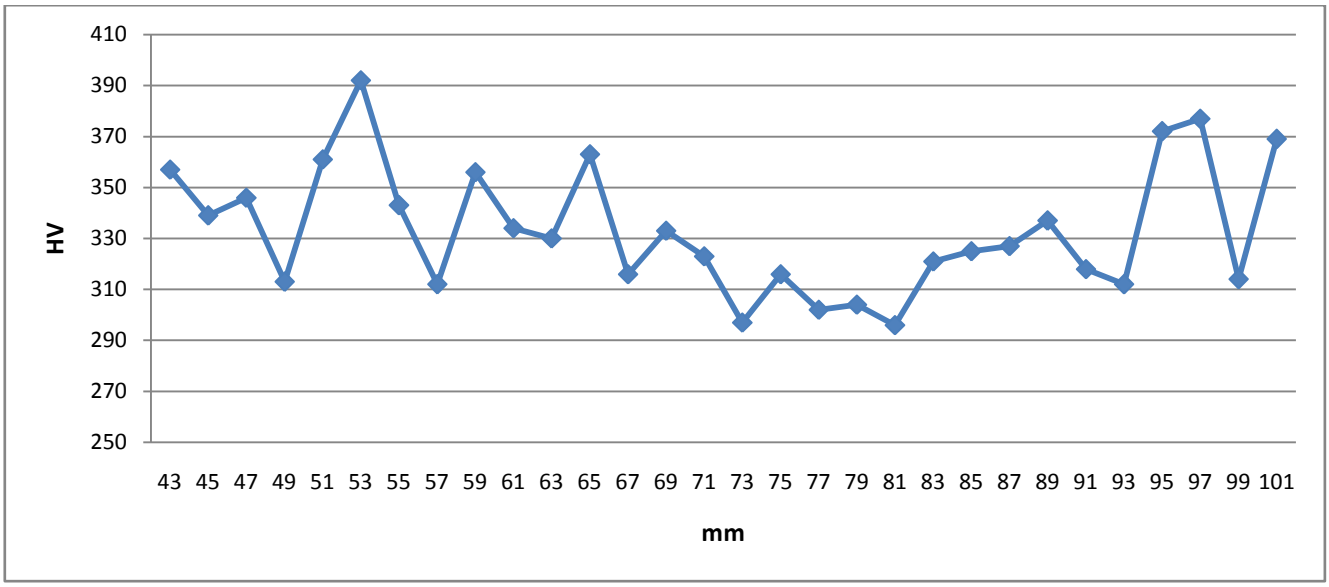


3.5 pav. R65 tipo bėgio mikrokietumo matavimo schema: 1, 2, 3,..., 30 – mikrokietumo matavimo taškai; TPZ – terminio poveikio zona

R65 tipo bėgio mikrokietumo matavimai Vikerso metodu buvo atlikti naudojant 200 g apkrovą. Įspaudai įspausti linijoje, easnčioje nuo 3 mm iki 5 mm žemiau bėgio važiuojamojo paviršiaus

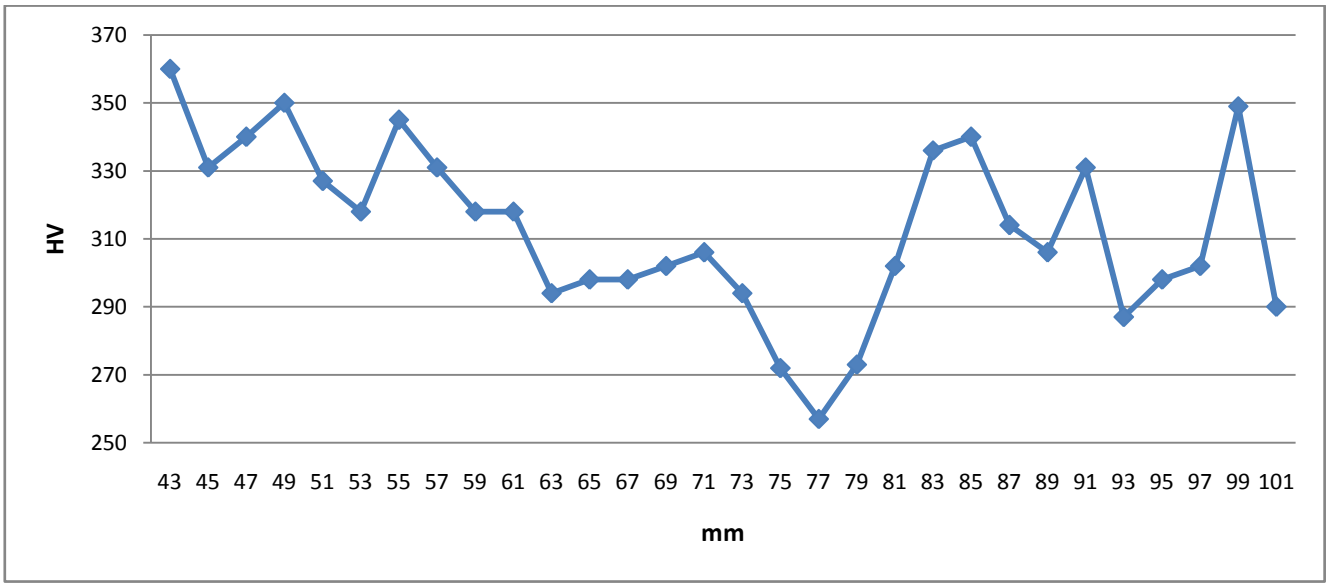
išilginėje bėgio ašyje. Matavimai buvo atlikti kas 2 mm žingsniu. Tyrimo atlikimo schema parodyta 3.5 paveiksle.

Didžiausia bėgio galvutės mikrokietumo vertė gauta pagrindiniame metale (3.6 pav.), kuri yra 392 HV (40 HRC), o mažiausia – terminio poveikio zonoje, kuri lygi 296 HV (29,2 HRC).



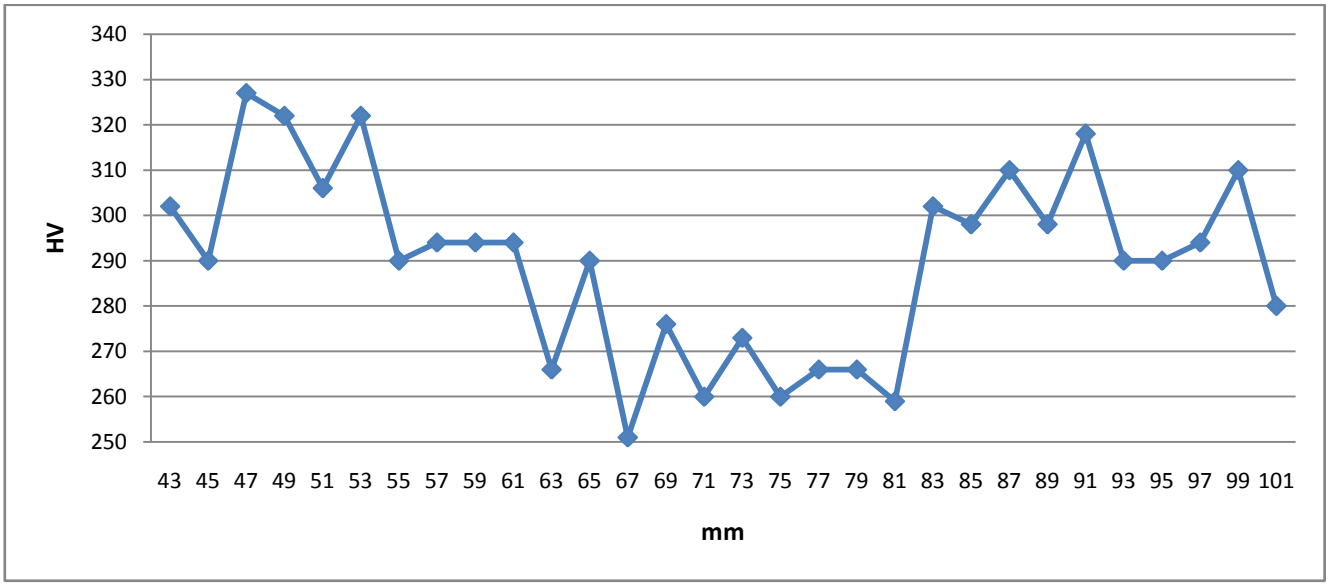
3.6 pav. Bėgio galvutės mikrokietumo matavimų grafikas

Didžiausias bėgio kakliuko mikrokietumas gautas pagrindiniame metale (3.7 pav.), kuris yra 360 HV (36,6 HRC), o mažiausias – terminio poveikio zonoje, kuris lygus 257 HV (23,5 HRC).



3.7 pav. Bėgio kakliuko mikrokietumo matavimų grafikas

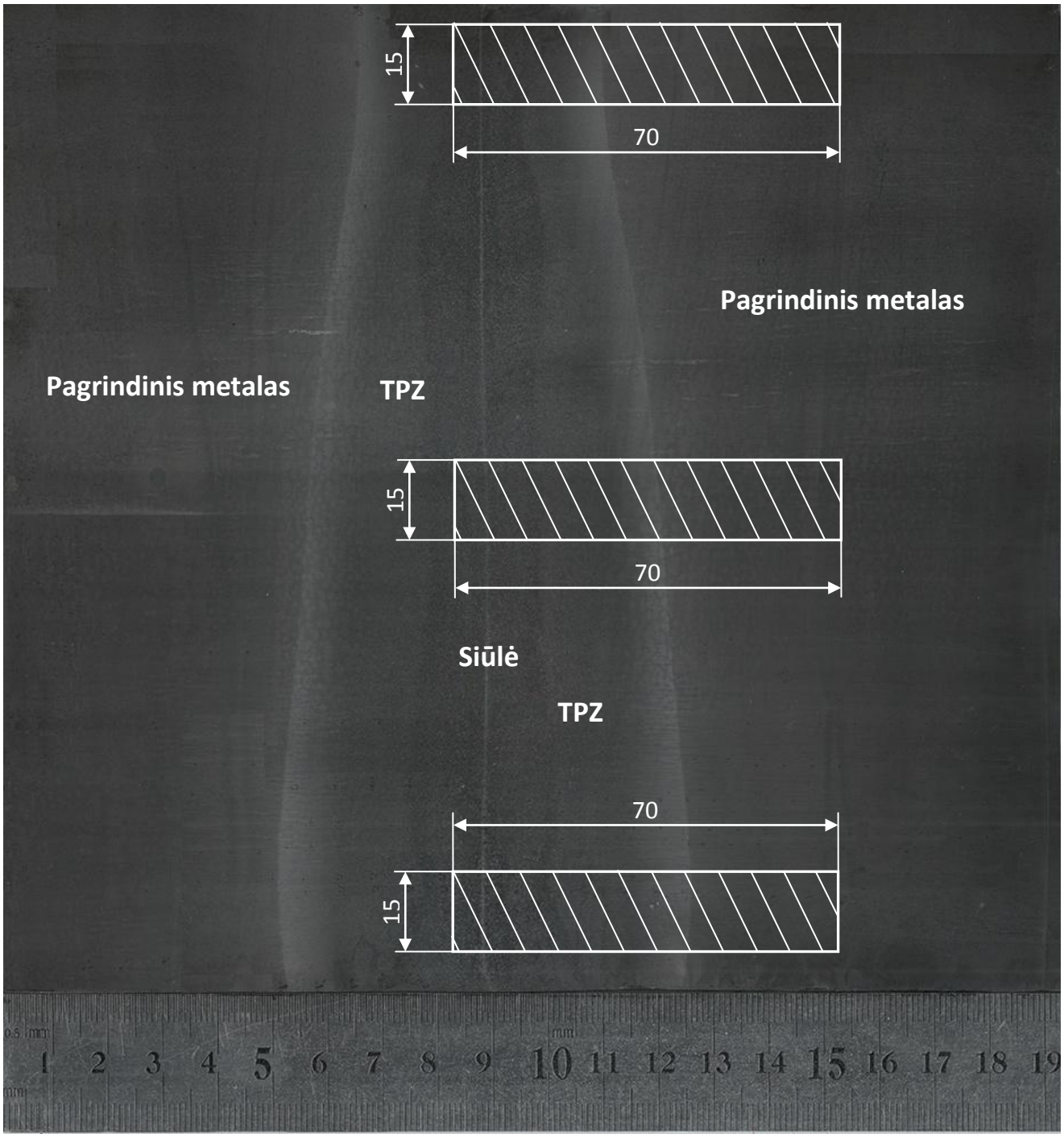
Didžiausias bėgio pado mikrokietumo dydis gautas pagrindiniame metale (3.8 pav.), kuris yra 327 HV (33 HRC), o mažiausias – terminio poveikio zonoje, kuris lygus 251 HV (22,5 HRC).



