



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Detalių paviršių atnaujinimo lydant babilą metodų tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Tomas Kačinskas
Projekto autorius

Prof. Saulius Baskutis
Vadovas

Kaunas, 2024



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Detalių paviršių atnaujinimo lydant babilą metodų tyrimas
Baigiamasis magistro projektas
Gamybos inžinerija (6211EX015)

Tomas Kačinskas
Projekto autorius

Prof. Saulius Baskutis
Vadovas

Doc. Lina Kavaliauskienė
Recenzentė

Kaunas, 2024



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Tomas Kačinskas

Detalių paviršių atnaujinimo lydant babilą metodų tyrimas

Akademinių sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Tomas Kačinskas

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kaunas technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Studentui – Tomui Kačinskui

1. Projekto tema –

Detalių paviršių atnaujinimo lydant babbitą metodų tyrimas

(Lietuviškai)

Study of Methods of Renewing the Surfaces of Parts by Melting Babbitt

(Angliškai)

2. Projekto tikslas ir uždaviniai

Tikslas: ištirti skirtingais metodais suformuotas babito dangas.

Uždaviniai:

1. apžvelgti babito medžiagos savybių ir panaudojimo galimybių aspektus;
2. atlikti babito liejimo technologijų analizę;
3. išnagrinėti babito dangos techninių parametrų nustatymo metodų tyrimus;
4. įvertinti babito dangas gautas eksperimento metu deginant dujas, lydant krosnyje ir naudojant elektrolankinį būdą;
5. palyginti ekonomiškai babito dangų liejimo technologijas.

3. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos

Projektui naudoti tik B-83 (GOST 1320-74) markės babbitą.

Vizualinės informacijos konvertavimui į skaitines reikšmes naudoti „Matlab“ programinę įrangą.

Naudoti tik pagal EN standartizuotus techninių parametrų nustatymo metodus.

4. Papildomi reikalavimai projektui, ataskaitai ir jos priedams

Ekonominis rekomendacijų pagrindimas

Projekto autorius

Tomas Kačinskas

2023-10-02

(Vardas, Pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vadovas

Saulius Baskutis

2023-10-02

(Vardas, Pavardė)

(Parašas)

(Data)

Krypties studijų
programų vadovė

Regita Bendikienė

2023-10-02

(Vardas, Pavardė)

(Parašas)

(Data)

Kačinskas Tomas. Detalių paviršių atnaujinimo lydant babilų metodų tyrimas. Magistro baigiamasis projektas, vadovas prof. Saulius Baskutis; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Gamybės inžinerija (E10), Inžinerijos mokslai (E).

Reikšminiai žodžiai: babilas, danga, liejimas, atnaujinimas, technologija, dujos, krosnis, elektrolankas.

Kaunas, 2024. 79 p.

Santrauka

Detalių paviršių atnaujinimo lydant babilų metodų tyrimas yra patraukli tema, ypač metalo gaminių gamybės ir kokybės valdymo srityje. Ši medžiaga, žinoma dėl mažos trinties savybių, buvo naudojama dešimtmečius atnaujinti susidėvėjusias detales, pavyzdžiui, guolius ir įvoves. Atnaujinimo proceso metu susidėvėjęs detalės paviršius pašildomas, o po to ant jo pilamas arba kitais būdais pernešamas išlydytas babilas. Babilui vėstant ir kietėjant, susidaro naujas paviršius, kuris tiksliai atitinka pradinės detalės formą. Šis metodas yra labai svarbus siekiant pailginti, pavyzdžiui, mašinos tarnavimo laiką ir užtikrinti sklandų veikimą. Tyrėjai ir specialistai, domisi įvairiais šio proceso aspektais, tokiais kaip lydymosi temperatūrų optimizavimas, metalurginių pokyčių supratimas proceso metu ir atnaujinamų paviršių kokybės užtikrinimas. Taip pat labai svarbu ištirti, kaip šie metodai atitinka pramonės standartus, kad būtų užtikrinta aukščiausia atnaujintų detalių kokybė ir patikimumas. Be to, kiekvienam, užsiimančiam metalo gaminių gamybės kokybės valdymu, labai svarbu žinoti naujausius babilo lydymo metodų, medžiagų ir įrangos pasiekimus. Šios žinios gali reikšmingai prisidėti prie mokslinių darbų ir ateities verslo sėkmės, ypač kuriant studijų programas ir teikiant konsultacijas gamybės kokybės klausimais. Apibendrinant galima pasakyti, kad paviršių atnaujinimo išlydytu babilu metodų tyrimas yra svarbi sritis ir siūlo daugybę mokslinių tyrimų, inovacijų ir pritaikymo pramonėje galimybių.

Kačinskas Tomas. Study of Methods of Renewing the Surfaces of Parts by Melting Babbitt, Master's Final Degree Project, supervisor prof. Saulius Baskutis; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Production and Manufacturing Engineering (E10), Engineering Sciences (E).

Keywords: babbitt, coating, casting, renewal, technology, gas, furnace, electric arc.

Kaunas, 2024. 79 p.

Summary

The study of methods for resurfacing details by melting babbitt is an attractive topic, especially in the area of metal product manufacturing and quality control. Known for its low-friction properties, this material has been used for decades to renew worn parts such as bearings and bushings. During the resurfacing process, the worn surface of the part is heated and then molten babbitt is poured or otherwise transferred over it. As the babbitt cools and hardens, a new surface is formed that exactly matches the shape of the original part. This method is very important to extend the life of the machine for example and ensure smooth operation. Researchers and practitioners are interested in various aspects of this process, such as optimizing melting temperatures, understanding metallurgical changes during the process, and assuring the quality of renewable surfaces. It is also critical to examine how these methods meet industry standards to ensure the highest quality and reliability of remanufactured parts. In addition, it is essential for anyone involved in quality control in the production of metal products to be aware of the latest developments in babbitt melting methods, materials and equipment. This knowledge can significantly contribute to the success of scientific work and future business, especially when creating study programs and providing consultations on production quality issues. In conclusion, the study of resurfacing techniques with molten babbitt is an important field and offers many opportunities for research, innovation and industrial application.

Turinys

Lentelių sąrašas	9
Paveikslų sąrašas	10
Įvadas.....	13
1. Babito medžiagos savybės ir panaudojimo galimybės	14
1.1. Babito savybės.....	14
1.2. Panaudojimo galimybės.....	16
1.3. Babito liejimo technologijos.....	17
1.3.1. Tradiciniai liejimo metodai	18
1.3.2. Modernūs liejimo metodai.....	19
1.3.3. Inovatyvūs liejimo metodai	21
1.4. Babito medžiagos savybių, panaudojimo galimybių ir technologijų apibendrinimas.....	23
2. Eksperimentiniame tyrime naudojamos babito liejimo technologijos	24
2.1. Lydymas krosnyje ir liejimas tiesiai iš tiglio.....	24
2.2. Lydymas atvira liepsna, deginant dujas.....	25
2.3. Lydymas elektrolanku	26
2.4. Eksperimentiniuose tyrimuose naudotų liejimo technologijų apibendrinimas	26
3. Babito lydymo ir liejimo technologinių procesų analizė, gautų dangų savybių tyrimai.....	28
3.1. Babito kaip pridėtinės medžiagos paruošimas	28
3.2. Paviršiaus paruošimas liejimui	30
3.2.1. Nuriebalinimas ir valymas.....	30
3.2.2. Flusavimas.....	31
3.2.3. Alavavimas (balinimas).....	31
3.3. Eksperimentinių bandinių, papildomų priemonių projektavimas ir jų gamyba	33
3.4. Lydymo krosnyje ir liejimo tiesiai iš tiglio metodo stebėjimas ir bandinių gamyba	34
3.5. Lydymo atvira liepsna metodo stebėjimas ir bandinių gamyba	36
3.6. Lydymo elektrolanku metodo stebėjimas ir bandinių gamyba.....	39
3.7. Techninių parametrų nustatymo metodai	43
3.7.1. Tempimo bandymas	44
3.7.2. Kietumo matavimas.....	49
3.7.3. Medžiagos cheminių elementų nustatymas	51
3.7.4. Bandymas skverbikliais.....	53
3.7.5. Radiografinis tyrimas	59
3.7.6. Medžiagos struktūros mikro tyrimai	63
3.8. Eksperimento rezultatai	69
3.8.1. Analizė.....	70
3.8.2. Palyginimas	70
3.8.3. Rekomendacijos	72
3.9. Liejimo technologijų tyrimų, analizės, palyginimo ir rekomendacijų apibendrinimas.....	73
4. Liejimo technologijų ekonominis palyginimas	74
4.1. Ekonominė analizė	74
4.2. Investicijų kaštai	74
4.3. Eksploatacinės išlaidos.....	75
4.4. Įrangos ilgaamžiškumas	77
4.5. Metodų investicijų grąža	78

4.6. Babito liejimo technologijų ekonominio palyginimo apibendrinimas	79
Išvados	80
Literatūros sąrašas	81
Informacijos šaltinių sąrašas	84
Priedai.....	85
1 priedas. Dalyvavimo jaunųjų mokslininkų konferencijoje sertifikatas	85

Lentelių sąrašas

1 lentelė. B-83 markės babito cheminė sudėtis, % [2]	15
2 lentelė. B-83 markės mechaninės savybės	16
3 lentelė. B-83 markės babito perlietų strypelių cheminė sudėtis, %	30
4 lentelė. Tiesioginio liejimo iš tiglio į V formą technologinė kortelė	36
5 lentelė. Liejimo naudojant atvirą liepsną technologinė kortelė	39
6 lentelė. Liejimo naudojant elektros lanką technologinė kortelė.....	42
7 lentelė. Eksperimentinių bandinių imtis.....	43
8 lentelė. Tempimo bandymų rezultatai.....	47
9 lentelė. „U“ formos tipo bandinių kietumo rezultatai	51
10 lentelė. Cheminės analizės duomenys.....	52
11 lentelė. Bandinių paviršiaus porėtumo įvertinimas po liejimo.....	56
12 lentelė. Bandinių paviršiaus porėtumo įvertinimas po šlifavimo	58
13 lentelė. Bandinių paviršiaus porėtumo įvertinimas po galutinio šlifavimo.....	59
14 lentelė. Radiografinio bandymo metu naudota įranga	62
15 lentelė. Radiografinio bandymo parametrai	62
16 lentelė. Visų bandymų rezultatų palyginimas ir konvertavimas	71
17 lentelė. Įrangos įsigijimo kaštai.....	75
18 lentelė. Eksploatacinių ir gamybinių išlaidų suvestinė	76
19 lentelė. Investicinės grąžos skaičiavimas	78

Paveikslų sąrašas

1 pav. Babito mikrostruktūra su Cu_6Sn_5 ir Sn Sb junginiais [1]	14
2 pav. Babito B-83 markės kaladėlė	15
3 pav. Babito B-83 medžiagos vidaus struktūra po laužimo.....	15
4 pav. Babito B-83 bandiniai po dangos lenkimo bandymo: (a) – lenkimas iš pagrindinio metalo pusės, (b) – lenkimas iš babito dangos pusės (gniuždymas)	16
5 pav. Išcentrinio liejimo principinė schema: 1 - metalinė įvorė galiniam paviršiui, 2 – dengiama detalė (guolis), 3 – babito dangos sluoksnis, 4 – priekinė įvorė su užpylimo anga, 5 – užliejimo vamzdelis, 6 – tiglis [18]	19
6 pav. Purškimo lydant liepsna principinė schema [11]	19
7 pav. Purškimo lydant elektrolanku principinė schema [19].....	20
8 pav. Plazminio purškimo principinė schema [20].....	20
9 pav. Purškimo lydant liepsna ir naudojant pridėtinę vielą principinė schema [21]	21
10 pav. Šaltojo purškimo principinė schema [12].....	21
11 pav. Babito 3D spausdinimo principinė schema [13]	22
12 pav. Nanostruktūrinės babito dangos padengimo principinė schema [22]	23
13 pav. Išlydyto babito pylimo tiesiai ant paviršiaus technologija: (a) – liejimo proceso nuotrauka, (b) – technologijos eskizas, kur poz.1 – tiglis, 2 – „V“ formos bandinio ruošinys (žr. 3.3 sk.), 3 – liejimo stendas (žr. 3.4 sk.).....	24
14 pav. Babito lydymo su oksiduojančia liepsna technologija: (a) – liejimo proceso nuotrauka, (b) – technologijos eskizas, kur poz.1 – babito pridėtinė medžiaga, 2 – dujinis degiklis, 3 – „V“ formos bandinio ruošinys (žr. 3.3 sk.), 4 – liejimo stendas (žr. 3.5 sk.).....	25
15 pav. Babito lydymo elektrolankinio metodo technologija: (a) – liejimo proceso nuotrauka, (b) – technologijos eskizas, kur poz.1 – Volframo elektrodas, 2 – suvirinimo degiklis, 3 – babito pridėtinė medžiaga, 4 – „V“ formos bandinio ruošinys (žr. 3.3 sk.), 5 – liejimo stendas (žr. 3.5 sk.).....	26
16 pav. Elektrinė šildymo krosnis „Uterna“ su automatiniu temperatūros valdymu: (a) – tiglio paruošimas lydymui, (b) – babito lydymas	29
17 pav. Rafinavimui skirtas maišymo samtelis: (a) – samtelio nuotrauka, (b) – samtelio eskizas...	29
18 pav. Babito medžiagos skerspjuvių makro vaizdas: (a) – perlietas babitas į strypelį, (b) – babito kaladėlė.....	29
19 pav. Babito strypelio liejimas: (a) – Išlietas strypelis, (b) – liejimo formos skerspjuvis, (c) – liejimo formos eskizas	30
20 pav. Amonio fluorida miltelių trynimas flusavimo metu	31
21 pav. Skystos fazės gebėjimo pasklisti kietojo kūno paviršiumi skirtingomis sąlygomis schema, (a) – kai paviršius ne slidus, (b) – kai paviršius iš anksto paruoštas padengiant plėvele [23]......	32
22 pav. Alavo strypelio trynimas lygiagrečiai atliekant flusavimą.....	32
23 pav. „V formos“ liejimo bandinio tipas: (a) – pagamintas ruošinys, (b) – ruošinio eskizas.....	33
24 pav. „U formos“ liejimo bandinio tipas: (a) – skerspjuvio vaizdas, (b) – ruošinio matmenys, (c) – ruošinio eskizas	33
25 pav. Tiesioginio liejimo iš tiglio stendas: (a) – stendo nuotrauka, (b) – stendo eskizas.....	34
26 pav. reikiamos temperatūros palaikymo procesas, prieš tiesioginį liejimą.....	34
27 pav. Paviršiaus paruošimo procedūros: (a) – nuriebalinimo patikrinimas, (b) – alavavimas, (c) – flusavimas.....	35
28 pav. babito užliejimo procesas: (a) – pasiruošimas liejimui, (b) – liejimas.....	35