3.8 pav. Bėgio pado mikrokietumo matavimų grafikas

3.7. Mikroskopinio jungties matomosios terminio poveikio ir sulydymo zonų tyrimo rezultatai

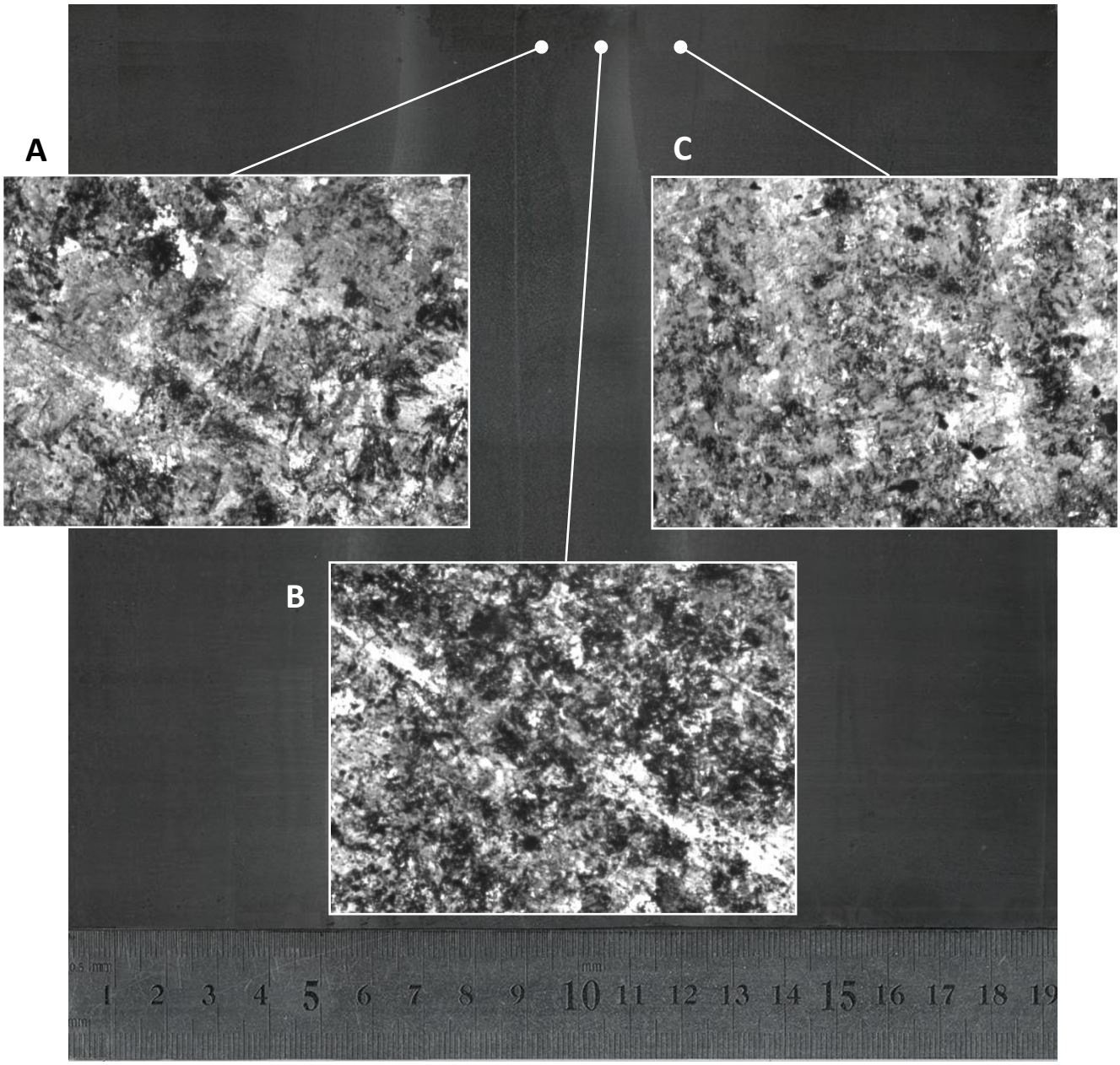
Šiuo tyrimu, mikrošlifais, kurie buvo išpjauti iš suvirintų bėgių galvutės, kakliuko ir pado (3.9 pav.), buvo nustatyta bėgių siūlės metalo struktūra, grūdelių dydis, prie siūlės esančios zonos struktūra, t.y. terminio poveikio srities struktūra (TPZ) ir pagrindinio metalo struktūra.



3.9 pav. Mikrošlifų išpjovimo vietos

Suvirinimo siūlė turi lietojo metalo struktūrą, kuri susideda iš kristalizacijos metu išaugusių stulpelio pavidalo kristalų, nes čia yra didžiausia temperatūra (virš 1100 °C). Dažnai pirminių kristalitų kontūrai sutampa su antrinių kristalitų kontūrais. Tokios struktūros mechaninės savybės yra prastesnės. Mažas metalo plastiškumas yra dėl didelio grūdelio dydžio, jo formos, orientacijos, taip pat dėl lengvai lydomų jungčių, ardančių grūdelių ryšį, išsiskyrimo grūdeliuose (3.10–3.12 pav., A).

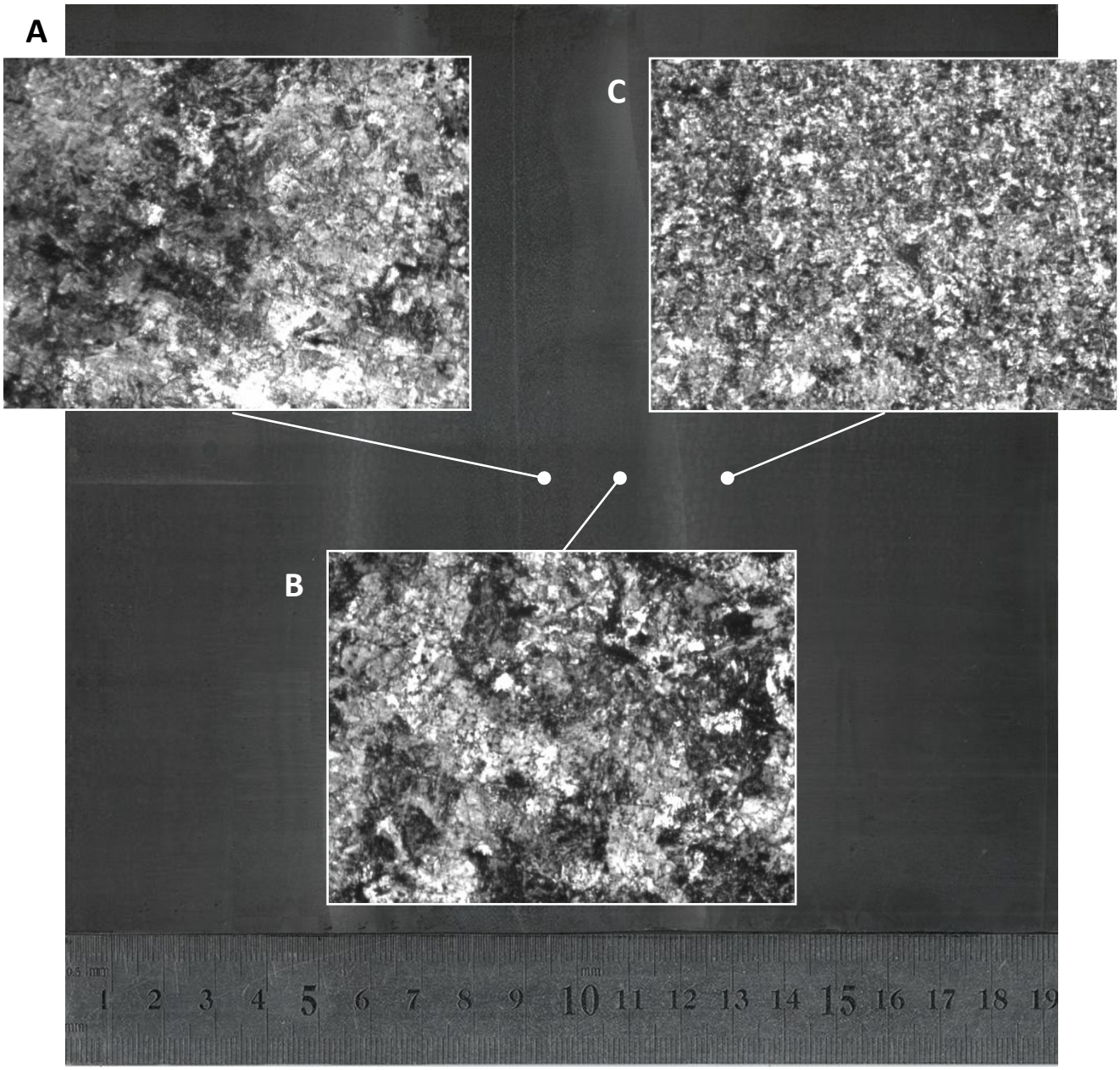
Auštant suvirinimo jungčiai kinta ne tik virintinės siūlės metalo struktūra, bet ir prie siūlės esančio



3.10 pav. R65 tipo bėgių, suvirintų kantaktiniu aplydomuoju būdu, galvutės mikrostruktūros, padidinta 100 kartų: A – siūlės; B – terminio poveikio zonos (TPZ); C – pagrindinio metalo

pagrindinio metalo struktūra. Virintinės siūlės ypatybė ta, kad joje susidaro struktūrų kompleksas, susidedantis iš dviejų lydymosi metu susimaišiusių pagrindinių bėgių metalų.

Mechaninės terminio poveikio zonos savybės nevienalytės (3.10–3.12 pav., B). Normalizacijos sritis turi geresnes mechanines savybes, viršijančias tokias pat pagrindinio metalo savybes, perkaitimo sritis turi prastesnes mechanines savybes, nes metalas įkaista iki soliduso temperatūros ir pasidaro stambiagrūdės struktūros ir gali tapti defektų atsiradimo ir jų plitimo vieta. Įtrūkiai dažnai atsiranda ne

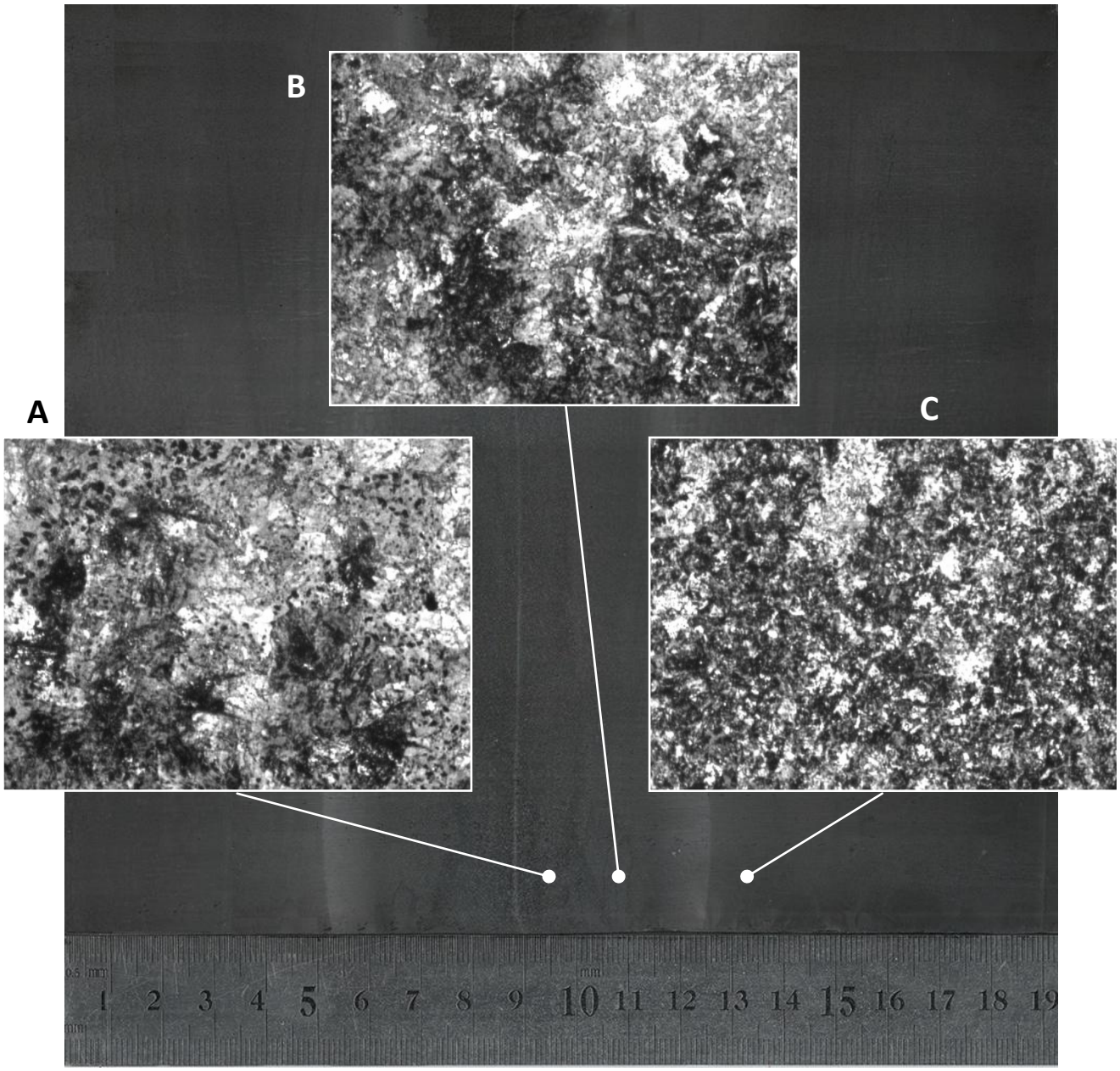


3.11 pav. Bėgių, suvirintų kantaktiniu aplydomuoju būdu, kakliuko mikrostruktūros, padidinta 100 kartų: A – siūlės; B – terminio poveikio zonos (TPZ); C – pagrindinio metalo

pačios siūlės metalo struktūros vietoje, bet pagrindinio metalo prie siūlės esančioje zonoje (perkaitimo srityje).

Nevisiško užsigrūdinimo srities struktūroje suvirinimo metu metalas įkaista iki žemesnės kaip Ac_3 temperatūros. Žemutinė srities riba – taško Ac_1 temperatūra.

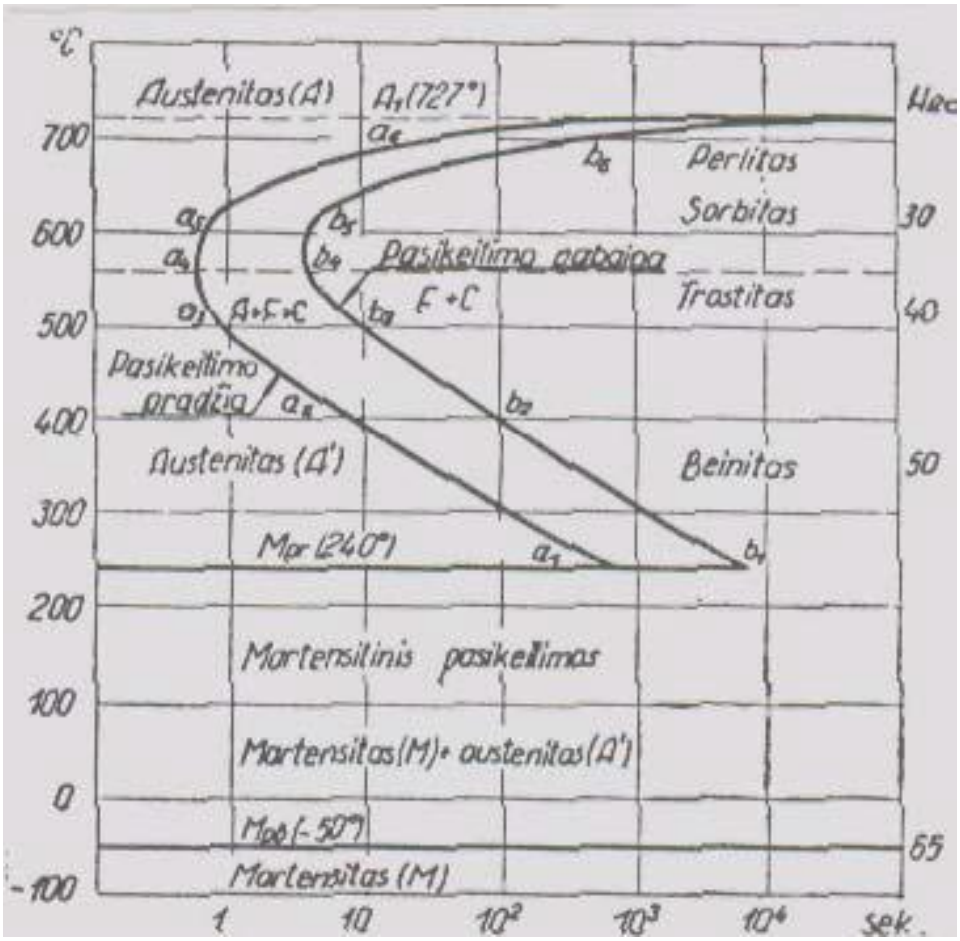
Plastiškai deformuoto metalo rekristalizacijos srities struktūra nesiskiria nuo pagrindinio metalo struktūros (3.10–3.12 pav., C). Šios srities metalas įkaista nuo 450 °C iki Ac_1 temperatūros.



3.12 pav. R65 markės bėgių, suvirintų kantaktiniu aplydomuoju būdu, pado mikrostruktūros, padidinta 100 kartų: A – siūlės; B – terminio poveikio zonos (TPZ); C – pagrindinio metalo

3.13 paveiksle sužymėtos skilimo procese susidarančios struktūros ir jų kietumas.

Įkaitintas eutektoidinis plienas (0,8% C) iki austenitinės sandaros ir lėtai (apytikriai l °C/min) aušinamas įgyja perlitinę sandarą (15–20 HRC). Jeigu aušinimo greitis lygus l °C/s, tai susidaro sorbitas, tokios struktūros kietumas – apie 30 HRC. Kai aušinimo greitis 50 °C/s tuomet susidaro trostitas, kietumas – apie 40 HRC. Kai aušinimo greitis kritinis, t.y. apie 150 °C/s (neliečiama austenitinio skilimo pradžios linija), susidaro tik martensitas.



3.13 pav. Peraušinto austenito izoterminio skilimo diagrama

Įvairių struktūrų nustatymas yra sudėtingas procasas, dažnai jų atpažinimui naudojami katalogai, tačiau nevisada pavyksta nustatyti, nes sunku gauti analogiškų struktūrų nuotraukas. Struktūrų identifikavimui palengvinti yra matuojami jų mikrokietumai (HRC). Gautų struktūrų mikrokietumai atidedami peraušinto austenito izoterminio skilimo diagramose (3.13 pav.).

3.1 lentelėje nurodyti gautų struktūrų mikrokietumai. Didžiausias mikrokietumas pastebimas bėgio galvutėje – apie 34 HRC, šioje srityje dažniausiai matoma trostitinė plieno struktūra, tada kakliuke –

apie 31 HRC, galima pamatyti tiek sorbitinės, tiek trostinės struktūros, o mažiausias mikrokietumas – pade – apie 28 HRC, čia daugiausiai vyrauja sorbitinė plieno struktūra.

3.1 lentelė. Kontaktinės aplydomosios jungties struktūros ir jų mikrokietumai

	Siūlė	**Terminio poveikio zona (TPZ)**	**Pagrindinis metalas**
Galvutė	Trostitinė str., 34 HRC	Sorbitinė str., 32 HRC	Trostitinė str., 35 HRC
Kakliukas	Sorbitinė str., 32 HRC	Sorbitinė str., 28 HRC	Trostitinė str., 34 HRC
Padas	Sorbitinė str., 30 HRC	Sorbitinė str., 25 HRC	Sorbitinė str., 29 HRC

3.8. Smūginio tąsumo bandymo rezultatai

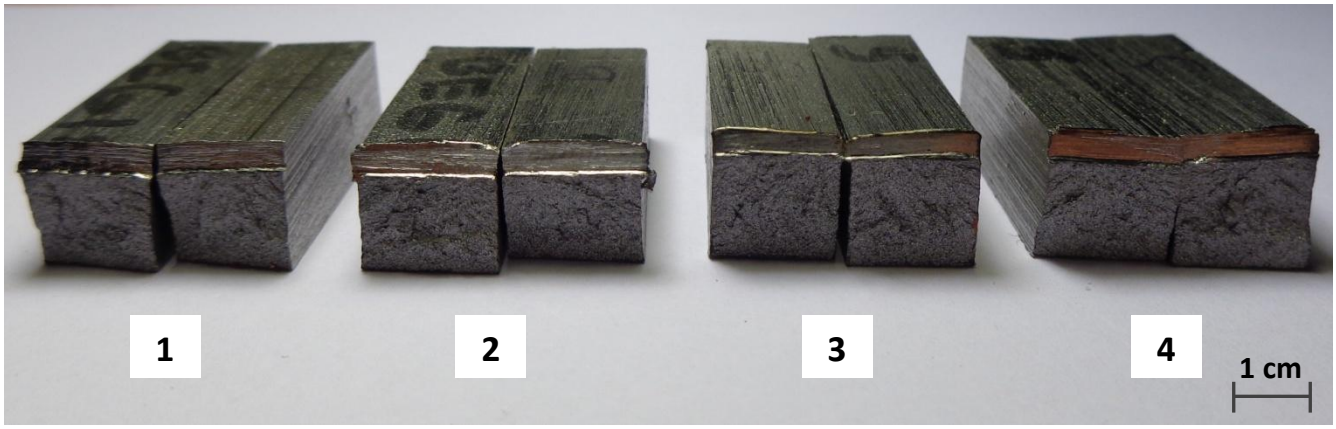
Tyrimas parodė, kad bėgio plienas bei siūlės metalas yra labai trapūs (3.2 lent.). Smūginis tąsumas bėgio galvutėje ir pade beveik toks pat, t. y. 12–14 J/cm^2.

Visi angliniai plienai viršija 0,5 % C kiekį metale. Jie daug stipresni už įprastus konstrukcinius plienus, tačiau pasižymi ir dideliu trapumu. Trapumas – tai medžiagos savybė suirti be didesnių plastinių deformacijų. Trapus suirimas yra pavojingas, nes konstrukcijos griūva staiga, be matomų deformacijų. Lūžio paviršius – blizgantis, kristalinis, eina per grūdelių ribas, kur gali susikaupti nemetalinių intarpų. Trapius lūžius, sulaužius bandinukus, galima pamatyti 3.14 paveiksle. Plieno trapumas didėja: mažėjant temperatūrai, esant įtempimų koncentracijai, veikiant daugkartinėms apkrovoms, pasireiškiant senėjimo reiškiniams. Plieno trapumui daro įtaką jo cheminė sudėtis ir gamybos technologija.