29 pav. Bandiniai gauti tiesioginio liejimo metu: (a) – V formos tipo „K“ bandinys, (b) – U formos tipo „TIG“ bandinys	35
30 pav. Liejimo naudojant atvirą liepsną stendas: (a) – stendo nuotrauka, (b) – stendo eskizas.....	37
31 pav. Liejimo, naudojant atvirą liepsną, pirminės procedūros eiga: (a) – šaknies formavimas, (b) – galų uždarymas	37
32 pav. Liejimo, naudojant atvirą liepsną, proceso pabaigos eiga: (a) – vonelės užpildymas, (b) – galų pataisymas	38
33 pav. Bandiniai, gauti atviros liepsnos metodo metu: (a) – V Formos tipo bandiniai, (b) – U formos tipo bandinys	38
34 pav. Bandinių modeliai: (a) – V formos tipo, (b) – U formos tipo	38
35 pav. Naudojama įranga liejant elektrolankiniu būdu: (a) – „Fronius TransPocket 2500 TIG“ suvirinimo aparatas, (b) – „Most“ reduktorius	40
36 pav. Elektrolankinio babito liejimo metodo proceso pradžia: (a) – Prieš lanko uždegimą, (b) – degant elektrolankui	40
37 pav. Babito dangos, naudojant elektrolanką, formavimo etapai: (a) – 1 ėjimas, (b) – 2 ėjimas, (c) – 3 ėjimas.....	40
38 pav. Bandiniai, gauti elektrolankinio metodo metu: (a) – V formos tipo „T“ bandiniai, (b) – U formos tipo „AR“ bandinys	41
39 pav. UAB „IREMAS“ mechaninių savybių nustatymo skyrius	44
40 pav. Tempimo mašinos 1958U-10-1 komponentai: (a) – valdiklis, (b) – griebtuvai, (c) – išvesties duomenų diagrama	45
41 pav. Tempimo bandiniai: (a) – liejimo tiesiai iš tiglio bandiniai, (b) – liejimo naudojant atvirą liepsną bandiniai, (c) – liejimo naudojant elektrolankinį metodą bandiniai.....	46
42 pav. Tempimo bandymo atlikimas: (a) – deformuojamas bandinys, (b) – bandinys po deformacijos, (c) – bandinys po išardymo.....	46
43 pav. K3 bandinio tempimo bandymo diagrama	47
44 pav. D4 bandinio tempimo bandymo diagrama	48
45 pav. T1 bandinio tempimo bandymo diagrama	48
46 pav. Brinelio kietumo matuoklis TB-5004	49
47 pav. Kietumo nustatymas pagal Brinelį	50
48 pav. Babito bandiniai po kietumo matavimų: (a) – AR bandinio kietumas, (b) – GA bandinio kietumas, (c) – TIG bandinio kietumas	50
49 pav. Oxford PMI Master Pro spektroanalizatorius	51
50 pav. Babito „U“ formos tipo bandinys po PMI tyrimo	52
51 pav. Bandiniai skverbimosi tyrimo metu: (a) – bandinių paruošimas PT testui, (b) – bandiniai po skverbiklio užnešimo	53
52 pav. „JUMBO-PEN“ MR 67 rašiklio tipo skverbiklis	54
53 pav. MATLAB programinio kodo langas	54
54 pav. Bandinių paviršius, tyrimo skverbikliais metu: (a) – „TIG“ bandinys, (b) – „GA“ bandinys, (c) – „AR“ bandinys	55
55 pav. MATLAB programos suskaičiuoti išvesties duomenys	55
56 pav. „U“ formos tipo bandinių šlifavimas iki plokščio ir lygaus paviršiaus: (a) – šlifavimo staklės, (b) – bandinys Nr. „TIG“, (c) – bandinys Nr. „GA“, (d) – bandinys Nr. „AR“.....	57
57 pav. Pakartotinis bandymas skverbikliais, ant lygių paviršių: (a) – užnešus skverbiklį, (b) – po ryškinimo.....	57

58 pav. „U“ formos tipo bandiniai po galutinio bandymo, vaizdas paruoštas MATLAB analizei: (a) – TIG bandinys, (b) – GA bandinys, (c) – AR bandinys.....	58
59 pav. Rentgenologijos švietimo patalpa	60
60 pav. Dangos vidinio vientisumo rentgeno nuotrauka [28]	60
61 pav. Rentgeno spindulių kertamo objekto šešėlinio atvaizdavimo schema [29]	61
62 pav. Rentgenogramos analizė po ryškinimo	61
63 pav. Radiografinio tyrimo rezultatai: (a) – „TIG“ bandinys, (b) – „GA“ bandinys, (c) – „AR“ bandinys.....	63
64 pav. Zeiss AXIO Scope A1 mikroskopas	64
65 pav. Ėsdinto babito struktūra: (a) – netekstūruotas paviršius, (b) – lazeriu tekstūruotas babito paviršius [30]	65
66 pav. Automatinis šlifavimo ir poliravimo įrenginys „Lam Plan“	65
67 pav. Išpjauti bandinukai mikrošlifų ruošimui, pasirinkta: (a) – „AR“ bandinio 4 dalis, (b) – „TIG“ bandinio 4 dalis, (c) – „GA“ bandinio 2 dalis, (d) – „AR“ mikrošlifo ruošinys, (e) – „TIG“ mikrošlifo ruošinys, (f) – „GA“ mikrošlifo ruošinys	66
68 pav. Paruošti mikrošlifai struktūrinei analizei: (a) – „TIG“ bandinys, (b) – „GA“ bandinys, (c) – „AR“ bandinys.....	66
69 pav. Babito dangos, liejant tiesioginiu būdu tiesiai iš tiglio („TIG“ bandinys), mikrostruktūros tyrimo rezultatai: (a) – didinimas 2,5x, (b) – didinimas 5x, (c) – didinimas 20x, (d) – didinimas 50x	67
70 pav. Babito dangos, liejant liepsnos būdu („GA“ bandinys), mikrostruktūros tyrimo rezultatai: (a) – didinimas 2,5x, (b) – didinimas 5x, (c) – didinimas 20x, (d) – didinimas 50x	68
71 pav. Babito dangos, liejant elektrolankiniu metodu inertinių dujų aplinkoje („AR“ bandinys), mikrostruktūros tyrimo rezultatai: (a) – didinimas 2,5x, (b) – didinimas 5x, (c) – didinimas 20x, (d) – didinimas 50x	69
72 pav. Tyrimų rezultatų indeksuotų verčių diagrama.....	72

Įvadas

Metalurgijos ir paviršiaus atnaujinimo srityje babito dangų taikymas jau seniai patraukė tiek mokslinių tyrimų, tiek pramonės praktikos dėmesį. Šis tyrimas liudija sudėtingą teorijos ir taikymo praktikoje santykį, kurį skatina vienintelis tikslas: atskleisti babito dangų struktūros savybes, jų formavimąsi įvairiais metodais ir lyginamąją analizę, kuri atskleis efektyviausią metodą. Babito dangos, garsėjančios savo universalumu ir naudingumu įvairiuose pramonės šakose, sukėlė susidomėjimą ir detalių atstatymo kontekste. Šis susidomėjimas skatina atlikti tyrimus, visų pirma metalurgijos ir medžiagų mokslo kryptyse. Darbo tikslas: atskleisti būdingas babito dangų savybes ir jų kūrimo, taikant skirtingas metodikas, pasekmes. Pradedant šį mokslinį tyrimą galima pripažinti, kad praktinis panaudojimas yra už laboratorijos ribų. Tyrimas apima holistinį babito dangų tyrimą, įskaitant jų charakteristikas, liejimo technologijas, techninius parametrus ir pritaikymą realiame pasaulyje. Darbe priimamas praktinio eksperimentavimo iššūkis, kai babito dangos bus formuojamos oksiduojančios liepsnos pagalba deginant dujas, lydant krosnyje ir pilant tiesiai iš tiglio ant detalės paviršiaus bei naudojant elektros lanką, sukurtą volframo elektrodu inertinių dujų aplinkoje. Darbe yra gilinamasi į babito dangų subtilybes, atidžiai nagrinėjamos jų fizinės, mechaninės ir metalurginės savybės. Tikslas yra atskleisti niuansus ir skirtumus, atsirandančius naudojant skirtingus liejimo metodus, ir galiausiai pateikti pagrįstas rekomendacijas. Be to, nagrinėjamas ir gilus mokslo ir ekonomikos ryšys. Šiame tyrime atliktas ekonominis skaičiavimas leidžia įvertinti kiekvienos babito dangos liejimo technologijos ekonomiškumą ir ilgalaikį gyvybingumą, pripažįstant, kad praktiškumas yra neatsiejamas nuo techninės kompetencijos. Šis tyrimas gali pakeisti nusistovėjusią metalurgijos pramonės praktiką. Rezultatai gali turėti įtakos sprendimams, turintiems įtakos mašinų ir jų komponentų ilgaamžiškumui, patikimumui ir ekonominiam efektyvumui. Darbe bus siekiama empirinių įrodymų, kritinių įžvalgų ir praktinių rekomendacijų, kurios sukurs babito dangų ateitį pramonėje.

Tikslas: ištirti skirtingais metodais suformuotas babito dangas.

Uždaviniai:

1. apžvelgti babito medžiagos savybių ir panaudojimo galimybių aspektus;
2. atlikti babito liejimo technologijų analizę;
3. išnagrinėti babito dangos techninių parametrų nustatymo metodų tyrimus;
4. įvertinti babito dangas gautas eksperimento metu deginant dujas, lydant krosnyje ir naudojant elektrolankinį būdą;
5. palyginti ekonomiškai babito dangų liejimo technologijas.

Hipotezė: B-83 markės babito dangos savybės priklauso nuo naudojamos liejimo technologijos.

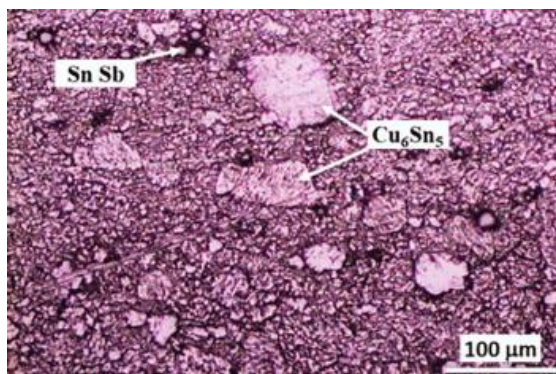
1. Babito medžiagos savybės ir panaudojimo galimybės

Babitas tai medžiaga, turinti unikalią sudėtį ir savybes, kurios suteikia daugybę galimybių pramonėje. Šios medžiagos, sudarytos iš alavo ir švino lydinių, užsitarnavo išskirtinę reputaciją dėl savo išskirtinio atsparumo dilimui, mažos trinties charakteristikų ir lankstumo. Ši universali medžiaga buvo pritaikyta įvairioms reikmėms – nuo automobilių ir aviacijos pramonės iki didelių darbo režimais pasižyminčių komponentų, tokių kaip guoliai ir įvorės, gamybos. Dėl savo gebėjimo užtikrinti tinkamą tepimą, sumažinti trintį ir atlaikyti dideles apkrovas, babito medžiaga yra tinkamiausias pasirinkimas inžinieriams ir gamintojams, siekiantiems padidinti savo gaminių ilgaamžiškumą ir efektyvumą.

1.1. Babito savybės

Babito lydiniai garsėja savo sudėties pobūdžiu, kurį daugiausia sudaro alavas ir švinas, retkarčiais pridedant kitų legiruojančių elementų. Analizuojant mikroskopu, babito medžiaga dažnai turi dendritinę struktūrą, kuriai būdingos smulkiai pasiskirsčiusios fazės. Šie dendritai, panašūs į medžio žievės struktūrą, yra sritys, kuriuose alavo ir švino atomai kietėjimo proceso metu išsidėsto į sudėtingus modelius. Struktūra susideda iš alavo α kietojo tirpalo matricos fazės, kuri suteikia plastiškumą, kietųjų vario ir stibio intermetalinių junginių, kurie gerina atsparumą dilimui, galimų ne metalinių junginių, kurie įtakoja mechanines savybes ir kietųjų priemaišų, kurių kiekvieno technologinio proceso metu siekiama išvengti arba bent jau kontroliuoti jų lygį.

Mikrostruktūra paprastai apima intermetalinius eutektinės fazės junginius, tokius kaip Cu_6Sn_5 ar SnSb (1 pav.), kurie atlieka pagrindinį vaidmenį gerinant medžiagos mechanines savybes ir tribologines savybes. Be to, mikrostruktūra atskleidžia smulkių intarpų ir nuosėdų buvimą babito kristalinėje gardelėje, prisidedant prie jos unikalių tribologinių savybių [1]. Babito medžiagų mikrostruktūra, atskleista atlikus išsamius tyrimus, pabrėžia tikslių gamybos metodų ir lydinių kompozicijų svarbą pritaikant medžiagos savybes pagal specifinius pramonės poreikius, nuo didelių apkrovų iki tiksliųjų mašinų komponentų.