3.2 lentelė. Smūginio tąsumo rezultatai

Bandymo temperatūra, °C	**Bandinio žymuo**	**Bandynių matmenys**			**Mechaniniai rodikliai**			**Lūžimo išvaizda (tr. pl., %)**	**Pastabos**
		h	***b***	***S***	E_2	A_v	a_k		
		mm	**mm**	**cm^2**	**J**	**J**	**J/cm^2**		
+20	1	9,6	10	0,96	293	13	14	100	Galvutės pagr. met.
	2	9,4	10	0,94	294	12	13	100	Pado pagr. metalas
	3	9,6	9,7	0,93	294	12	13	100	Galvutės siūlės met.
	4	9,7	9,7	0,94	295	11	12	100	Pado siūlės metalas

Pastaba: pradinė švytuoklės energija: 306



3.14 pav. Smūginio tąsumo bandinukai: 1 – galvutės pagrindinio metalo; 2 – pado pagrindinio metalo; 3 – galvutės siūlės metalo; 4 – pado siūlės metalo

3.9. Cheminės analizės rezultatai

Cheminiai elementai turi didelę įtaką metalo mechaninėms savybėms, tokioms kaip stiprumas, kietumas, plastiškumas, tąsumas, atsparumas kaitrai, korozijai, suvirinamumas.

Suvirinamose bėgių metaluose reikia kontroliuoti sieros ir fosforo kiekį. Šie cheminiai elementai blogina metalo kokybę, t. y. tiek aukštose, tiek žemose temperatūrose plienas darosi trapus, mažina korozinį atsparumą, tempimo stiprumą, bei suvirinamumą. Labai svarbu, kad šie elementai neviršitų 0,04 % plieno masės.

Anglis didiną bėgių metalo stiprumą, tačiau didina ir jo trapumą. Anglis mažina atsparumą korozijai. Mažas anglies kiekis plieno suvirinamumo neblogina, tačiau jeigu jos daugiau kaip 0,22 %, laikoma, kad suvirinamumas blogas.

Titano ir niobio gana daug dedama į plieną, kad pagerėtų jo antikorozinės savybės. Titano suvirinamumas geras. Niobis gerina austenitinio plieno atsparumą, tačiau blogina suvirinamumą, nes virinant gali atsirasti karštųjų įtrūkių.

Vanadis didina bėgių metalų tąsumą ir plastiškumą, gerina jų struktūrą ir suvirinamumą. Tačiau didelis vanadžio kiekis pliene lengvai užgrūdina, tada sunkiau suvirinti, nes jis aktyviai oksiduojasi ir išdega.

Molibdenas didina plieno stiprumą ir kietumą, padidina atsparumą kaitrai ir bėgių konstrukcijos patvarumą, kai ypač esant smūginėms apkrovoms ir aukštai temperatūrai. Tačiau tokius metalus sunkiau suvirinti, nes molibdenas aktyviai oksiduojasi ir išdega.

Mangano kiekis angliniuose plienuose būna 0,3–0,8 %, legiruotuose – 1–6 %. Jis didina užgrūdinamumą, stiprumą ir nepablogina suvirinamumo. Kai pliene mangano yra 1,8–2,5 %, suvirinamumas pablogėja, nes gali atsirasti įtrūkių.

Silicis didina takumo ribą, kai jo daugiau, mažina plieno tąsumą, atsparumą šalčiui. Jis neturi įtakos bėgių plienų suvirinamumui, kai jo yra 0,2–0,3 %. Kai silicio yra 0,4–0,6 %, padidėja metalo stangrumas. Jeigu jo yra 0,8–1,5 % žymiai pablogėja plieno suvirinamumas.

3.3 lentelėje nurodyta R65 tipo bėgių kantaktinės aplydomosios jungties cheminė sudėtis. Iš gautų rezultatų matyti, kad bėgių plienas yra anglinis, nes viršija 0,5 % ribą, t. y. realus anglies kiekis bėgių metale – 0,77 %. Pastebimas patikimas silicio (0,37 %) ir mangano (0,92 %) kiekis. Šių elementų kiekiai neturėjo didelės įtakos bėgių plienų suvirinamumui, bet padidino jų stiprumą ir takumo ribą. Sieros ir fosforo kiekiai plieno masėje neviršija nustatytų ribų, atitinkamai – 0,002 % ir 0,003 %, tad suvirintų bėgių plienas išlaiko patenkinamą korozinį atsparumą, tempimo stiprumą bei suvirinamumą. Nustatytas vanadžio kiekis metale – 0,03 %, kuris yra pastovus įvairiose bėgio vietose. Chromo ir Nikelio kiekiai pliene pasiskirsto atitinkamai – 0,02–0,03 % ir 0,03–0,04 %.

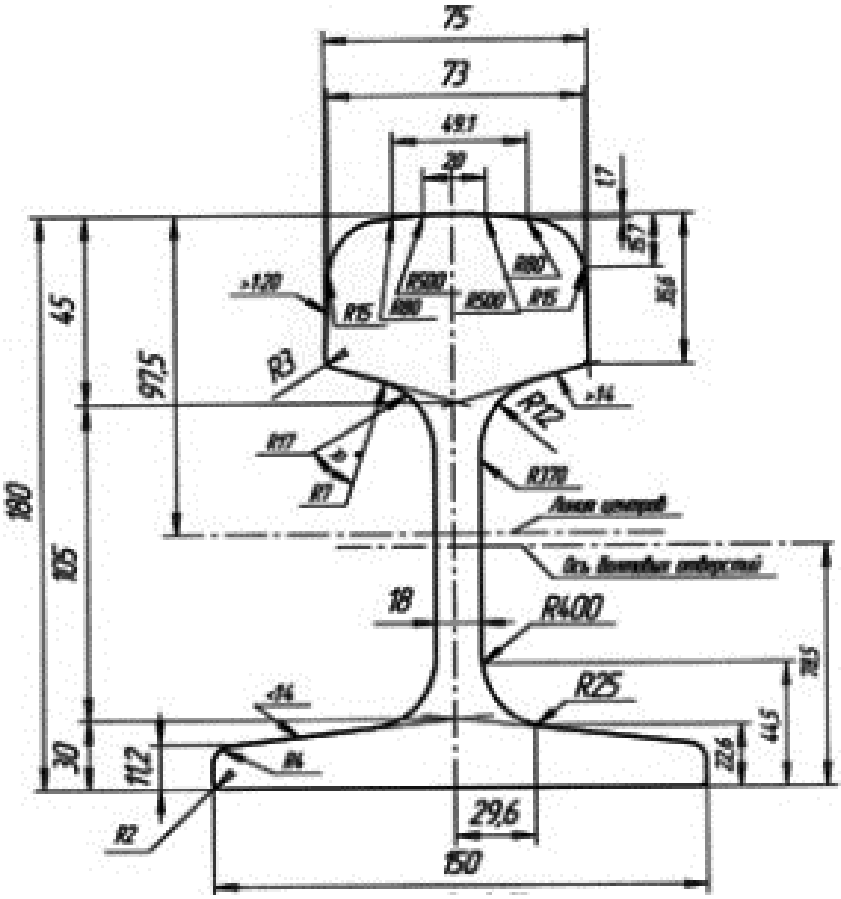
3.3 lentelė. Kantaktinės aplydomosios jungties cheminė sudėtis

R65 markės bėgis	**% elemento masėje**														
	C	**Si**	**Mn**	**P**	**S**	**Cr**	**Mo**	**Ni**	**Al**	**Co**	**Cu**	**Nb**	**Ti**	**V**	**W**
Galvutės siūlė	0,71	0,39	0,90	< 0,003	< 0,002	0,02	< 0,003	0,04	< 0,001	0,03	0,003	< 0,002	< 0,001	0,03	< 0,02
Galvutė terminio poveikio zona	0,74	0,40	0,91	< 0,004	< 0,001	0,03	< 0,003	0,03	< 0,002	0,04	0,003	< 0,004	< 0,001	0,03	< 0,04
Pado siūlė	0,77	0,34	0,93	< 0,002	< 0,002	0,03	< 0,003	0,04	< 0,001	0,03	0,003	< 0,002	< 0,001	0,04	< 0,02
Pado terminio poveikio zona	0,74	0,34	0,95	< 0,003	< 0,001	0,02	< 0,003	0,04	< 0,001	0,03	0,003	< 0,001	< 0,001	0,03	< 0,04
Pagrindinis metalas	0,77	0,40	0,93	< 0,003	< 0,002	0,02	< 0,003	0,03	< 0,001	0,03	0,003	< 0,002	< 0,001	0,03	< 0,02

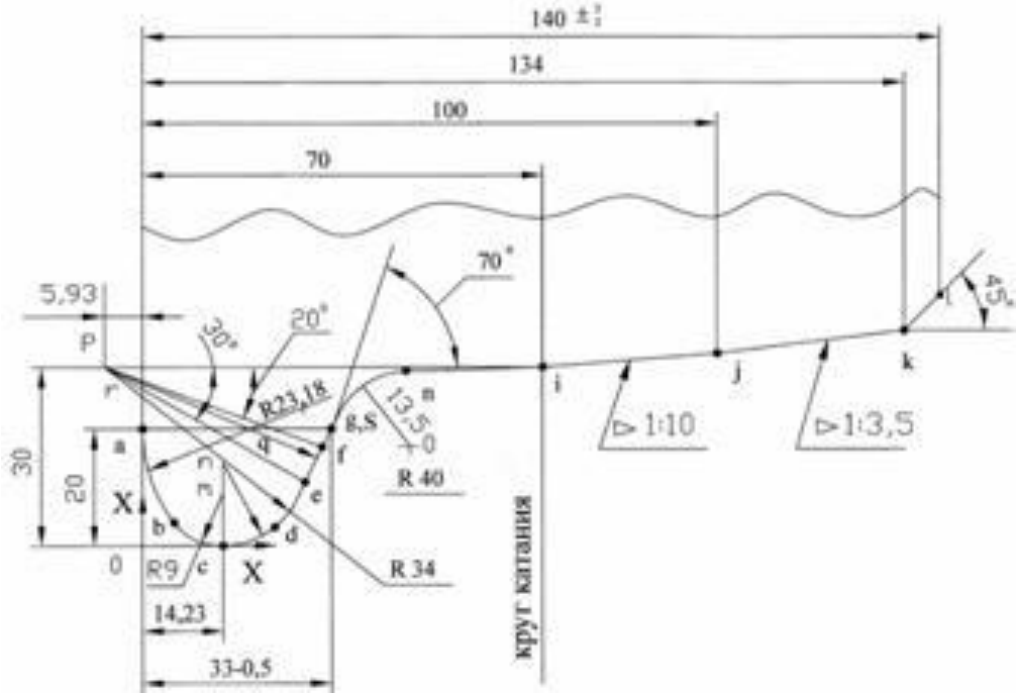
3.10. Aširačio bandažo ir bėgio sąveikos tyrimas baigtinių elementų metodu (BEM)

„ANSYS" laikoma viena iš svarbiausių programų, turinti plačias geometrinių ir skaičiuojamųjų modelių sudarymo, skaičiavimo ir rezultatų vizualizacijos galimybes.

Lokomotyvo aširačio bandažas ir bėgis kuriami pagal 3.15 ir 3.16 paveiksluose pavaizduotas aširačio bandažo ir R65 tipo bėgio profilių geometrijas.