1 pav. Babito mikrostruktūra su Cu_6Sn_5 ir Sn Sb junginiais [1]

Babito medžiagos, garsėjančios savo universalumu ir unikaliomis savybėmis, apima lydinių grupę, kurią daugiausia sudaro alavas ir švinas. Šie lydiniai, dažnai vadinami baltaisiais metalais, pasižymi įvairiomis rūšimis ir sudėtimi, kad būtų pritaikyti įvairiems pramoniniams tikslams. Viena žymiausių šios grupės markių yra B-83 (2 pav.), žinoma dėl savo specifinės sudėties ir savybių. Paprastai babito lydinuose yra daug alavo, dažniausiai nuo 80% iki 90%, ir įvairus švino, stibio ir vario kiekis. Specifiniai šių legiruojančių elementų santykiai ir pridėjimai apibrėžia skirtingas babito markių klases, kurių kiekviena yra optimizuota tam tikriems naudojimo atvejams.



2 pav. Babito B-83 markės kaladėlė

Pavyzdžiui, B-83 sudėtyje yra maždaug 87% alavo, 8% stibio ir 5% vario (1 lentelė), todėl jis pasižymi išskirtiniu atsparumu dilimui, korozijai ir aukštai temperatūrai [2]. Kitos babito klasės, tokios kaip B-16 arba B-4, gali turėti alternatyvias kompozicijas, pritaikytas konkrečioms reikmėms, kurių kiekviena turi savo unikalių privalumų. Apskritai, babito medžiagos pasižymi išskirtinėmis antifrikcinėmis ir mažo dilimo savybėmis, todėl jos yra būtinos įvairiose pramonės šakose, įskaitant automobilius, jūrų laivų ir pramonines mašinas.

1 lentelė. B-83 markės babito cheminė sudėtis, % [2]

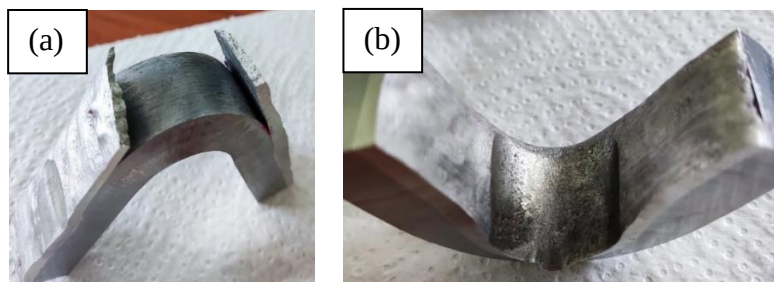
Elementas	Fe	Al	Cu	As	Pb	Zn	Sb	Bi	Sn
Dalis, %	≤ 0,1	≤ 0,005	5,5 ÷ 6,5	≤ 0,05	≤ 0,35	≤ 0,004	8 ÷ 12	≤ 0,05	81 ÷ 87

Mechaninėmis savybėmis garsėjančios babito medžiagos siūlo unikalų savybių derinį, dėl kurio jos labai vertinamos įvairiose pramonės srityse. Šios savybės yra ypač svarbios naudojant guolius, kur babito lydiniai yra plačiai naudojami. Babito medžiagos yra žinomos dėl santykinai didelės takumo ribos, o tai reiškia, kad jos gali plastiškai deformuotis veikiamos apkrovos nepatirdamos nuolatinės deformacijos, todėl jos idealiai tinka naudoti, kai susiduriama su kintamais ir svyruojančiais įtempiais. Kalbant apie maksimalų stiprumą, babito medžiagos gali nepasižymėti išskirtinai dideliu tempimo ar gniuždymo stipriu, palyginti su kai kuriomis kitomis medžiagomis, tačiau tikrasis jų stiprumas yra jų gebėjimas atlaikyti dideles apkrovas išlaikant puikias tepimo savybes [3].



3 pav. Babito B-83 medžiagos vidaus struktūra po laužimo

Viena iš išskirtinių babito lydinų mechaninių savybių yra jų kietumas. Babito medžiagos paprastai turi lyginant su metalais sąlyginai mažą paviršiaus kietumą, tačiau viduje, atsižvelgiant į paviršiaus kietumą, turi sąlyginai minkštą ir trapią struktūrą (3 pav.). Ši savybė leidžia jiems prisitaikyti prie besijungiančių komponentų formos, užtikrinant tolygų apkrovos pasiskirstymą ir sumažinant susidėvėjimą. Ši savybė yra būtina sąlyga naudojant slydimo guolius, kai kietumo ir lankstumo pusiausvyra yra būtina siekiant išvengti trinties ir sumažinti komponentų susidėvėjimą [3]. Tačiau svarbu pažymėti, kad babito medžiagos gali būti šiek tiek trapios, ypač tam tikromis sąlygomis. Nors jos gali atlaikyti dideles apkrovas (4 pav. b), jos gali įtrūkti arba įskilti (4 pav. b), jei yra veikiamos pernelyg didelių smūgių ar smūginių apkrovų. Todėl tinkama projektavimo ir priežiūros praktika yra labai svarbi siekiant maksimaliai padidinti babito pagrindu pagamintų komponentų ilgaamžiškumą.



4 pav. Babito B-83 bandiniai po dangos lenkimo bandymo: (a) – lenkimas iš pagrindinio metalo pusės, (b) – lenkimas iš babito dangos pusės (gniuždymas)

Apibendrinant galima pasakyti, kad babito medžiagos pasižymi unikaliu mechaninių savybių rinkiniu, įskaitant mažą takumo ribą, gerą laikomąją galią, vidutinį kietumą ir tam tikrą trapumą (2 lentelė). Šios savybės yra kruopščiai subalansuotos, kad būtų užtikrintas efektyvus ir patikimas tepimas, todėl babito lydiniai yra puikus pasirinkimas tais atvejais, kai svarbiausia sumažinti trintį ir susidėvėjimą. Didžiausios apkrovos, kurias B-83 gali atlaikyti, įskaitant statines, dinamines ir smūgines apkrovas, priklauso nuo įvairių veiksnių, įskaitant konkretų pritaikymą, komponento dydį ir geometriją bei veikimo sąlygas. B-83 yra žinomas dėl savo laikomosios galios, tačiau tikslios ribos įvairiose srityse gali skirtis [3].

2 lentelė. B-83 markės mechaninės savybės

Stiprumo riba, MPa	Takumo riba, MPa	Kietumas, HB	Tankis, kg/m ³	Lydomosi temp., ° C	Didžiausia leidžiama statinė apkrova, kgf/cm ²	Didžiausia leidžiama dinaminė apkrova, kgf/cm ² s	Didžiausia leidžiama smūginė apkrova, kgf/cm ² s	Didžiausia atlaikoma darbinė trintis, m/s
110÷120	80÷85	27÷30	7380	360÷380	400	1000	100	60

Babito B-83 markė gali atlaikyti santykinai dideles statines apkrovas, todėl tinka naudoti, kai komponentai turi pastovią ir nekintančią apkrovą. Tiksli maksimali statinė apkrova priklauso nuo tokių veiksnių kaip komponento dydis ir konstrukcija, taip pat saugos ribos, reikalingos taikymui. Atlaikomos dinaminės apkrovos, kurios yra susijusios su jėgos pokyčiais laike. Didžiausia dinaminė apkrova priklauso nuo konkrečių sąlygų ir apkrovos modelių. Inžinieriai paprastai atlieka skaičiavimus, kad nustatytų tinkamas apkrovos ribas dinaminėms apkrovoms, remiantis tokiais veiksniais, kaip medžiagos nuovargio stiprumas. Nors babitas B-83 yra tvirtas, jis nėra skirtas atlaikyti didelio smūgio apkrovas. Smūginės apkrovos gali sukelti staigius įtempimus ir deformacijas, dėl kurių medžiaga gali būti pažeidžiama. Todėl B-83 komponentai turi būti suprojektuoti taip, kad, kai tik įmanoma, būtų išvengta smūginių apkrovų arba jos būtų sumažintos. Norint nustatyti didžiausias konkrečios B-83 komponento apkrovas konkrečioje situacijoje, patartina atlikti inžinerinius skaičiavimus, atsižvelgiant į unikalios modelio reikalavimus ir eksploataavimo sąlygas. Siekiant užtikrinti, kad B-83 komponentai veiktų saugiai ir efektyviai pagal numatytą laikomąją galią, turėtų būti taikoma tinkama inžinerinė praktika ir saugos faktoriai [3].

1.2. Panaudojimo galimybės

Šiuolaikinėje pramoninėje babito dangos išlieka vertingu sprendimu tais atvejais, kai reikiamas tepimas ir mažesnė trintis yra labai svarbūs faktoriai. Šios dangos plačiai naudojamos mašinų komponentuose, tokiuose kaip guoliai, įvorės ir kiti trinties paviršiai, siekiant užtikrinti sklandų ir efektyvų veikimą. Babito dangos puikiai tinka didelės dinaminės apkrovos ir didelio greičio

sąlygomis, todėl jos yra būtinos energijos gamybos, automobilių, laivininkystės ir gamybos sektoriuose. Jų gebėjimas atlaikyti dideles apkrovas net ir sudėtingoje aplinkoje padidina įrangos patvarumą ir sumažina priežiūros išlaidas. Nepaisant pažangos medžiagų technologijų srityje, babito dangos ir toliau yra patikimas pasirinkimas inžinieriams ir gamintojams, siekiantiems optimizuoti savo mašinų našumą ir ilgaamžiškumą, ypač tais atvejais, kai kiti besisukančių mechanizmų slydimo metodai gali būti netinkami. Babito dangos yra patikima ir ekonomiška priemonė, leidžianti pailginti svarbiausių mašinų komponentų tarnavimo laiką, o jų tinkamumas naudoti šiuolaikinėse pramoninėse sąlygose tebėra jų ilgalaikės vertės įrodymas [4]. Pastaruoju metu babito lydiniai ir toliau atlieka svarbų vaidmenį įvairiose pramonės srityse, pasižymėdami pritaikomumu ir naudingumu.

Babito lydiniai, tokie kaip B-83, tebėra plačiai naudojami karinėje pramonėje ir atlieka svarbų vaidmenį užtikrinant įvairios karinės įrangos funkcionalumą ir patikimumą. Vienas iš pagrindinių jų pritaikymo sričių yra sunkiosios karinės technikos, įskaitant tankus, šarvuotas transporto priemones ir orlaivius, guoliai. Dėl išskirtinės babito keliamosios galios ir atsparumo dilimui, jis yra idealus pasirinkimas šiems svarbiems komponentams, kurie turi atlaikyti griežtus kovos ir nepalankios vietovės reikalavimus. Be to, jų mažos trinties savybės prisideda prie karinės technikos tikslumo, leidžia tiksliai nusitaikyti ir šaudyti naudojant artilerijos sistemas ir raketų paleidimo įrenginius. Babito gebėjimas patikimai veikti esant ekstremalioms temperatūroms ir atšiaurioms sąlygoms, kartu su atsparumu nusidėvėjimui ir korozijai, daro jį neįkainojama medžiaga karinėje pramonėje, kur yra būtinas įrangos ilgaamžiškumas ir efektyvus eksploatavimas. Iš esmės, babito lydiniai prisideda prie karinės technikos patikimumo, užtikrindami ilgaamžiškumą ir nepriekaištingą atskirų komponentų darbą sudėtingomis sąlygomis [5].

Apibendrinant galima pasakyti, kad babito lydinių universalumas ir gebėjimas sumažinti trintį bei padidinti judančių dalių patvarumą ir toliau daro juos aktualiais šiuolaikinėse įvairiose pramonės šakose. Šiuolaikiniai liejimo technologijų tyrimai ir pažanga prisideda prie nuolatinio babito dangų tobulinimo sprendžiant inžinerinius uždavinius. Babito dangos gali būti plačiai pritaikytos taisant ir atstatant energetikos ir pramonės įrenginius bei karinę techniką, įskaitant regionus, kuriuos paveikė kariniai konfliktai, pavyzdžiui, Ukrainoje. Dėl savo savybių babito dangos yra patikimas pasirinkimas siekiant padidinti svarbiausių komponentų ilgaamžiškumą ir funkcionalumą, taip prisidedant prie tolesnio gyvybiškai svarbių mašinų veikimo sudėtingose aplinkose [5].

1.3. Babito liejimo technologijos

Babito dangos turi ilgą naudojimo istoriją įvairiose pramonės šakose, o laikui bėgant buvo sukurtos naujos skirtingos technologijos ir metodai, leidžiantys efektyviai padengti detalių paviršius šiomis dangomis. Šiame skyriuje nagrinėjama babito dengimo technologijų raida – nuo tradicinių praeityje naudotų metodų iki šiuolaikinių, šiandien naudojamų naujovių. Visos babito liejimo technologijos susijusios bendru bruožu – lydymas atliekamas termiškai veikiant babito medžiagą. Stibis (Sb) yra esminis babito lydinių elementas, o jo elgsena šiluminių procesų metu yra reikšminga. Lydymosi metu stibis padidina skystos fazės takumą ir padeda formuoti eutektinėms struktūroms. Tačiau per didelis karštis gali įtakoti jo išgaravimą, o tai gali turėti įtakos lydinio sudėčiai. Alavas (Sn) yra dar vienas svarbus elementas, prisidedantis prie lydinio tepimo savybių ir atsparumo dilimui. Alavo elgesys liejimo metu apima struktūros stabilumo palaikymą matricoje. Tinkama terminų procesų kontrolė yra būtina norint išvengti oksidacijos ar elementų išgaravimo, išsaugant norimas babito dangos savybes [6].

Liejimo procese taip pat vyksta išlydyto babito kietėjimas aušimo metu. Kietėjimo greitis turi įtakos fazių dydžiui ir pasiskirstymui matricoje. Norint pasiekti pageidaujamą mikrostruktūrą ir mechanines savybes, būtinas tinkamas suketėjimas. Terminiai procesai, įskaitant kontroliuojamą šildymą ir vėsinimą, prisideda prie babito matricos homogenizavimo. Homogeniškumas yra labai svarbus mechaninėms savybėms ir dilimo atsparumui. Taip pat norint išlaikyti babito struktūros vientisumą, būtina kontroliuoti oksidaciją liejimo metu. Oksidacija gali įnešti priemaišų ir paveikti lydinio veikimą [7].