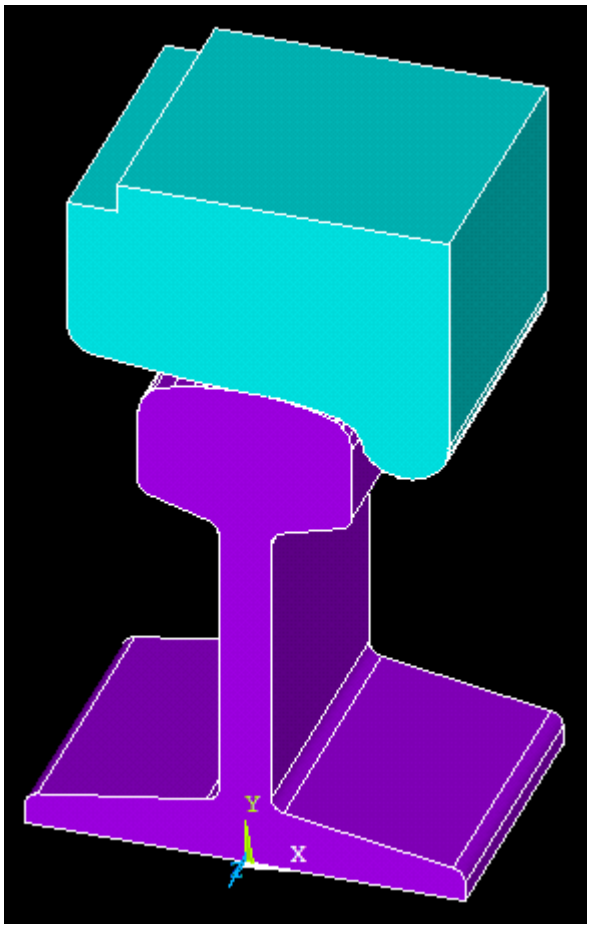
3.15 pav. R65 tipo bėgio profilio geometrija



3.16 pav. Aširačio bandažo, kontaktuojančiosios srities su bėgiu, paviršiaus geometrija

3.10.1. Tiriamojo objekto konstrukcinis sukūrimas

Bendras bandažo ir bėgio modelio kūrimas yra sudėtingas procesas, dėl savųjų kintamų paviršinių kreivumo spindulių. Tikslesnės geometrijos leidžia įvertinti svarbias charakteristikas, galima tiksliau nustatyti aširačio ir bėgio kontaktinius įtempius, poslinkius ir deformacijas. 3.17 paveiksle pavaizduotas bendras aširačio ir bėgio surinkimo erdvinis modelis.



3.17 pav. Bendras aširačio rato bandažo ir bėgio surinkimo erdvinis modelis

3.10.2. Fizikinių dydžių ir parametrų priskirimas

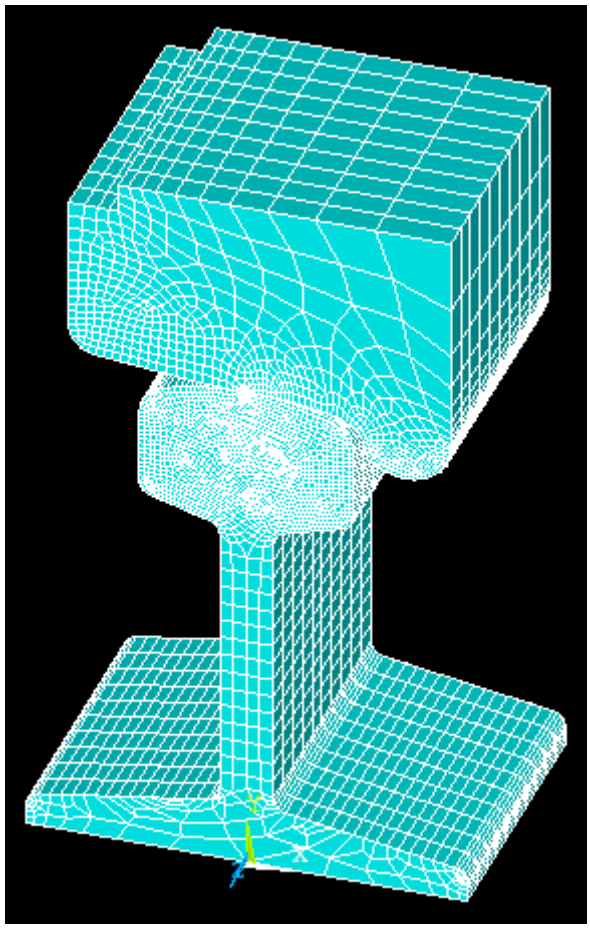
Modeliuojant aširačio bandažo ir bėgio sąveiką „ANSYS" programine įranga remiamasi tokiais fizikiniais dydžiais ir parametrais:

- aširačio ir bėgio tarpusavio trinties koeficient F_{tr} = 0,1;
- aširatis slegia bėgį P = 0,5 MPa jėga;

- plieno Puasono koeficientas $\upsilon = 0{,}3$;
- plieno tamprumo modulis $E = 2{,}1 \cdot 10^9$ Pa.

3.10.3. Konstrukcinio modelio suskaidymas į baigtinius elementus („tinklelio“ sudarymas)

Erdvinio modelio suskaidymas į bagtinius elementus – tai procesas, kuriuo metu tiriamasis objektas dalinamas į daugybę elementų (3.18 pav.). Matematine prasme, šiuose elementuose nagrinėjami nežinomieji, kurie kinta nesudėtingu dėsniu ir diferencialinės lygtys juose pakeičiami į algebrinių lygčių sistemas. Toliau, kai visi elementai sujungiami į vieną sistemą, sprendžiamos lygtys, o jų atsakymai – mus dominantys tiriamojo objekto rezultatai, t. y. įvairios spalvotos poslinkių ir deformacijų izolinijos, erdviniai spalviniai įtempimų laukai ir t.t.

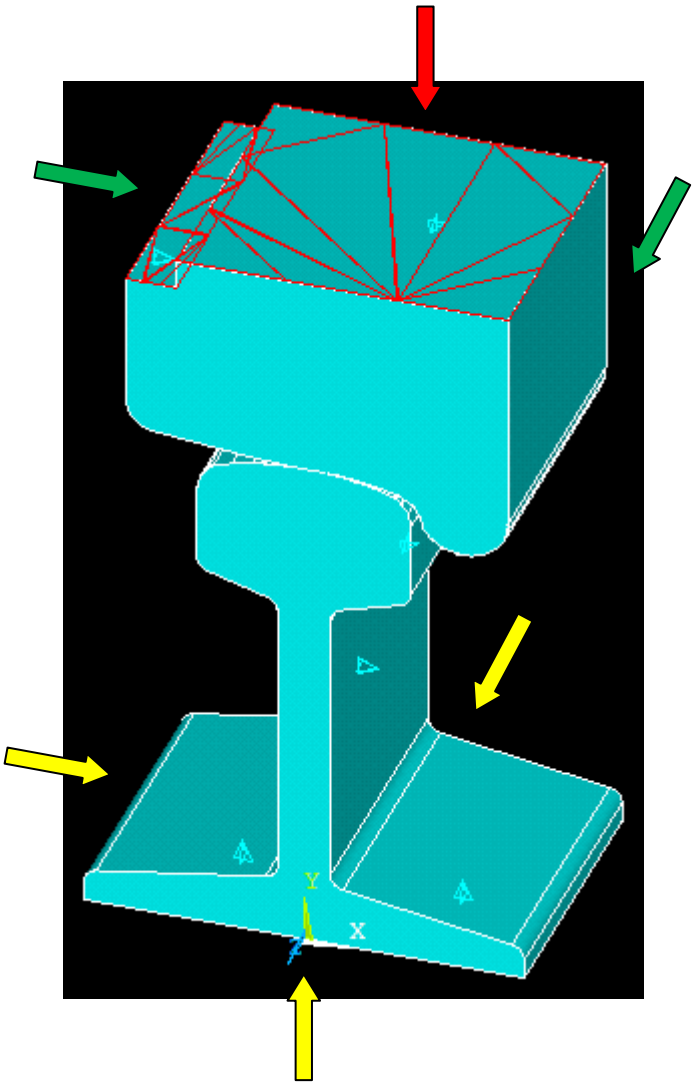


3.18 pav. Tiriamojo objekto suskaidymas į baigtinius elementus

3.10.4. Kietų kūnų įtvirtinimas ir apkrovų priskirimas

Kieti kūnai (aširačio bandažas ir bėgis) nagrinėjami, kaip vienas kito atžvilgiu nejudantys elementai, išskyrus aširačio bandažas, kuris, šiuo atveju, gali jūdėti tik viena kryptimi, dėl savųjų vertikaliųjų apkrovų į bėgio važiuojamąjį paviršių. Ši apkrova, kuri 3.19 paveiksle parodyta raudona rodykle, slegia bėgį 0,5 MPa jėga. Žalios rodyklės (3.19 pav.) nurodo aširačio bandažo įtvirtinimo kryptis xyz plokštumoje. Tiriamasis bėgis yra absoliučiai įtvirtintas, t. y. jis negali judėti x, y arba z ašimis, tai parodo geltonos rodyklės.

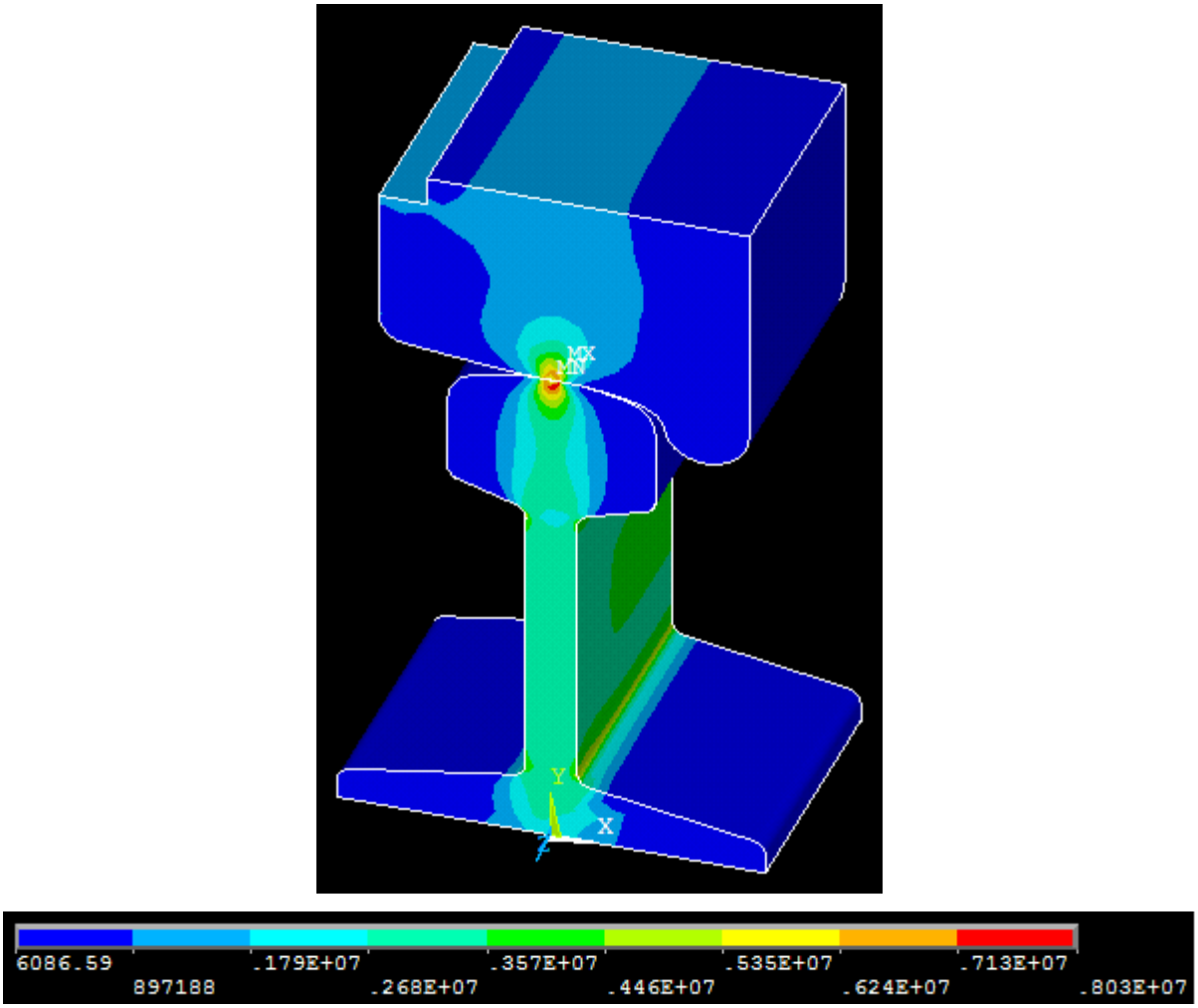
Dėl netinkamo elementų įtvirtinimo, fizikine prasme, kūnai neturės tarpusavio sąveikos ryšio, bus klaidinagai nurodomos deformacijos, poslinkiai, įtempiai bei kiti svarbūs dydžiai.