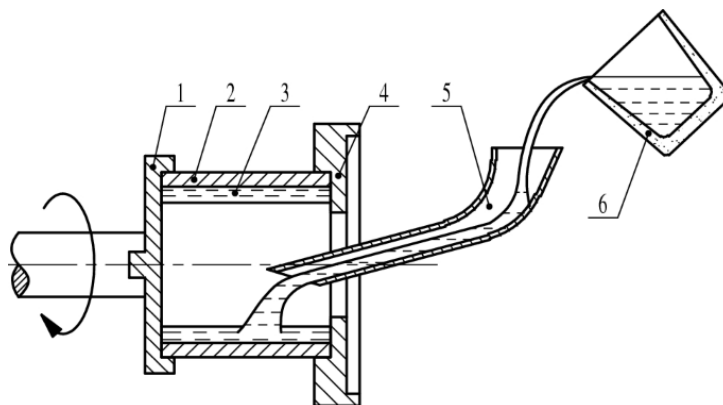
Babito lydiniai nevienodas šilumos įvedimas liejimo metu turi įtakos jo grūdelių dydžiui. Smulkiagrūdės struktūros, sukurtos kontroliuojamais terminiais procesais, prisideda prie geresnio mechaninio stiprumo ir atsparumo dilimui. Tinkama šilumos kontrolė sumažina nepageidaujamų tarpų buvimą matricoje [7]. Greito aušinimo metodai, tokie kaip liejimas naudojant liepsną, paprastai skatina smulkesnių grūdelių susidarymą. Alavo ir stibio sąveika eutektinėse struktūrose yra bendras daugelio metodų bruožas. Kiekvieno metodo specifiniai aušinimo greičiai ir temperatūros gali turėti įtakos šių struktūrų morfologijai ir pasiskirstymui. Metodai, kuriuose naudojama kontroliuojama atmosfera, pvz., liejimas volframo elektrodu, argono dujų aplinkoje, užtikrina geresnę oksidacijos kontrolę. Tai sumažina nepageidaujamų oksidų buvimą mikrostruktūroje.

Vienodos mikrostruktūros pasiekimas yra bendras tikslas, o visi liejimo metodai turi įtakos lydinio gebėjimui sudaryti nuoseklią matricą. Mikrostruktūrinių pokyčių, susijusių su skirtingomis lydymo ir liejimo technologijomis, supratimas suteikia vertingų įžvalgų, kaip optimizuoti babito dangas konkrečioms reikmėms. Kruopštus kiekvieno metodo privalumų ir apribojimų įvertinimas leidžia priimti pagrįstus sprendimus pasirenkant tinkamiausią metodą, pagrįstą norimos dangos savybėmis. Liejimo metodus galima išskirti į tradicinius, modernius ir inovatyvius. Patys pirmieji tradiciniai metodai pasižymi terminio poveikio ir paprasto mechaninio pernešimo principais. Modernūs metodai jau naudoja purškimo technologijas su skirtingais lydymui naudojamais energijos šaltiniais, o paskutiniai inovatyvūs metodai apima šaltuosius purškimo būdus ir nano technologijas.

1.3.1. Tradiciniai liejimo metodai

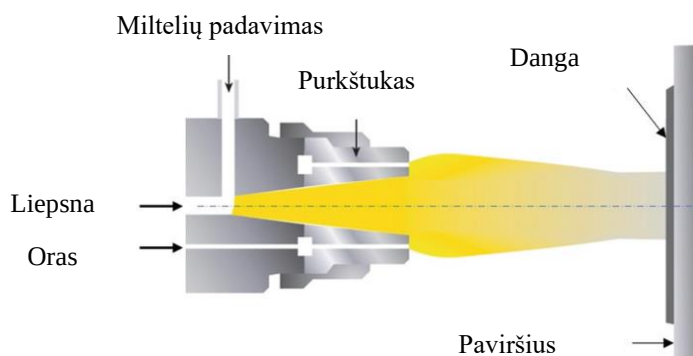
Tiesioginio liejimo metodas jau seniai buvo išbandytas ir patikrintas babito dangų dengimo būdas. Šis metodas, kilęs iš tradicinio metalo liejimo, išlaikė laiko išbandymą ir išlieka tinkamas pasirinkimas tam tikroms reikmėms. Liejimo procese išlydytas babito lydinys tiesiogiai pilamas ant paruošto pagrindo arba į specialią formą. Vėsdamas ir kietėdamas jis prilimpa prie paviršiaus, sudarydamas lygią ir vienodą dangą. Nors šis metodas yra žinomas dėl savo paprastumo ir patikimumo, jis turi apribojimų, ypač dėl tikslumo ir nuoseklumo. Šiuolaikinė pramonė reikalauja vis tikslesnių ir labiau kontroliuojamų dangų, todėl buvo sukurti alternatyvūs metodai. Tačiau atliekant tam tikrus paviršių remonto ir atnaujinimo darbus, tiesioginis liejimo metodas išlaiko savo vertę, suteikdamas pakankamą tradicinio metodo suderinamumą su šiandienos pramonės poreikiais [6].

Nors tiesioginio liejimo metodas iš esmės yra ganėtinai paprastas, pramoninių turbinų guolius rekomenduojama lieti išcentrinio būdu, o tai praktiškai keičia metodą iš paprasto į sudėtingą. Tam yra naudojamas specialus įrenginys (5 pav.). Išlydytas krosnyje babitas pilamas į sukamo staklės guolio centrą, o galiniai guolio paviršiai apsaugomi metalinėmis įvorėmis, kad karštas babitas nesiliestų per kraštus. Kokybiškam išcentriniam liejimui būtina parinkti tinkamą apsisukimų skaičių, kuris pagal guolio skersmenį atitinkamai kinta. Apsisukimų skaičius būtų nuo $400 \div 450$ aps/min didesniai kaip 250 mm skersmeniui ir iki $1100 \div 1200$ aps./min esant $30 \div 40$ mm skersmeniui [18].



5 pav. Išcentrinio liejimo principinė schema: 1 - metalinė įvorė galiniam paviršiui, 2 – dengiama detalė (guolis), 3 – babito dangos sluoksnis, 4 – priekinė įvorė su užpylimo anga, 5 – užliejimo vamzdelis, 6 – tiglis [18]

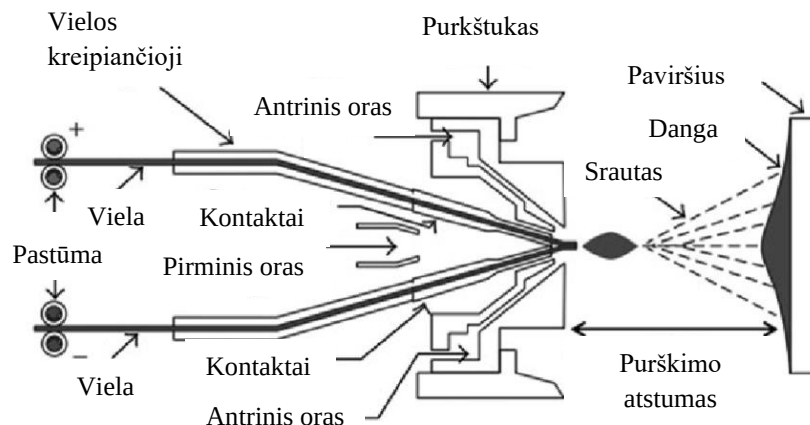
Purškimas liepsna – tai metodas, kuriame aukštos temperatūros liepsna kontaktuoja su babito grūdeliais, kurie užpurškiami ant dengiamo paviršiaus. Šis metodas – tai universalus sprendimas lokaliaje vietoje. Procesas apima babito lydinio grūdelių, kurie atitinkamais parametrais purškiami kaip lydalas ant pagrindo paviršiaus, lydymą naudojant aukštos temperatūros liepsną (6 pav.). Rezultatas – babito danga, kuri tvirtai prilimpa prie pagrindo, užtikrina puikias laikančiąsias ir antifrikcines savybes [11]. Išlydyto babito purškimo metodas leidžia kontroliuoti dangos storį ir suteikia galimybę taisyti komponentus lokaliaje vietoje sumažinant prastovos laiką ir išlaidas. Nors šis metodas ir nėra pats pažangiausias lyginant su šiuolaikiniais terminio purškimo metodais, tačiau liepsna lydomo babito purškimas išlieka patikima babito dangų formavimo technologija, sujungianti elementarią liepsnos generuojamą energiją su dangos tikslumu, kurio šiandien reikalauja pramonė [7].



6 pav. Purškimo lydant liepsna principinė schema [11]

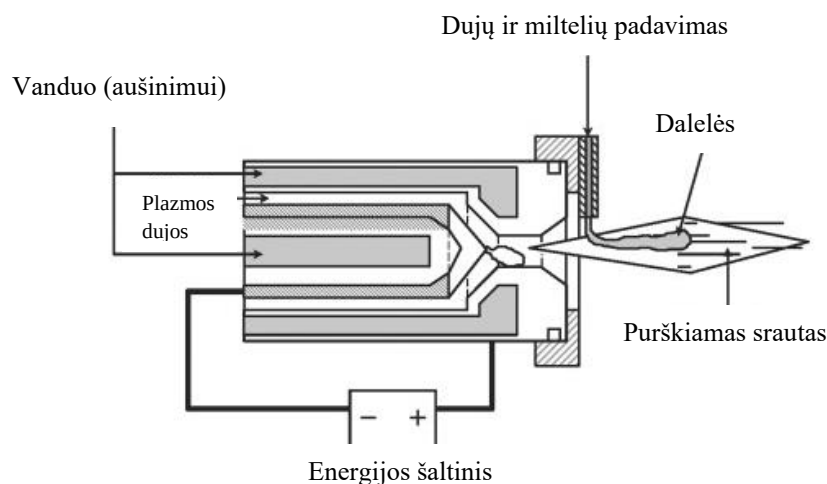
1.3.2. Modernūs liejimo metodai

Elektrolankinis purškimas yra modernus ir galingas būdas tiksliai ir kontroliuojamai padengti babito dangas. Šis metodas panaudoja elektros lanko išlydžio energiją, kad išlydytą babito vielą, kuri išlydyta suslėgtu oru išpurškiama ant dengiamo pagrindo. Gauta danga tvirtai prilimpa prie paviršiaus, todėl pasižymi išskirtinėmis apkrovos atlaikymo ir antifrikcinėmis savybėmis. Elektrolankinis purškimas leidžia patikimai kontroliuoti dangos storį ir dangos tankį, todėl plačiai taikomas dengiant įvairios paskirties detales. Šis metodas yra palankesnis dėl gebėjimo sukurti tankią ir vienodą dangą, todėl tinka įvairioms pramonės šakoms – nuo gamybos iki priežiūros ir remonto. Elektrolankinis purškimas yra patikimas pasirinkimas tiems, kurie siekia babito dangų aukštos kokybės ir ilgaamžiškumo savo mašinose ir įrenginiuose [8].



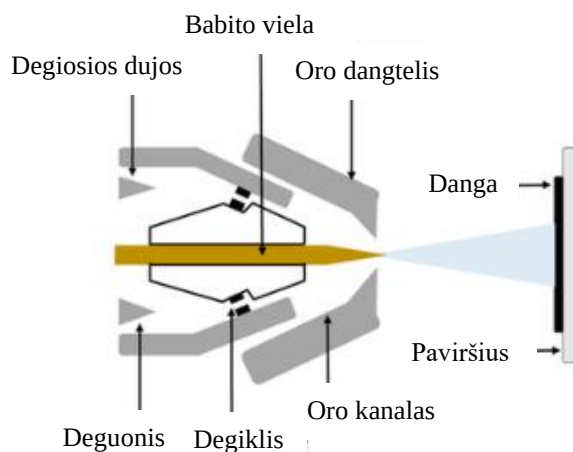
7 pav. Purškimo lydant elektrolanku principinė schema [19]

Plazminis purškimas yra vienas iš naujesnių būdų babito dangų srityje. Šis pažangus metodas panaudoja intensyvią aukštos temperatūros plazmos lanko energiją, kad išsilydytų babito milteliai, kurie vėliau preciziškai purškiami ant pagrindo. Rezultatas – danga, pasižyminti nepaprastu ilgaamžiškumu ir vienodumu, todėl tinka įvairioms reikmėms. Plazminis purškimas ypač vertinamas dėl gebėjimo sudaryti tankias dangas su padidintu atsparumu dilimui, užtikrinant, kad padengti komponentai atlaikytų atšiauriausias eksploataavimo sąlygas. Šio metodo tikslumas ir jo valdymas padarė šį metodą nepakeičiamu pramonės šakose, kuriose kokybė ir patikimumas yra svarbiausi kriterijai, pavyzdžiui, aviacijoje, energetikoje ir prietaisų gamyboje. Technologijoms ir toliau tobulėjant, plazminis purškimas išlieka dengimo technologijų priešakyje ir yra sprendimas, kuriame naujovės derinamos su patikimumu [9].



8 pav. Plazminio purškimo principinė schema [20]

Purškimas su liepsna lydant babitą iš vielos yra metodas, kuriame tikslumas derinamas su efektyviu valdomos liepsnos naudojimu. Šis modernus tradicinio purškimo liepsna variantas yra efektyvus sprendimas dengti babito dangas ant metalinio pagrindo. Purškiant babeto vielą su liepsna, viela išlydoma naudojant kontroliuojamą ir efektyvų degimo procesą, o susidariusi išlydyta medžiaga užnešama ant dengiamo pagrindo paviršiaus. Šis procesas leidžia tiksliai ir tolygiai padengti danga detales. Lydomos vielos purškimas dažnai naudojamas atliekant remonto ir restauravimo darbus lokioje vietoje, nes tai yra efektyvus būdas atnaujinti komponentus be sudėtingos įrangos ar ilgų prastovų. Dėl savo gebėjimo užtikrinti vienodą ir nuoseklią dangą, lydomos vielos purškimas yra patikimas pasirinkimas tiems, kurie nori padidinti mašinų ir įrangos našumą naudojant babeto dangą [10].