3.19 pav. Aširačio bandažo ir bėgio įtvirtinimo schema

3.10.5. Rezultatų pateikimas

Pagal pateiktus 3.20 paveiksle vaizdinius ir skaitinius rezultatus matyti, kad didžiausi įtempiai pasiskirsto tarp bėgio galvutės viršutinės dalies ir aširačio bandažo apatinės dalies (kontakto vieta), t. y. 6,24–8,03 MPa. Pastebimos vidutinės įtempių reikšmės bėgio kakliuke, čia jos siekia 2,68–3,57 MPa. Mažiausi įtempiai yra šoniniuose bėgio ir bandažo plotuose, kurių dydis siekia 6086 Pa. Deformacijos poslinkio vertė lygi 0,000474 m.



3.20 pav. Tiriamojo objekto, įtempių pasiskirstymo, vaizdiniai ir skaitiniai rezultatai

IŠVADOS

1. Bėgiai yra pagrindiniai laikantieji viršutinės bėgių kelio konstrukcijos elementai. Pagrindinė bėgių paskirtis – atlaikyti krūvius ir nukreipti geležinkelio transportą. Siekiant užtikrinti saugų traukinių eismą, bėgiai turi būti lygūs, pakankamai šiurkštūs, taip pat klampūs (ne trapūs), atsparūs dilimui, aplinkos korozijai, temperatūros svyravimams, turi pasižymėti patvarumu, technologiškumu ir ilgu tarnavimo laiku.
2. Kontaktinis suduriamasis bėgių suvirinimas turi daug privalumų, palyginti su kitais suvirinimo būdais: aukštas darbo našumas, suvirinami įvairaus skerspjūvio ploto bėgiai, gaunamos aukštos kokybės ir patikimos virintinės jungtys, bėgiai suvirinami mobiliuoju arba stacionariuoju būdu.
3. Apžiūrimosios paviršiaus kontrolės metu, apžiūrėjus suvirintosios jungties rumbelę nebuvo pastebėta jokių 2 mm ar didesnių ilgio įtrūkių, taip pat didesnių kaip 3 mm porų ir nebuvo daugiau, kaip trijų porų, kurių dydis – 2–3 mm. Šlako ir smėlio intarpai neviršijo ribų, Nepastebėta jokių defektų, kurie būtų patekę į bėgio skerspjūvį ar siekę siūlės rumbelės ir bėgio susikirtimo briauną.
4. Ultragarsinės kontrolės tyrimo rezultatai parodė, kad tikrinant įvairias bėgio vidines vietas, neaptikta jokių plyšių, šlakų, porų, intarpų, nesulydymų ir kt.
5. Atlikus važiuojamojo paviršiaus kiečio matavimo procedūrą, Brinelio metodu, buvo gauti tokie rezultatai: bėgio važiuojamojo paviršiaus ant nepaveikto pirminio bėgio taško a (2.4 pav.) kietis lygus 378 HB; siūlės centrinės linijos taško b kietis buvo gautas 359 HB; bėgio važiuojamojo paviršiaus ant nepaveikto pirminio bėgio taško c kietis buvo lygus 370 HB. Šie rezultatai palyginti su važiuojamojo paviršiaus leistinaisiais kiečio bandymų intervalais, tenkina reikalavimus.
6. Bėgio galvutės sulydymo zonos geometrija, suvirinant kontaktiniu būdu, palyginti su termitiniu būdu gautomis sulydymo zonos geometrijomis, pasižymi du kartus siauresne siūlės sritimi (≈ 36 mm – kontaktinio suvirinimo ir ≈ 70 mm – termitinio suvirinimo) ir net daugiau kaip du kartus terminio poveikio sritimi (≈ 43 mm – kontaktinio suvirinimo ir ≈ 112 mm – termitinio suvirinimo). Jungtys, gautos kontaktiniu būdu, yra kokybiškesnės negu termitinės;
7. Didžiausia termiškai suminkštintos zonos kiečio vertė gauta bėgio galvutės pagrindiniame metale, kuri yra 348 HV, tuo tarpu pade – 317 HV. Mažiausia kiečio vertė gauta pado terminio poveikio zonoje, kuri yra 252 HV, o galvutėje – 259 HV.

8. Didžiausia bėgio galvutės mikrokietumo vertė gauta pagrindiniame metale, kuri yra 392 HV (40 HRC), o mažiausia – terminio poveikio zonoje, kuri lygi 296 HV (29,2 HRC). Didžiausia bėgio kakliuko mikrokietumas gautas pagrindiniame metale, kuris yra 360 HV (36,6 HRC), o mažiausias – terminio poveikio zonoje, kuris lygus 257 HV (23,5 HRC). Didžiausias bėgio pado mikrokietumo dydis gautas pagrindiniame metale, kuris yra 327 HV (33 HRC), o mažiausias – terminio poveikio zonoje, kuris lygus 251 HV (22,5 HRC).
9. Mikroskopinio jungties matomosios terminio poveikio ir sulydymo zonų tyrimo rezultatai parodė, kad bėgio galvutėje dažniausiai matoma trostitinė plieno struktūra, kakliuke – tiek sorbitinės, tiek trostinės struktūros, o pade daugiausiai vyrauja sorbitinė plieno struktūra.
10. Smūginio tąsumo tyrimas parodė, kad bėgio plienas bei siūlės metalas yra labai trapūs. Smūginis tąsumas bėgio galvutėje ir pade beveik toks pat, t. y. 12–14 J/cm^2.
11. R65 tipo bėgių kantaktinės aplydomosios jungties cheminė analizė nustatė, kad bėgių plienas yra anglinis, t. y. realus anglies kiekis bėgių metale – 0,77 %. Pastebimas patikimas silicio (0,37 %) ir mangano (0,92 %) kiekis. Sieros ir fosforo kiekiai plieno masėje neviršija nustatytų ribų, atitinkamai – 0,002 % ir 0,003 %. Nustatytas vanadžio kiekis metale – 0,03 %, kuris yra pastovus įvairiose bėgio vietose. Chromo ir Nikelio kiekiai pliene pasiskirsto atitinkamai – 0,02–0,03 % ir 0,03–0,04 %.
12. Aširačio bandažo ir bėgio sąveikos tyrimas baigtinių elementų metodu (BEM) parodė, kad didžiausi įtempiai pasiskirsto tarp bėgio galvutės viršutinės dalies ir aširačio bandažo apatinės dalies (kontakto vieta), t. y. 6,24–8,03 MPa. Mažiausi įtempiai yra šoniniuose bėgio ir bandažo plotuose, kurių dydis siekia 6086 Pa. Deformacijos poslinkio vertė lygi 0,000474 m.

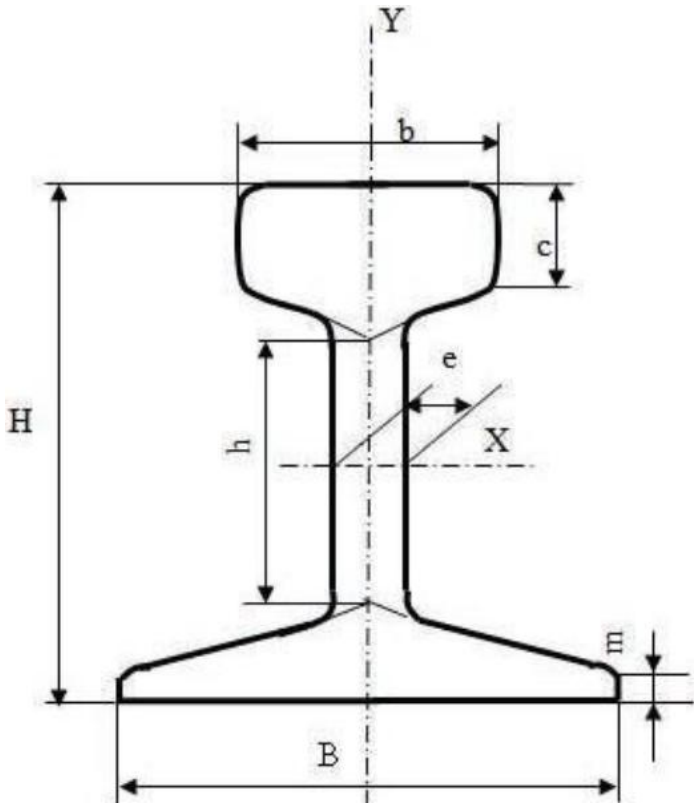
LITERATŪRA

1. Taparauskaitė, I. *Lietuvos geležinkelių raida*. [interaktyvus], [žiūrėta 2013 m. lapkričio 18 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.ziemgala.lt/saugykla/pdf/5_taparauskaite.pdf>.
2. *Geležinkelių infrastruktūros istorija*. [interaktyvus], [žiūrėta 2013 m. lapkričio 18 d.]. Prieiga per internetą: < http://www.litrail.lt>.
3. Naruškevičius, J. *Kontaktinis suvirinimas*: mokomoji knygelė. Vilnius: Mažoji Evelina, 2012. 146 p.
4. Mansouriand, H.; Monshi, A. *Microstructure and residual stress variations in weld zone of flash-butt welded railroads*. [interaktyvus], [žiūrėta 2013 m. gruodžio 2 d.]. Prieiga per internetą: <http://wenku.baidu.com/view/d01bd7bc1a37f111f1855b78>.
5. Farhangi, H.; Mousavizadeh, S. M. *Horizontal Split-Web Fractures of Flash Butt Welded Rails*. [interaktyvus], [žiūrėta 2013 m. gruodžio 16 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCEQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.endil.yildiz.edu.tr%2Fproceedings%2F55.pdf&ei=1G6NU5m6HcXcoATtyYHAAg&usg=AFQjCNFYmk4JHPdpOzqpNzdaKiVm-i9LSw>
6. Zerbst, U.; Madler, K. Hintze, H. *Fracture mechanics in railway applications–anoverview*. *Engineering Fracture Mechanics*. Vol. 72, pp.163–194, 2005. [interaktyvus], [žiūrėta 2013 m. gruodžio 18 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.gruppofrattura.it/ocs/index.php/ICF/ICF11/paper/view/10672/10018>.
7. Kulikauskas, L. *Medžiagotyra. Konstrukcinės medžiagos*. Vilnius: Žara, 1997. 510 p.
8. Naujokaitis, A. *Medžiagų mokslas*: mokomoji knyga. 4oji laida. Vilnius: Technika, 2009. 232 p.
9. Šniuolis, R.; Žvinys, J. *Inžinerinės medžiagos*: mokomoji knyga. Šiauliai, 2004. 256 p.
10. Višniakas, I. *Medžiagotyra II: metodikos nurodymai laboratoriniams darbams atlikti*. Vilnius: Technika, 2008. 96 p.
11. Višniakas, I.; Rudzinskas, V. *Suvirintinių junkčių kokybės kontrolė, valdymas ir optimizavimas*: mokomoji knyga. Vilnius: Technika, 2012. 168 p.
12. *LST EN ISO 13674-1:2011. Geležinkelio taikmenys. Geležinkelio kelias. Bėgiai. 1 dalis. 46 kg/m ir didesnio svorio, plataus pagrindo geležinkelio bėgiai.*
13. *LST EN ISO 17637:2011. Virintinių siūlių neardomoji kontrolė. Apžiūrimoji kontrolė.*
14. *LST EN ISO 17640:2011. Virintinių siūlių neardomoji kontrolė. Suvirintųjų sujungimų ultragarsinė kontrolė.*

15. *LST EN 11666:2011/A1(A2). Neardomoji virintinių siūlių kontrolė. Ultragarsinė suvirintųjų jungčių kontrolė. Priėmimo lygmenys.*
16. *LST EN 23279:2010/A1(A2). Virintinių siūlių neardomoji bandymai. Ultragarsiniai bandymai. Rodmenų siūlėse apibūdinimas.*
17. *LST EN 17640:2011/A1(A2). Neardomoji virintinių siūlių bandymai. Ultragarsinis suvirintųjų sujungimų bandymas.*
18. *EN ISO 6506-1:2006. Metalai. Brinelio kiečio nustatymas. 1 dalis. Bandymo metodas.*
19. *EN ISO 6507-1:2006. Metalai. Vikerso kiečio nustatymas. 1 dalis. Bandymo metodas.*
20. *LST EN ISO 4516:2002. Metalinės ir kitos neorganinės dangos. Vikerso ir Knopo mikrokietumo bandymai.*
21. *LST EN ISO 17639:2013. Metalinės medžiagos. Ardomieji siūlių bandymai. Siūlių makroskopinis ir mikroskopinis tyrimas.*
22. *LST EN ISO 9016:2013. Metalų virintinių siūlių ardomieji bandymai. Smūginio tąsumo bandymai. Bandinio vieta, įpjovos orientacija ir tyrimas*.
23. Stolarski, T.; Nakasone, I.; Yoshimoto, S. *Engineering Analysis with ANSYS Software*. *Wheel and Rail Contact*. [interaktyvus], [žiūrėta 2013 m. birželio 17 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.dltobe.com/ebooks/97880-Engineering-Analysis-with-ANSYS-Software.html>.
24. Bogdevičius, M. *Transporto priemonių dinamika*: mokomoji knyga. Vilnius: Technika, 2012. 205 p.
25. Vaičiūnas, G. *Lokomotyvai ir vagonai 2*: mokomoji knyga. Vilnius: Technika, 2012. 87 p.

PRIEDAI

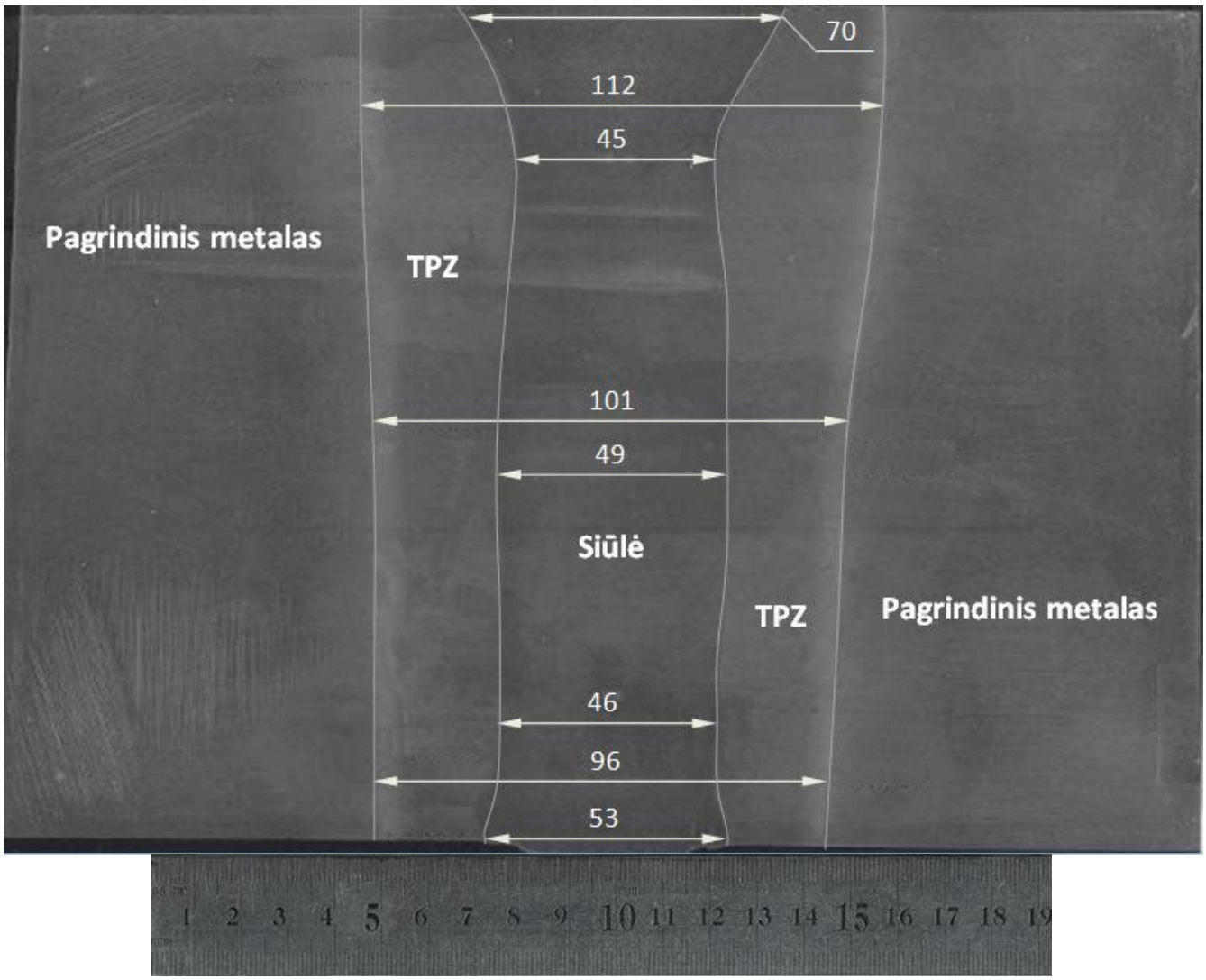
Priedas Nr. 1



Charakteristika	Bėgių tipai			
	R75	R65	UIC60	R50
Bėgio aukštis H, mm	192,0	180,0	172,0	152,0
Galvutės aukštis c,mm	55,3	45,0	51,0	42,0
Kakliuko aukštis h, mm	104	105	83	83
Pado plotis B, mm	150,0	150,0	150,0	132,0
Galvutės plotis b, mm:				
viršutinės	71,8	73,0	72,0	70,0
apatinės	75,0	75,0	74,3	72,0
Kaklelio storis e, mm	20,0	18,0	16,5	16,0
Pado sparno aukštis m,mm	13,5	11,2	11,2	10,5
Galvutės ir kaklelio sujungimo spinduliai, mm	7/17	7/15	7/35	5/12
Kiaurymių skersmuo, mm	36,0	36,0	30,0	34,0
Vieno metro bėgio masė, kg	74,41	64,72	60,34,	51,67