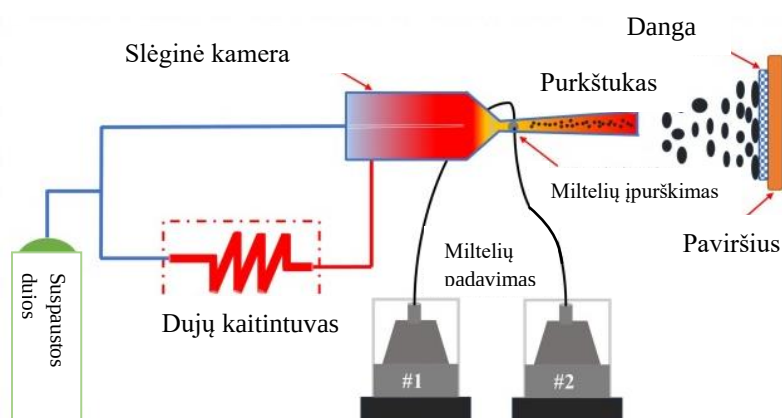


9 pav. Purškimo lydant liepsna ir naudojant pridėtinę vielą principinė schema [21]

Pagrindinis skirtumas tarp purškimo liepsna ir vielos purškimo yra naudojamos dangos medžiagos forma. Purškiant liepsna paprastai naudojami milteliai, o vielos purškimui naudojama vientisa viela. Šis medžiagos formos skirtumas gali turėti įtakos metodo tikslumui, kontrolei ir tinkamumui konkrečioms reikmėms. Kai reikia labiau kontroliuojamo ir tikslesnio dangos uždėjimo, dažnai pirmenybė teikiama vielos purškimui ją lydant liepsna [11].

1.3.3. Inovatyvūs liejimo metodai

Šaltasis purškimas yra novatoriškas ir netradicinis būdas padengti dangas, įskaitant babito dangą, nes tai gali būti atliekama esant neigiamai temperatūrai. Šis pažangiausias procesas naudoja kinetinę energiją, todėl babito dalelės lėkdamos viršgarsiniu greičiu kontaktuoja su dengiamu paviršiumi, ant kurio jos prilimpa ir sudaro patvarią dangą. Skirtingai nuo tradicinių terminio purškimo metodų, kurie apima dangos medžiagos lydymą, šaltas purškimas atliekamas esant žemesnei nei medžiagos lydymosi temperatūrai, kad būtų išvengta terminio skilimo. Ši naujovė suteikia keletą privalumų, įskaitant galimybę padengti temperatūrai jautrius pagrindus ir gauti tikslų padengimą su minimaliu šilumos poveikiu. Dėl to šaltas purškimas tampa vis svarbesnis tose pramonės šakose, kuriose itin svarbu išsaugoti jautrių komponentų vientisumą. Šis metodas yra pažangių medžiagų mokslo ir tikslios inžinerijos derinys, užtikrinantis, kad babito dangas būtų galima padengti aukštu tikslumu ir efektyvumu net esant neigiamai aplinkos temperatūrai [12].

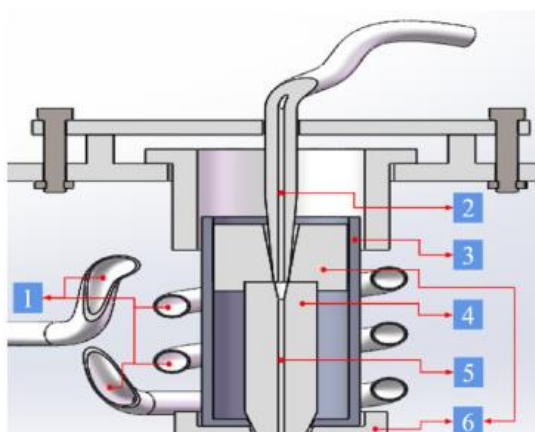


10 pav. Šaltojo purškimo principinė schema [12]

3D spausdinimas sukėlė revoliuciją gamybos srityje, o dabar jis taikomas ir babito dangų technologijose. Babito 3D spausdinimas apima sudėtingų babetu dengtų detalių kūrimą, atliekamą

sluoksnis po sluoksnio. Šis naujoviškas metodas turi keletą aiškių pranašumų. Pirma, jis leidžia tiksliai ir kontroliuojamai nusodinti babito medžiagą, leidžiančią sukurti sudėtingą geometriją, kurią kažkada buvo sunku pasiekti. Antra, tai sumažina medžiagų švaistymą, nes procese naudojama tik būtina babito medžiaga. Be to, 3D spausdinimas gali būti labai efektyvus, todėl sutrumpėja laikas ir darbo apimtis, reikalingas dengimui.

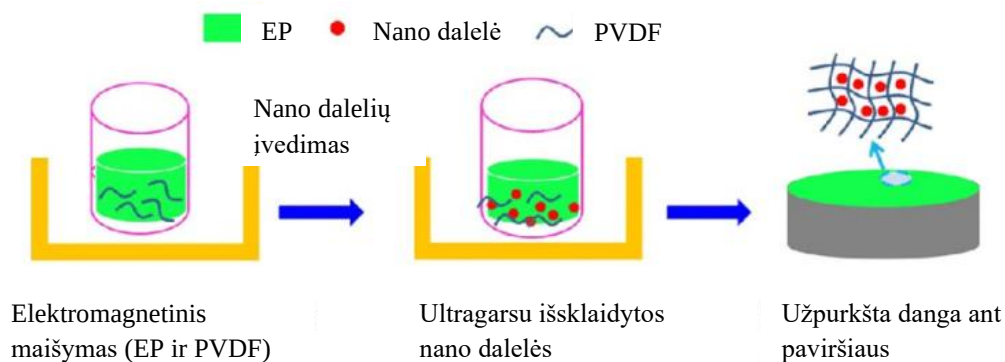
Vienas iš pastebimų babito 3D spausdinimo pranašumų yra jo tinkamumas bandomiesiems arba vienetiniams komponentams. Inžinieriai ir gamintojai gali suprojektuoti ir spausdinti babetu padengtas detales, pritaikytas specifiniams reikalavimams, todėl tai yra puikus pasirinkimas kuriant prototipus mažomis partijomis. Nors babito dangų 3D spausdinimas vis dar yra pradinėje vystymosi stadijoje, jo potencialas pasiūlyti įmantrios formos, efektyvias ir tikslias babito dangas daro jį įdomiu ateities dengimo technologijos procesu. Kadangi ši technologija ir toliau tobulėja, ji gali pakeisti babito dangų esamus dengimo būdus įvairiose pramonės šakose, siūlydama lanksčius sprendimus, atitinkančius kintančius šiuolaikinės gamybos ir remonto poreikius [13].



- | | |
|-----------------------------|---------------------------|
| 1 – Kaitinimo ritė | 2 – Padavimo vamzdelis |
| 3 – Keramikinis indas | 4 – Grafito purkštukas |
| 5 – Keramikinio indo atrama | 6 – Vielos lydymo kanalas |

11 pav. Babito 3D spausdinimo principinė schema [13]

Nanostruktūrinės babito dangos yra pažangiausias tribologijos ir paviršių inžinerijos metodas kuriant dangas. Šios dangos yra sukurtos nanoskalėje, o babito medžiaga dažnai nanodalelių pavidalu, sukurta taip, kad jos struktūra būtų kontroliuojama ir tiksliai įvertinama. Šis tikslumo lygis suteikia daug privalumų, ypač detalių paviršių tribologinių savybių srityje. Nanostruktūrinės babito dangos pasižymi išskirtiniu atsparumu dilimui, trinčiai ir pagerinta laikomąja galia. Jų itin smulki struktūra leidžia glaudžiau liestis su dengiamais paviršiais, sumažina nusidėvėjimo tikimybę ir pagerina bendrą dengtų komponentų eksploatavimą. Be to, nanoskalės struktūra gali būti pritaikyta tam, kad atitiktų specifinius reikalavimus, todėl tai yra universalus sprendimas įvairioms reikmėms [14]. Vienas iš svarbiausių nanostruktūrinių babito dangų privalumų yra galimybė pailginti mašinų tarnavimo laiką ir sumažinti priežiūros išlaidas. Šios dangos, teikiančios itin efektyvius ir patvarius sprendimus pramonės šakoms, kuriose svarbiausia tikslumas, ilgaamžiškumas ir našumas yra modernios paviršių inžinerijos priešakyje [15]. Nanotechnologijoms toliau tobulėjant nanostruktūrinės babito dangos yra ruošiamos kaip pagrindinė technologija didinant įvairių sektorių mašinų patikimumą ir efektyvumą. Didėjant tvarumui, vis didesnis dėmesys skiriamas ekologiškiems babito dengimo metodams, kuriais siekiama sumažinti atliekas ir poveikį aplinkai dengimo proceso metu.



12 pav. Nanostruktūrinės babito dangos padengimo principinė schema [22]

1.4. Babito medžiagos savybių, panaudojimo galimybių ir technologijų apibendrinimas

Apibendrinant galima pasakyti, kad babito dengimo technologijos nuo jų atsiradimo labai pasikeitė – nuo tradicinių liejimo metodų iki pažangių terminio purškimo technologijų ir net nano-dalelių panaudojimo. Naujovės, įskaitant šaltą purškimą, 3D spausdinimą ir nanotechnologijas, yra tobulinamos, kad dar labiau pagerintų babito dangų našumą ir universalumą ir tenkintų nuolat kintančius įvairių pramonės šakų poreikius. Šios naujovės ne tik pagerina dangų kokybę, bet ir sprendžia aplinkos bei tvarumo problemas, todėl babito dangos tampa dar aktualesnės šiuolaikinėje pramonėje.

Dengimo metodai, įskaitant tradicinius ir naujoviškus metodus, yra nuolat tobulinami. Nors nauji ir pažangiausi metodai, tokie kaip babito 3D spausdinimas ir nanostruktūrinės babito dangos, užtikrina didelį tikslumą ir dengimo proceso našumą, reikia įvertinti didelį ekonominį iššūkį. Šie novatoriški metodai dažnai reikalauja didelių pradinių išlaidų, todėl daugeliui pramonės šakų jie kol kas vis dar sunkiai praktiškai realizuojami [16].

Todėl pragmatiškai žvelgiant, atsiranda naujovių ir tradicijų pusiausvyra. Tradiciniai metodai, tokie kaip purškimas liepsna ir vielos purškimas deginant liepsną, išlieka ekonomiškai perspektyvūs sprendimai daugeliui pramonės sričių ir yra efektyvus bei patikimi. Dengimo technologijoms ateityje gali prireikti tradicinių ir naujoviškų metodų derinio. Išnaudodami kiekvieno metodo privalumus, gamybininkai gali pasiekti ekonomiškai efektyvių ir našumą gerinančių sprendimų. Tobulėjant technologijoms, perėjimas prie naujoviškų metodų gali tapti labiau įmanomas. Paminėtina tai, kad naudojant jungtinį modelį, užtikrinama, kad gamybos įmonės gali pasinaudoti tiek tradicijų, tiek naujovių pranašumais, kartu stebėdamos ir įvertindamos šių dienų ekonominę realybę [17].

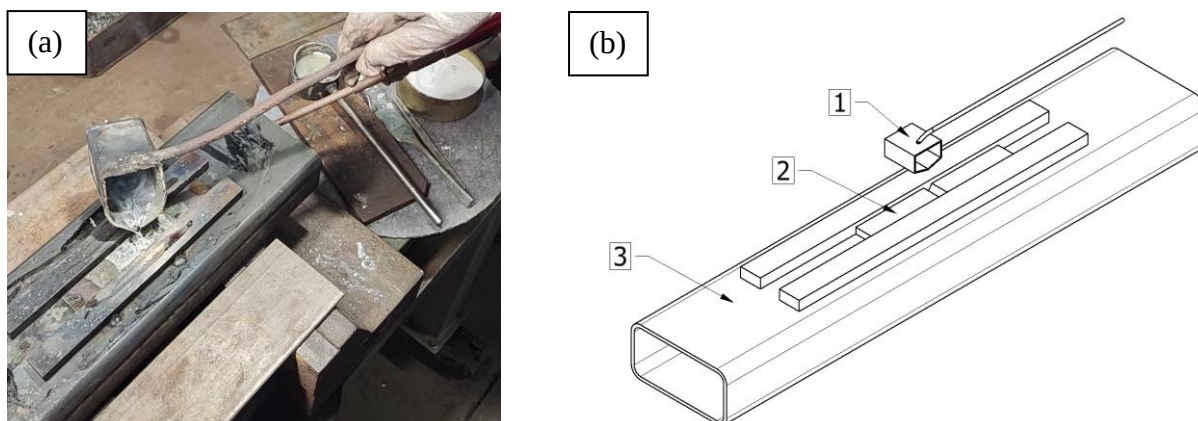
2. Eksperimentiniame tyrime naudojamos babito liejimo technologijos

Eksperimentinių dengimo metodų bandymų srityje įvairovė yra labai svarbi. Naudojant turimus metodus, galima įvertinti veikimo ir taikymo skirtumus. Atsižvelgiant į Lietuvos pramonės galimybes, pasirinktos trys išskirtinės eksperimentinės technologijos – lydimas krosnyje ir liejimas tiesiai ant paviršiaus iš tiglio, liejimas tiesiai ant paviršiaus babitą lydant su liepsna, liejimas tiesiai ant paviršiaus lydymui naudojant elektrolanką su volframo elektrodu (inertinių dujų aplinkoje). Šios technologijos yra kurtos šio projekto metu ir yra būdingos tik su šiuo projektu susijusiose srityse. Pramonėje tokių metodų taikymas nepaplitęs, todėl eksperimento metu tikimasi išvelgti geriausią technologiją ir pagrįsti jos platesnį panaudojimą.

Liejimas krosnyje ir išpylimas ant paviršiaus įkūnija tradicinį metodą, kai babito medžiaga išlydoma kontroliuojamoje krosnies aplinkoje, o po to pilama ant pagrindo. Liepsnos naudojimas vyksta kitu būdu, naudojant degimo galią, kad medžiaga išsilydytų tiesiai ant paviršiaus. Naudojant elektrolankinį metodą su volframo elektrodu, dengiant dangas naudojama elektros energija, kurios kaip šaltinio pagrindu sukuriama elektros išlydis inertinių dujų aplinkoje ir taip babitas išlydomas taip pat tiesiai ant paviršiaus. Ištyrus šių metodų skirtumus, buvo įgyta vertingų išvalgų apie atitinkamus jų pranašumus ir apribojimus. Po eksperimentinių tyrimų įvertinta tokie veiksniai kaip kaina, greitis, tikslumas ir dangos kokybė. Sistemingai eksperimentuojant, buvo nustatyti optimalūs metodai konkrečioms reikmėms, užtikrinant tinkamą pusiausvyrą tarp naujovių ir tradicijų, o tai lemia ekonomiškumą ir aukštos kokybės dangų sprendimus.

2.1. Lydimas krosnyje ir liejimas tiesiai iš tiglio

Taikomoms reikmėms, kurioms reikalingas tikslumas ir patikimumas, babito lydymo krosnyje ir pylimo tiesiai ant paviršiaus metodas yra efektyvus ir kontroliuojamas sprendimas. Ši technika apjungia babito lydymo krosnyje patikimumą ir tiesioginio naudojimo patogumą (13 pav.).



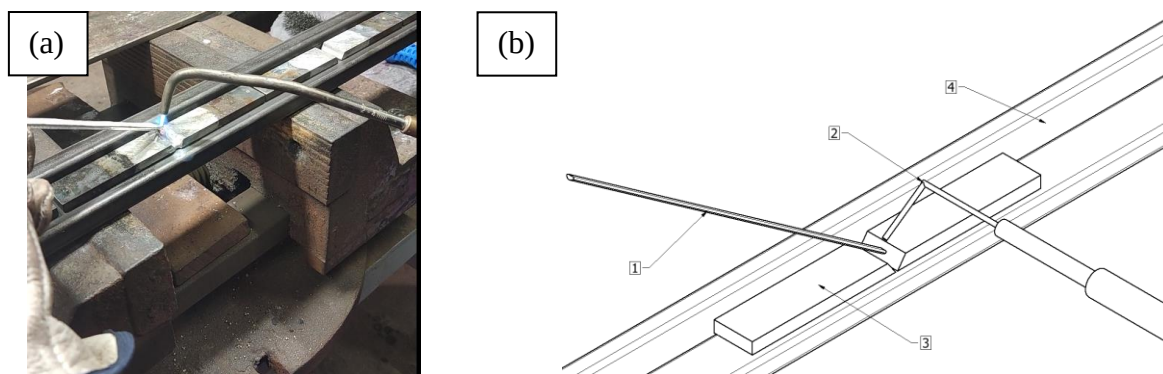
13 pav. Išlydyto babito pylimo tiesiai ant paviršiaus technologija: (a) – liejimo proceso nuotrauka, (b) – technologijos eskizas, kur poz.1 – tiglio, 2 – „V“ formos bandinio ruošinys (žr. 3.3 sk.), 3 – liejimo stendas (žr. 3.4 sk.)

Procesas prasideda kontroliuojamu babito lydymu krosnyje, leidžiančiu optimaliai reguliuoti temperatūrą ir lydinio rafinavimą. Kai babitas pasiekia skystą būseną, jis yra rafinuojamas ir atsargiai pilamas ant tikslinio paviršiaus. Šis metodas pasitelkiant skaičiavimus gali sumažinti medžiagų švaistymą, kai ant paviršiaus išpilamas tikslus kiekis medžiagos ir užtikrina tolygų dangos pasiskirstymą, o tai prisideda prie sklandesnio ir efektyvesnio dengimo. Nors šis metodas nėra toks automatizuotas kaip kai kurios tradicinės (pvz. išcentrinis liejimas) ar šiuolaikinės technikos, jo

kruopštumas garantuoja tolygumą, todėl jis puikiai tinka toms reikmėms, kur būtinos lygios, nuoseklios dangos. Sujungus krosnies lydymo pranašumus su tiesioginio liejimo praktiškumu, šis metodas užtikrina puikų praktiškumo balansą.

2.2. Lydymas atvira liepsna, deginant dujas

Kai kuriose metoduose tikslumas ir valdymas yra svarbiausi, todėl reikalingas praktiškesnis požiūris. Šio kruopštaus proceso pavyzdys yra babito lydymas tiesiai ant paviršiaus naudojant deguonies ir propano dujų mišinio sugeneruotą liepsną, rankiniu būdu stumiant babito medžiagą strypelio pavidale (14 pav.). Skirtingai nuo automatizuotų metodų, ši technika reikalauja kvalifikuoto meistriškumo, kad būtų galima valdyti liepsną ir tiksliai pridėti babito medžiagos. Šis metodas suteikia keletą privalumų, ypač tais atvejais, kai reikia padengti sudėtingą geometriją arba netaisyklingus paviršius. Meistriškas lydymas užtikrina, kad babitas tiksliai priliptų prie pagrindo ir būtų gautas tolygus sluoksnis. Be to, šis metodas leidžia reguliuoti parametrus realiu laiku, o tai leidžia operatoriui prisitaikyti prie konkrečių darbo reikalavimų.



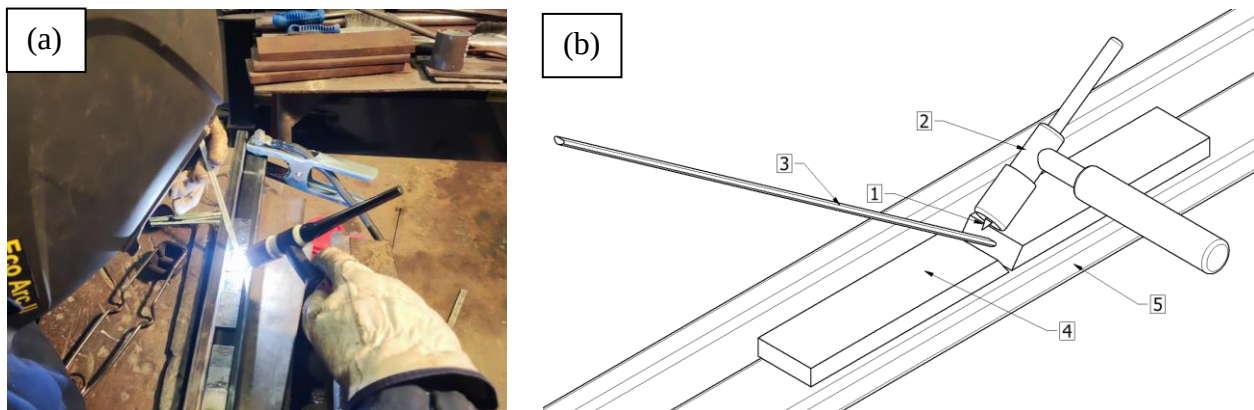
14 pav. Babito lydymo su oksiduojančia liepsna technologija: (a) – liejimo proceso nuotrauka, (b) – technologijos eskizas, kur poz.1 – babito pridėtinė medžiaga, 2 – dujinis degiklis, 3 – „V“ formos bandinio ruošinys (žr. 3.3 sk.), 4 – liejimo stendas (žr. 3.5 sk.)

Nors šis rankų darbo metodas gali būti ne taip plačiai taikomas kaip automatizuoti procesai, jis siūlo pritaikytą ir lankstų sprendimą dangoms, kuriose svarbiausia yra tikslumas ir pritaikomumas. Tai atspindi tradicinio meistriškumo ir technologijų derinį, parodantį universalumą ir išsiringumą dengimo technologijų pasaulyje. Literatūriniuose šaltiniuose šis metodas aprašomas kaip viena iš dangų remonto galimybių, kur būtina pataisyti nedideles lokalias pažeistas vietas, tam kad neperlieti viso paviršiaus dangos. Tačiau šio metodo panaudojimo kaip pilnos dangos liejimo technologijos paplitimas nėra žinomas ar aprašytas, todėl eksperimento metu atlikti tyrimai leis suprasti šio metodo kaip lygiaverčio kitiems, pilnos dangos padengimo, metodams. Šis metodas suteikia įtikinamą pranašumą, kai žiūrima pro ekonomiškumo objektyvą. Nors jis gali būti ne toks automatizuotas ar technologiškai pažangus kaip kai kurios kitos dengimo technologijos, jos ekonominė nauda akivaizdi.

Visų pirma, šis metodas pašalina specializuotų, brangių mašinų poreikį, todėl tai yra prieinamas ir ekonomišką pasirinkimas. Jis remiasi rankų darbo įgūdžiais, todėl sumažėja pradinės investicijos, reikalingos automatizuotoms sistemoms. Be to, tai sumažina medžiagų švaistymą, nes babito eksploatacinės medžiagos pridedamos tiksliai, sumažinant perteklinį naudojimą ir galimas išlaidas. Taip pat, šis rankų darbo metodas dažnai reikalauja mažiau išteklių, susijusių su įrenginių priežiūra ir taisymu, o tai prisideda prie ilgalaikių išlaidų taupymo. Nors tai gali būti laikoma tradiciniu metodu, jo finansinis atsargumas yra įtikinamas argumentas dėl nuolatinio jo aktualumo ir pritaikymo įvairiose pramonės šakose, kur ekonomiškumas yra svarbiausias dalykas.

2.3. Lydymas elektrolanku

Technologijų srityje babito lydymo būdas tiesiai ant paviršiaus naudojant suvirinimo lanką, sukuriamą iš volframo elektrodo inertinių dujų aplinkoje, suteikia unikalų tikslumo ir rankinio valdymo derinį. Šiam metodui būdingas kruopštus ir apgalvotas babito eksploatacinių medžiagų, paprastai iš anksto paruoštų strypų formų, įvedimas į suvirinimo lanką. Procesas vystosi, kai suvirinimo lankas, palaikomas volframo elektrodo apsauginėje inertinių dujų aplinkoje, sukuria sąlygas, palankias tiksliam babito lydymui. Kadangi sunaudojami babito strypeliai yra tiekiami rankomis į lanką, jie yra išlydomi ir tankiai nusodinami ant tikslinio paviršiaus (15 pav.). Šis rankinis valdymas užtikrina tolygų ir nuoseklų dangos sukibimą, pritaikytą specifiniams darbo reikalavimams.



15 pav. Babito lydymo elektrolankinio metodo technologija: (a) – liejimo proceso nuotrauka, (b) – technologijos eskizas, kur poz.1 – Volframo elektrodas, 2 – suvirinimo degiklis, 3 – babito pridėtinė medžiaga, 4 – „V“ formos bandinio ruošinys (žr. 3.3 sk.), 5 – liejimo standas (žr. 3.5 sk.)

Šis metodas taip pat nėra plačiai žinomas ar aprašytas, kadangi pramonėje labiau paplitę elektrolankiniai purškimo metodai, kur išlydytos dalelės ipurškiamos ant paviršiaus. Kadangi pramonėje plačiai paplitę suvirinimo metodai, buvo suprojektuotas ir sukurtas metodas paremtas suvirinimo procesu, dar kitaip žymimu „141“, „TIG“ arba „GTAW“. Šis metodas ypač naudingas dirbant su sudėtingos geometrijos formomis arba netaisyklingais paviršiais, kur svarbiausia tikslumas ir pritaikomumas. Nors tam gali prireikti kvalifikuoto meistriškumo, jis pasižymi aukštu valdymo ir lankstumo laipsniu, todėl gaunamos tankios ir gerai sukibusios dangos. Šiuolaikinės suvirinimo technologijos suliejimas su viena iš tradicinių babito liejimo technikų ranka lemia dengimo metodą, kuris pasižymi tikslumu ir patikimumu įvairioms pramonės reikmėms.

2.4. Eksperimentiniuose tyrimuose naudotų liejimo technologijų apibendrinimas

Apibendrinant išskirtos trys unikalios eksperimentinės technikos, kurių privalumai ir trūkumai vertinami atsižvelgiant į Lietuvos pramonės galimybes. Lydymas krosnyje ir išpylimas ant paviršiaus, naudojant tiglį, yra efektyvus metodas, jungiantis krosnies lydymo patikimumą su tiesioginiu išpylimu ant paviršiaus. Tai yra tinkama technika reikmėms, kur būtinas technologinis paprastumas. Proceso kruopštumas užtikrina tolygų dangos pasiskirstymą, taip prisidedant prie sklandaus ir efektyvaus dengimo. Tačiau mikrostruktūra gali pasižymėti įvairių grūdelių dydžio skirtumais, o aušinimo greitis gali turėti įtakos fazių pasiskirstymui matricoje. Galimas didelių intermetalinių junginių būvimas, turintis įtakos bendram vientisumui.

Lydymas atvira liepsna, deginant dujas, yra rankų darbo metodas, reikalaujantis meistriškumo, bet suteikiantis pritaikomumą sudėtingesnėms geometrinėms formoms ir netaisyklingiems paviršiams.

Šis metodas pasižymi tiksliai parametru valdymu realiu laiku, leidžiančiu operatoriui prisitaikyti prie konkrečių darbo reikalavimų. Mikrostruktūra gali turėti skirtingo dydžio grūdelių struktūrą, kuriai įtakos turi kaitinimo ir lydymosi procesas naudojantis propano ir deguonies mišinio liepsną. Dėl greito kietėjimo, kai jis liečiasi su paviršiumi, gali susidaryti smulkiagrūdė struktūra. Priklausomai nuo paviršiaus švarumo ir išlydyto babito kokybės, mikrostruktūroje gali būti intarpų arba priemaišų. Metodo atlikimas, žmogiškojo faktoriaus įtakojamas, gali lemti intermetalinių junginių pasiskirstymą. Mikrostruktūros homogeniškumo pasiekimą gali įtakoti tokie veiksniai kaip šilumos pasiskirstymo tolygumas ir lydymo technika. Srityse, kuriose liepsnos intensyvumas skiriasi, gali būti atitinkamų mikrostruktūros skirtumų. Idealiu atveju mikrostruktūra turėtų gerai sukibti su pagrindo medžiaga ir sudaryti tvirtą sukibimą. Propano ir deguonies liepsnos metodas paprastai apima greitą aušinimą dėl sąlyčio su vėsesniu pagrindu, o tai gali turėti įtakos kristalų dydžiui ir pasiskirstymui mikrostruktūroje.