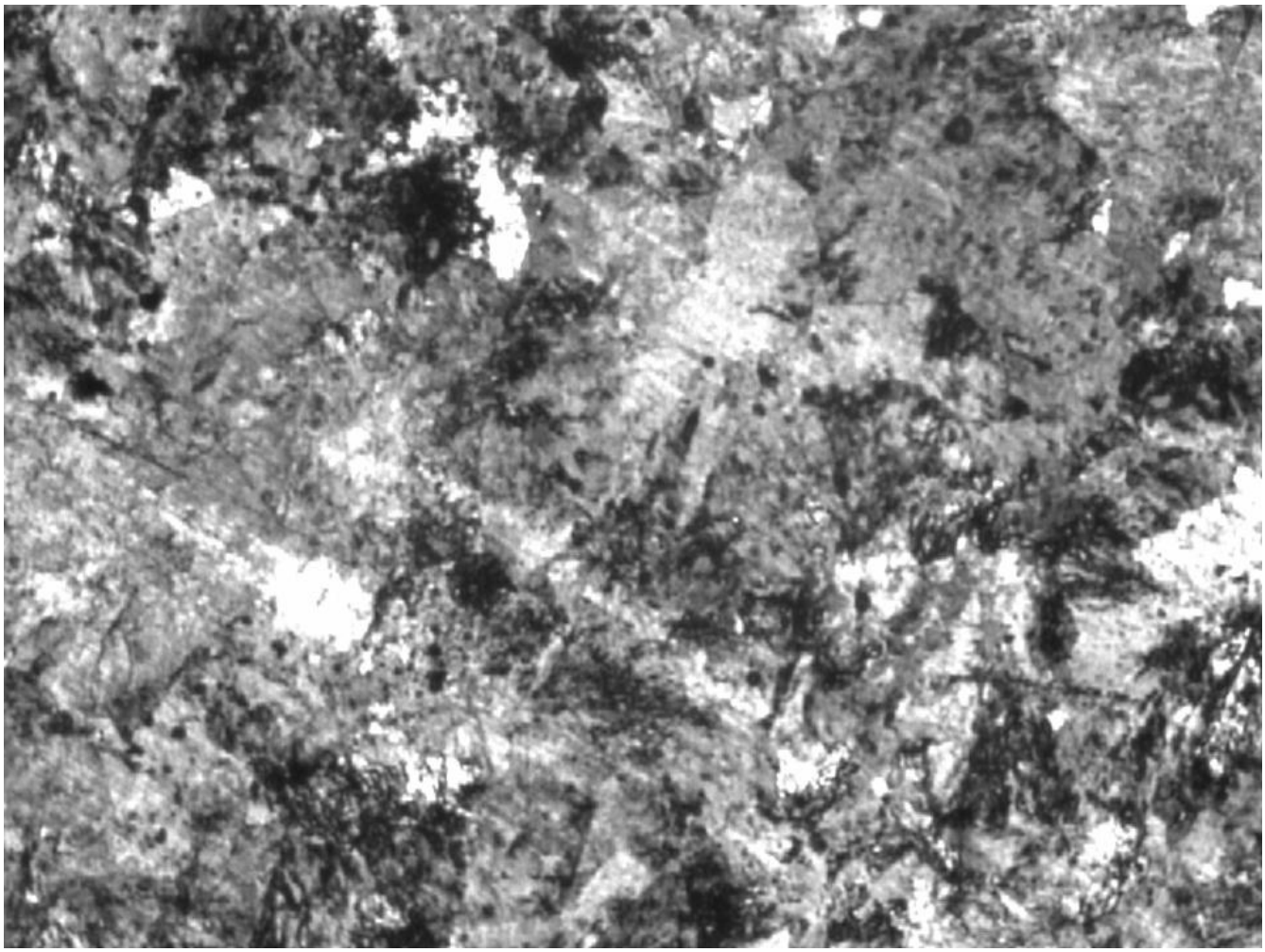
Pagrindiniai bėgio skerspjūvio matmenys

Priedas Nr. 2



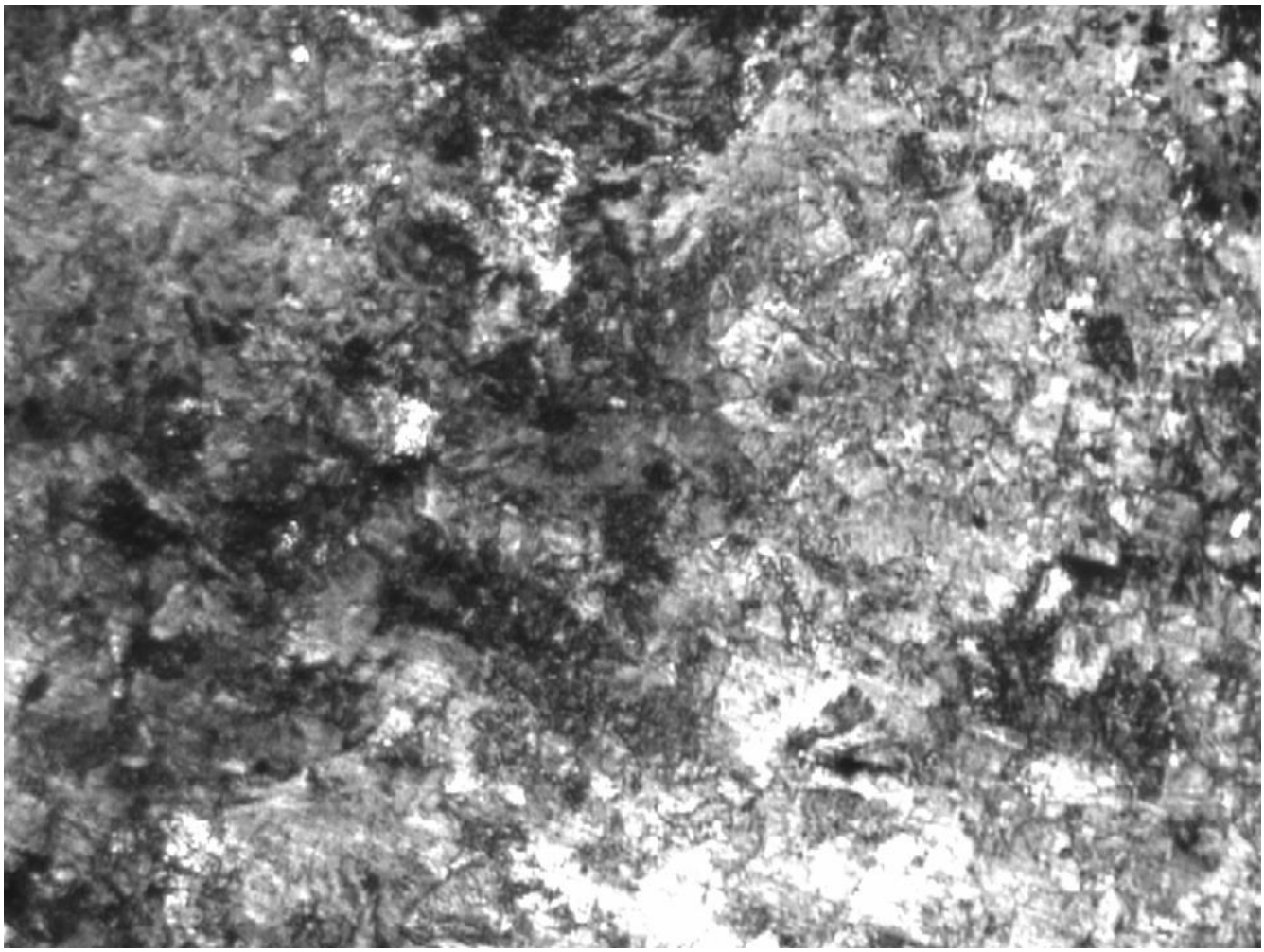
Bėgių, suvirintų termitiniu būdu, sulydymo zonos geometrija (mm). TPZ – terminio poveikio zona

Priedas Nr. 3



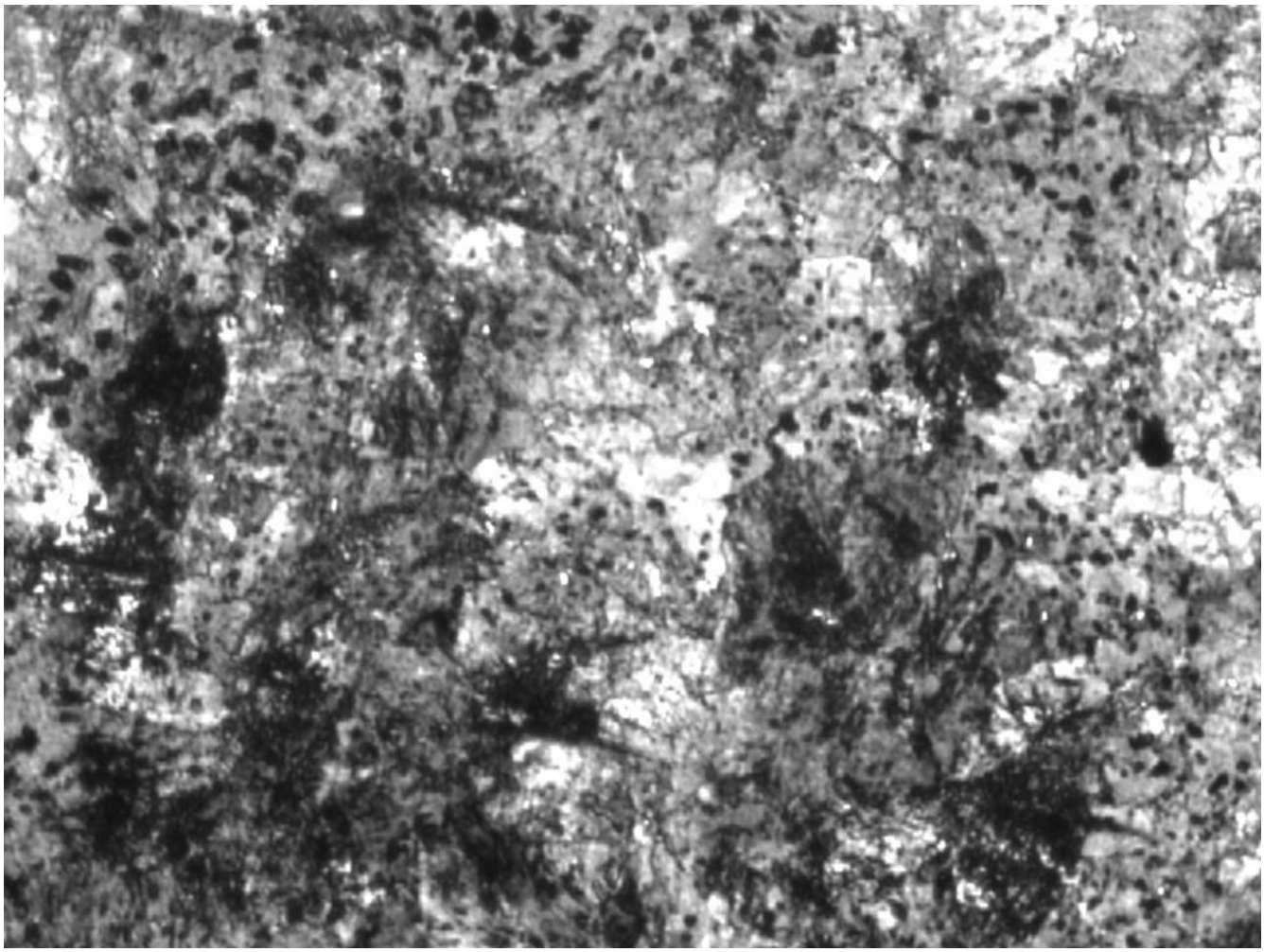
Bėgio galvutės, kontaktinės jungties, siūlės metalo trostitinė struktūra. Padidinta 100 kartų

Priedas Nr. 4



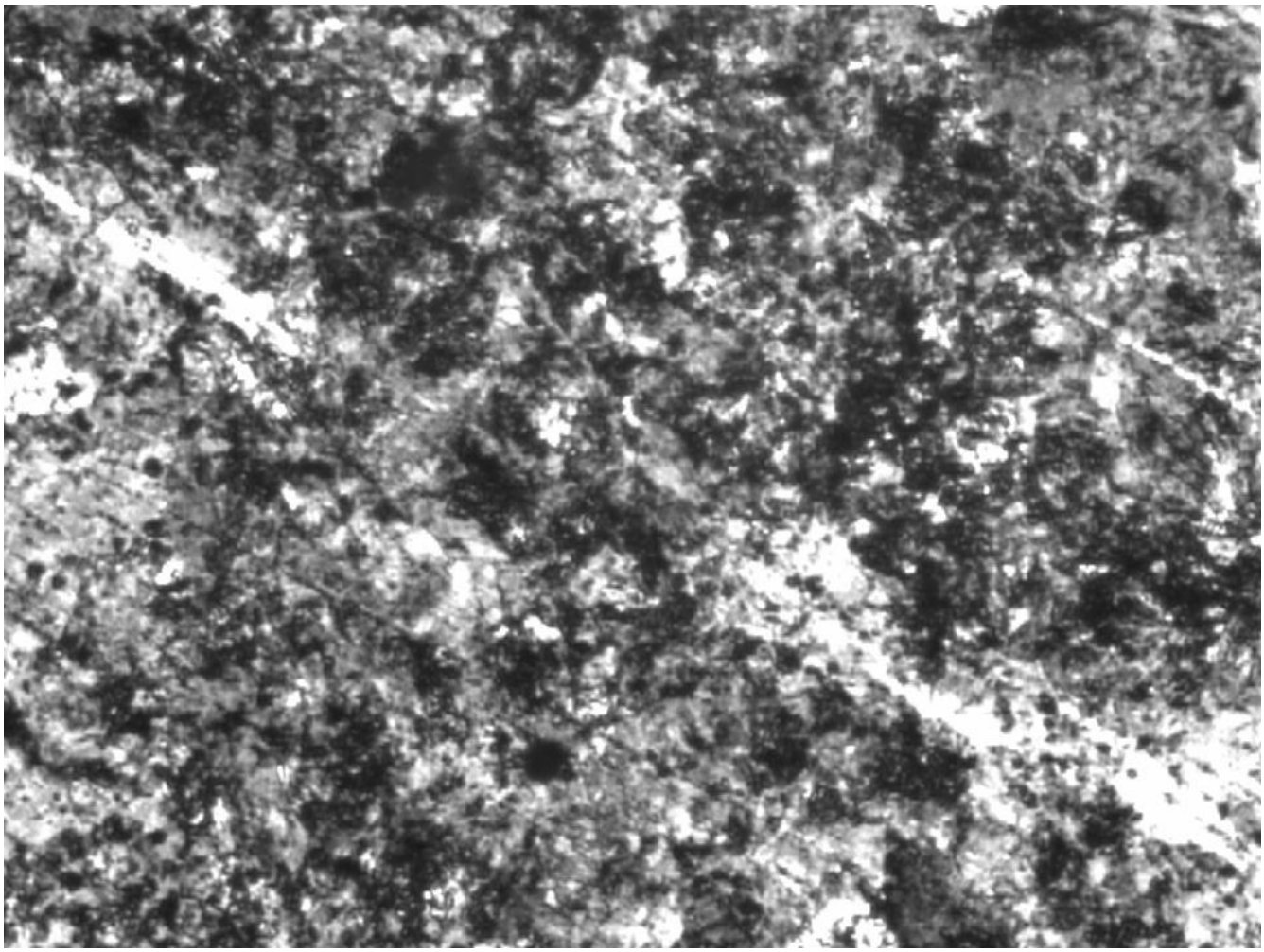
Bėgio kakliuko, kontaktinės jungties, siūlės metalo sorbitinė struktūra. Padidinta 100 kartų

Priedas Nr. 5



Bėgio pado, kontaktinės jungties, siūlės metalo sorbitinė struktūra. Padidinta 100 kartų

Priedas Nr. 6



Bėgio galvutės, kontaktinės jungties, terminio poveikio zonos sorbitinė struktūra. Padidinta 100 kartų