Lydymas elektrolanku su volframo elektrodu yra unikalus metodas, kuris jungia suvirinimo technologijas su tradicinėmis babito liejimo technikomis. Ši technika yra naudinga dirbant su sudėtingomis geometrinėmis formomis arba netaisyklingais paviršiais, kur reikalingas aukštas tikslumas ir pritaikomumas. Nepaisant kvalifikacijos poreikio, šis metodas pasižymi aukštu valdymo ir lankstumo laipsniu. Šis metodas apima babito liejimą naudojant volframo elektrodą argono dujų aplinkoje, o mikrostruktūra gali būti sudaryta iš itin smulkių grūdelių, o inertinių dujų naudojimas padeda sumažinti oksidaciją. Kontroliuojama aplinka gali sudaryti nuoseklesnę dangą su mažiau priemaišų.

Ištyrus šių metodų skirtumus, akcentuojamas optimalus metodų pasirinkimas atsižvelgiant į konkrečias reikmes, užtikrinant tinkamą pusiausvyrą tarp naujovių ir tradicijų. Ekonomiškumo prizme taip pat išryškinama, pabrėžiant finansinius aspektus, paprastesnį įrenginių priežiūros poreikį ir mažesnę medžiagų švaistymą, kurie gali būti svarbūs verslo perspektyvų kontekste. Išsamus eksperimentinių dengimo metodų vertinimas ir optimalaus metodo pasirinkimas atrodo kaip svarbus žingsnis, siekiant efektyviai panaudoti turimas žinias ir patirtį metalo gamybos sektoriuje.

3. Babito lydymo ir liejimo technologinių procesų analizė, gautų dangų savybių tyrimai

Atliekant išsamų dengimo eksperimentą, buvo naudojami trys skirtingi 2 skyriuje aprašyti metodai kurie buvo stebimi ir kruopščiai analizuojami. Šiuo eksperimentu siekiama surinkti daugybę techninių duomenų atliekant matavimus realiuoju laiku ir sukurti fizinius bandinius, kad būtų galima sukurti pagrindą tolesniems ardomiesiems ir neardomiesiems bandymams. Kiekvienas metodas buvo kruopščiai stebimas, matuojant tokius parametrus kaip paviršių ir medžiagų temperatūra, pridėtinių medžiagų išėiga, įrangos techniniai parametrai visų pavienių technologijų fazių metu. Tikslus suvirinimo lanko metodo babito medžiagų valdymas bus vertinamas kartu su vientisumu, pasiektu taikant krosnies lydymo ir tiesioginio liejimo techniką, ir liepsnos naudojimo ant paviršiaus paprastumu. Duomenų rinkimas realiuoju laiku proceso metu leis nuodugniai suprasti tiesioginį metodų veikimą.

Po bandinių gamybos buvo atliekami tolimesni gautų dangų struktūros tyrimai ir bandymai, kad būtų galima analizuoti dangos mikrostruktūrą ir surišimo sąsajas. Neardomieji metodai, tokie kaip bandymas skverbikliais ir radiografinis tyrimas, padės visapusiškai įvertinti dangų kokybę ir vientisumą. Šis daugialypis požiūris į eksperimentavimą užtikrina, kad tiek stebėjimai realiuoju laiku, tiek tolesnės analizės suteiks neįkainojamų įžvalgų apie kiekvieno metodo stipriąsias ir silpnąsias puses, taip sudarydamos sąlygas priimti pagrįstus sprendimus dangų taikymo srityje.

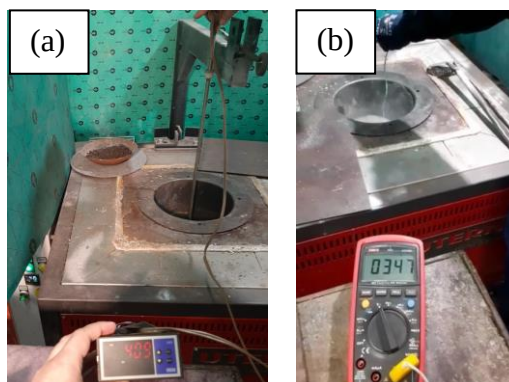
3.1. Babito kaip pridėtinės medžiagos paruošimas

Babito liejimo procesas eksperimento metu prasideda nuo babito medžiagos paruošimo strypelių pavidalu. Šie strypeliai naudojami kaip įvairių liejimo metodų, pavyzdžiui, liepsnos ir elektrolanko naudojimas babito dangoms padengti, pagrindiniai komponentai. Šis pradinis formavimo procesas yra svarbus žingsnis siekiant užtikrinti galutinių babito dangų tikslumą ir kokybę. Todėl vienas iš svarbiausių momentų yra išlaikyti pradinę babito medžiagos struktūrą perlietuose strypeliuose.

Babito medžiaga, pasižyminti antifrikinėmis ir nenusidėvėjimo savybėmis, yra kruopščiai suformuojama į strypelio formas. Šie strypeliai yra patogi ir kontroliuojama priemonė tolesniam liejimui, nesvarbu, ar tai būtų guolių, įvorių ar kitų svarbių komponentų padengimas babito dangomis ar, kaip šiuo atveju, eksperimentiniams tyrimams. Babito medžiagos formavimo į strypelius pranašumas yra galimybė išlaikyti vienodumą ir nuoseklumą liejimo procese. Šių babito strypelių panaudojimo idėja yra paremta suvirinimo procesuose naudojamų pridėtinių medžiagų, tokių kaip elektrodai, suvirinimo vielos ir kt. principu.

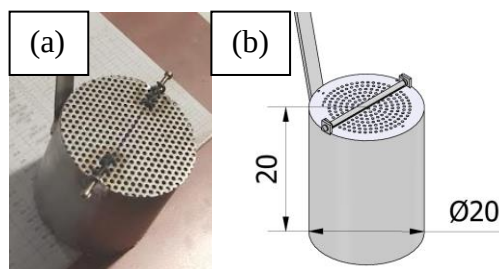
Paruošus šiuos babito strypelius, jie tampa pagrindine pridėtine medžiaga liejimo metoduose, kuriuose dalyvauja tiesioginis lydymo ant paviršiaus būdas. Strypeliai į lydymo procesą kruopščiai pridedami rankomis, priklausomai nuo konkretaus naudojamo metodo. Šis tikslumas užtikrina, kad gautos babito dangos saugiai ir tolygiai priliptų prie metalinio pagrindo, atitinkančios griežtus standartus, keliamus mašinų komponentams, kur patikimumas ir našumas yra svarbiausi.

Babito medžiagos turi būti išlydomos tiglyje elektrinėje šildymo krosnyje su automatiniu temperatūros valdymu (16 pav.). Tiglis turi būti išvalytas nuo ankstesnio lydymosi likučių, šlakų, oksidų ir pašildytas iki 350–400° C temperatūros. Esant drėgmei įkrovos medžiagose, prieš dedant į tiglį, būtina jas išdžiovinti kaitinant iki 100° C. Atlikus šiuos pasiruošiamuosius darbus galima krauti lydymui paruoštą medžiagą ir atlikti lydymo procesą.



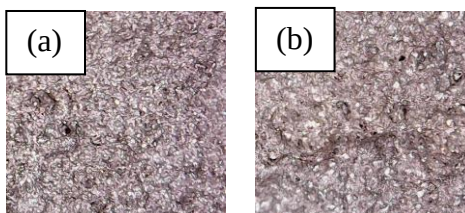
16 pav. Elektrinė šildymo krosnis „Uterna“ su automatiniu temperatūros valdymu: (a) – tiglio paruošimas lydymui, (b) – babito lydymas

Pakaitinus medžiagą iki nustatytos lydymosi temperatūros – $370 \pm 10^\circ \text{C}$, nuo lydalo paviršiaus pašalinami nešvarumai (šiukšlės) ir rafinuojama dehidratuotu amonio chloridu, kuris įleidžiamas į lydalą naudojant specialų samtį (17 pav.), judantį išilgai vonios dugno, kol nustos sklisti dujų burbuliukai. Kai babito medžiaga yra kaitinama krosnyje, dehidratuotas amonio chloridas naudojamas kaip flusavimo priemonė, išvalanti babilitą nuo priemaišų ir teršalų.



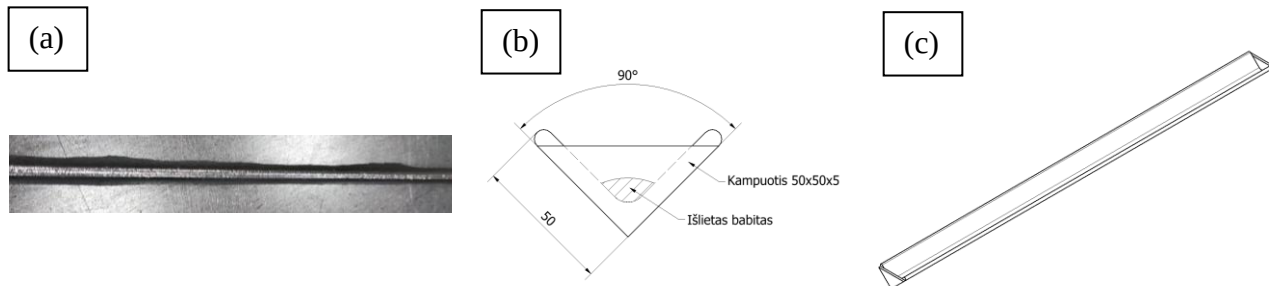
17 pav. Rafinavimui skirtas maišymo samtelis: (a) – samtelio nuotrauka, (b) – samtelio eskizas

Šis žingsnis yra labai svarbus, nes tai užtikrina, kad vėliau lydomas babilas nepriekaištingai priliptų prie metalo. Kaitinimo metu išsiskiriančios amoniako dujos atlieka dvejopą vaidmenį – jos ne tik padeda pašalinti oksidus ir nešvarumus iš pagrindo, bet ir veikia kaip valymo priemonė, skatinanti babito medžiagos puikų gebėjimą pasklisti kieto kūno paviršiuje ir sukibimą su juo. Dehidratuotas amonio chloridas atlieka lemiamą vaidmenį gerinant bendrą pačios babito medžiagos kokybę. Jis padeda tobulinti babito lydinį, pagerina jo grynumą ir savybes, galiausiai prisideda prie puikių antifrikcinių ir nusidėvėjimo savybių (18 pav.).



18 pav. Babito medžiagos skerspjūvių makro vaizdas: (a) – perlietas babilas į strypelį, (b) – babito kaladėlė

Karštas babilas oksiduoja, tad reikia kiek įmanoma trumpinti kaitinimo ir užliejimo laiką. Be to, kaitinant babilitą reikia intensyviai maišyti, kad būtų tolygesnė ir smulkesnė grūdelių struktūra (18 pav. a). Paruošto babito lydalo kiekio turi pakakti formos (19 pav. c) užliejimui vienu užpylimu. Atskirų formų užliejimui esant išlydytam didesniai babito kiekiui, reikia naudoti iš anksto - iki 300°C pakaitintą specialų samtį ar indą.



19 pav. Babito strypelio liejimas: (a) – Išlietas strypelis, (b) – liejimo formos skerspjūvis, (c) – liejimo formos eskizas

Perlydžius babilą, atliekamas jo cheminės sudėties nustatymas (3 lentelė) siekiu nustatyti ar neišgaravo dalis elementų, tokių kaip stibis, varis ar pats alavas. Vizualinės kontrolės metu įvertinta, ar nėra paviršiuje susidariusių kristalinių sandėkų.

3 lentelė. B-83 markės babito perlietų strypelių cheminė sudėtis, %

Elementas	Fe	Al	Cu	As	Pb	Zn	Sb	Bi	Sn
Dalis, %	0,090	0,002	5,50	0,007	0,034	0,006	12,40	0,001	83,00

Apibendrinant galima pasakyti, kad babito strypelių paruošimas sudaro sąlygas tiksliam liejimui įvairiose pramonės srityse. Babito medžiagos formavimas į strypelius ne tik palengvina liejimo procesą, bet ir užtikrina, kad galutinės babito dangos pasižymėtų aukšta kokybe ir patikimomis savybėmis, dėl kurių babilas tampa patikima medžiaga antifrikcinių ir mažo nusidėvėjimo priemonių srityje.

3.2. Paviršiaus paruošimas liejimui

Pirmoji pagrindinė gero liejimo ir babito sukibimo su metalu sąlyga yra išankstinis pasiruošimas, kurį sudaro nešvarumų šalinimas ir dengimas alavu, užtikrinant maksimalią švarą visais šiais etapais. Prieš dengimą babilu būtina atlikti nuriebalinimo, flusavimo ir alavavimo operacijas taikomas visiems babito metodams formuojant dangas. Tinkamas paruošimas yra pradinis ir esminis žingsnis visuose liejimo metoduose. Tai sukuria užtikrintą pagrindą, ant kurio galima užlieti vėlesnę babito medžiagą. Šis paruošimo procesas ne tik pagerina babito sukibimą, bet ir prisideda prie komponentų, kuriuose jis naudojamas, ilgaamžiškumo ir patikimo eksploatavimo.

3.2.1. Nuriebalinimas ir valymas

Paviršiaus valymas nuo nešvarumų, korozijos ir kitų teršalų vykdomas švitrinu popieriumi, vėliniu šepetiu arba grandikliu. Tepalai pašalinami skudurėliu, suvilgytu tirpikliu. Paviršiaus valymo kokybė tikrinama vizualiai. Nuvalytas paviršius turi būti be korozijos, nešvarumų, tepalo dėmių. Nuvalyto paviršiaus negalima liesti rankomis, nešvariais įrankiais. Bandinį reikia imti tik su specialiomis rankenomis ar švariomis replėmis. Jei bandinio paviršius neturi gryno metalo blizgesio, jį reikia dar kartą nuvalyti plieniniu šepetiu, dilde ir švitrinu popieriumi ir dar kartą nuriebalinti. Nuriebalinimo kokybė tikrinama pagal nuriebalinto paviršiaus sudrėkinimą vandeniu. Paviršius, skirtas paliejimui po nuriebalinimo, turi būti kruopščiai nuplaunamas su vandeniu, (rekomenduojama pašildytu iki 80 – 100 °C), tada šaltu tekančiu vandeniu. Ant nuriebalinto paviršiaus neturi būti vandens plėvelės pažeidimų (tepalinų žymių). Paviršiai turi būti dar kartą nuriebalinti, jei lygūs paviršiai lieka nesudrėkinti.

3.2.2. Flusavimas

Metalurgijoje flusavimas yra labai svarbus procesas, kuris atlieka pagrindinį vaidmenį gerinant metalo sujungimo kokybę ir vientisumą. Flusavimas pirmiausia naudojamas tais atvejais, kai reikia sujungti du ar daugiau metalų, pavyzdžiui, kuriant babito dangas, kad būtų užtikrintas tvirtas ir ilgalaikis ryšys. Flusavimo medžiagos yra cheminiai junginiai, kurie, naudojami sujungimo proceso metu, išvalo metalinius paviršius, pašalina oksidus ir sukuria švarų, imlų sukibimui paviršių. Užkirsdami kelią nepageidaujamų priemaišų ir teršalų susidarymui sukibimo sąsajoje, flusavimo medžiagos pagerina išlydyto metalo gebėjimą pasklisti kietojo kūno paviršiuje (t.y. skysčio gebėjimas palaikyti kontaktą su kietu paviršiumi ir jo pusiausvyrą tarp lipniojo tipo (skysčio ir paviršiaus) ir rišlaus tipo (skysčio su skysčiu) tarpmolekulinės sąveikos ang. „*Wettability*“), todėl jis tolygiai pasiskirsto ir sukuria tvirtą ryšį [23].



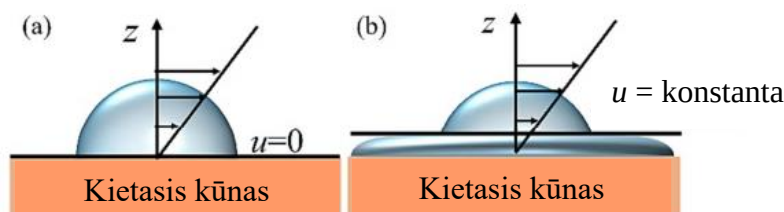
20 pav. Amonio fluorida miltelių trynimasis flusavimo metu

Ši operacija vykdoma įkaitinus bandinius elektrinėje krosnyje iki 380°C . Juos išėmus, ant jų paviršiaus beriami amonio fluorida milteliai (Amonio fluorida – cheminis junginys, sudarytas iš amoniako ir vandenilio fluorida, kuris taip pat pasižymi geromis paviršiaus ėsdinimo savybėmis), kurie yra įtrinami metaliniu vėliniu šepečiu (20 pav.) lygiagrečiai trinant alavo strypelį į įkaitusį bandinio paviršių (22 pav.). Flusavimas yra paruošimo liejimui etapas, kuriame pagrindinį vaidmenį atlieka reagentai, tokie kaip prisotintas cinko chloridas. Jis efektyviai pašalina oksidus ir nešvarumus nuo metalinių paviršių, užtikrindamas, kad paviršius būtų chemiškai aktyvūs ir imlūs babito medžiagai. Šis ėsdinimo veiksmas yra labai svarbus skatinant vienodą ir saugų metalinio pagrindo ir babito dangos sukibimą.

Bandiniai turi būti alavuojami (balinami) iš karto po flusavimo. Naudojant tarpinį kaitinimą, flusavimas kartojamas. Paruoštas paviršius turi būti padengtas lygiu ištisiniu fluso sluoksniu.

3.2.3. Alavavimas (balinimas)

Alavavimas yra kruopštus procesas, naudojamas metaliniams paviršiams paruošti įvairioms reikmėms, pradedant elektros komponentų litavimu ir baigiant tvirtų bimetalinių kompozitų kūrimu. Iš esmės alavavimas apima plono alavo sluoksniu uždėjimą ant metalinio pagrindo paviršiaus, sukuriant apsauginę ir klampią sąsają tolesniems procesams (21 pav. b). Viena iš puikių alavo savybių yra žema lydymosi temperatūra, todėl jis yra pagrindinis litavimo lydinio komponentas. Tai leidžia sukurti tvirtas ir patikimas elektronikos jungtis įvairiuose elektroniniuose įrenginiuose. Be to, dėl alavo atsparumo korozijai jis yra tinkamiausias pasirinkimas dengiant metalus, siekiant apsaugoti nuo nusidėvėjimo ir aplinkos veiksnių. Alavo plastiškumas leidžia lengvai formuoti, todėl tinka daugeliui pritaikymų. Alavas buvo pritaikytas kuriant medžiagas, tokias kaip guolių babito dangos, kurios yra būtinos įvairiose pramonės srityse [23].



21 pav. Skystos fazės gebėjimo pasklisti kietojo kūno paviršiumi skirtingomis sąlygomis schema, (a) – kai paviršius ne slidus, (b) – kai paviršius iš anksto paruoštas padengiant plėvele [23].

Vienas iš pastebimų alavavimo panaudojimo būdų yra metalo pagrindo paruošimas babito paliejimui kadangi jis padeda išvengti oksidacijos ir korozijos, tuo pačiu skatinant saugų liejimo procesą. Šis procesas taip pat padidina paviršiaus savybes išlydytam babitui tolygiai pasklisti ant kieto metalinio paviršiaus, užtikrinant, kad lydmetalio tekėtų sklandžiai ir efektyviai sukibtų taip užtikrinant geresnius adheziinius ir koheziinius ryšius, kai sklido greitis yra konstanta, tuo tarpu be paruošimo skystos fazės sklido greitis yra lygus 0 (21 pav.) [23].

Babito dangų kontekste naudojamas alavavimas, kad būtų paruoštas kietas paviršius išlydytai babito medžiagai padengti. Padengus paviršių alavo sluoksniu, jis tampa klampesnis babitui, todėl geriau sukimba ir padidėja bendras kompozito vientisumas. Alavavimas yra tikslus ir esminis daugelio metalurgijos procesų žingsnis, suteikiantis dvigubą apsaugą ir pagerinimą. Nesvarbu, ar tai būtų elektronika, kompozitų gamyba ar kitos pramonės sritys, šis paviršiaus paruošimo būdas atlieka pagrindinį vaidmenį užtikrinant metalinių jungčių ir dangų kokybę ir patikimumą [23].

Alavavimas atliekamas alavą trinant į kito kūno paviršių. Aukštos kokybės babito paliejimui (B88, B83, B83S) turi būti naudojamas 02 arba 03 markės alavas pagal GOST 860-75x. Alavavimas atliekamas pirmiausiai visą bandinio paviršių sutepant sočiuoju cinko chlorido tirpalu, vėliau danga padengiama sausais amonio chlorido milteliais (Amonio chlorido lydymosi temperatūra – 338°C, o užsiliepsnojimo temp. – 400°C), po to ant jos uždedami alavo gabalėliai. Bandinys pašildomas iki 270–300 °C ir, kai tik alavas pradeda tirpti, jis ištrinamas ir paskirstomas per visą paviršių su vielinių šerelių šepečiu (22 pav.). Trinant užtikrinama, kad alavas ant paviršiaus pasklistų lygiu ir plonu sluoksniu.



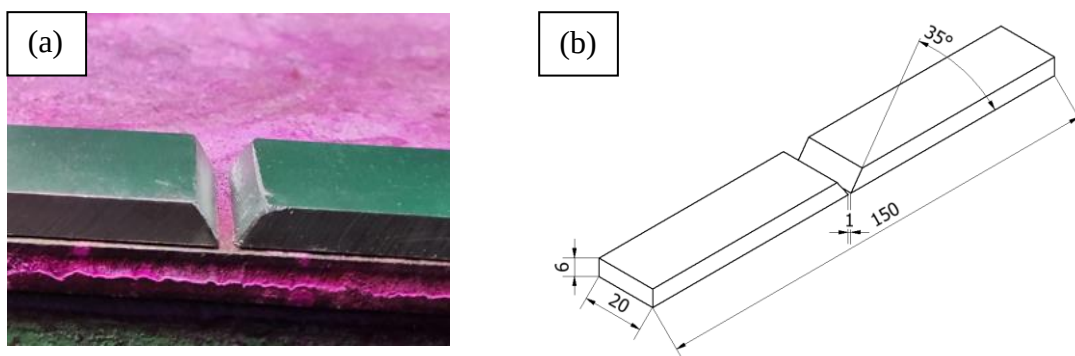
22 pav. Alavo strypelio trynimasis lygiagrečiai atliekant flusavimą

Teisingai užneštas alavo apvalkalas turi būti tolygiai blankios sidabrinės spalvos. Bet kokia kita spalva, pavyzdžiui, gelsva, rodo, kad alavavimo procesas buvo atliktas neteisingai, kad alavas yra oksiduotas ir netinkamas aplydyti babitui. Babitas prie tokio paviršiaus tinkamai neprikibs. Babito liejimo paruošimo procesas yra sudėtingas ir gyvybiškai svarbus etapas, kuris nustato galutinės babito

dangos kokybės ir patikimumo pagrindą. Dėmesys detalėms šiuose procesuose yra būtinas siekiant užtikrinti, kad babito dangos saugiai ir tolygiai priliptų prie metalinių pagrindų, atitinkančios griežtus standartus, reikalingus įvairiose pramonės srityse. Alavavimas yra paskutinis šio kruopštaus pasiruošimo proceso etapas. Jis dar labiau patobulina metalinį paviršių, padidindamas jo imlumą išlydytam babitui. Šis žingsnis yra gyvybiškai svarbus norint sukurti tikslų ir patikimą sukibimą, užtikrinant, kad gautos babito dangos pasižymėtų antifrikcinėmis ir dilimui atspariomis savybėmis, kurių reikalauja įvairios pramoninės šakos.

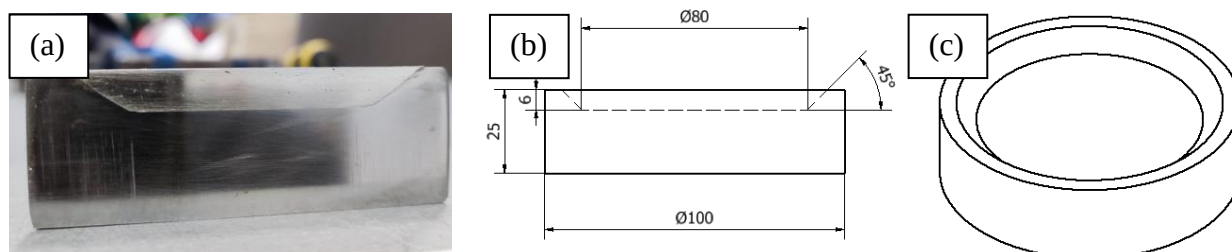
3.3. Eksperimentinių bandinių, papildomų priemonių projektavimas ir jų gamyba

Šioje eksperimentinėje dalyje bandinių kūrimas atspindi išsamų babito dengimo metodų tyrimo tikslumą. Buvo sukurti du skirtingi bandinių tipai, kurių kiekvienas buvo pritaikytas konkreitiems testavimo ir vertinimo procesams. Pirmojo tipo „V formos“ pavyzdį sudaro dvi metalinės plokštelės, kruopščiai sujungiamos taip, kaip suvirinimo bandiniai. Šios plokštelės suformuoja V tipo griovelį, specialiai sukurtą taip, kad tikėtų trims skirtingiems tiriamiems babito dengimo metodams (23 pav.). Šis dizaino pasirinkimas suderinamas su ketinimu išbandyti bandinius tempimui, suteikiant vertingų įžvalgų apie babito dangų struktūrinį vientisumą, sukibimo stiprumą ir mechanines savybes.



23 pav. „V formos“ liejimo bandinio tipas: (a) – pagamintas ruošinys, (b) – ruošinio eskizas

Antrojo tipo „U formos“ pavyzdžiai yra plokščios apvalios konfigūracijos, su vonelę formuojančiomis šoninėmis sienelėmis, bandiniai (24 pav.). Šie bandiniai yra skirti įvairiapusiam vertinimui, kuris apima kietumo tyrimą, cheminės sudėties analizę, skvarbumo testą, radiografinį tyrimą ir mikrostruktūros analizę. Šiuo išsamiu testų rinkiniu siekiama pateikti visapusišką babito dangų veikimo vaizdą, nuo jų fizinių savybių iki struktūrinės sudėties.



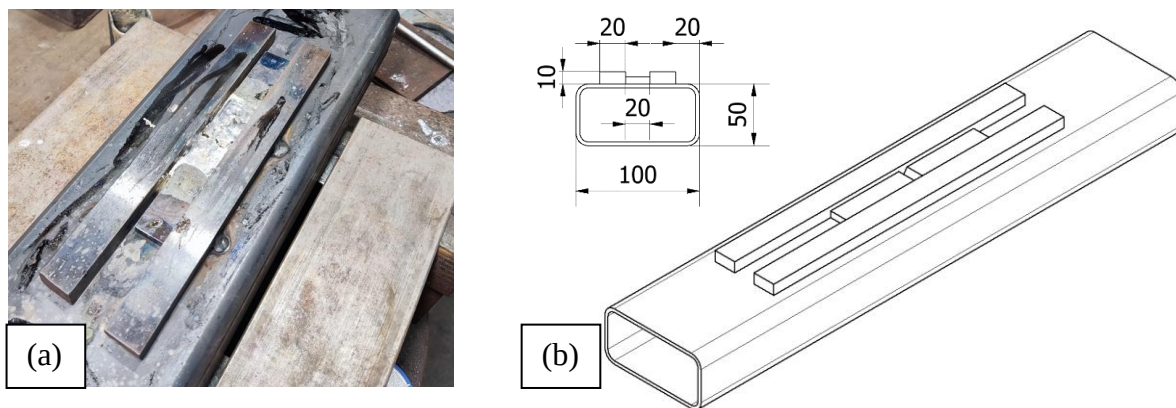
24 pav. „U formos“ liejimo bandinio tipas: (a) – skerspjūvio vaizdas, (b) – ruošinio matmenys, (c) – ruošinio eskizas

Taikant šį dviejų pavyzdžių metodą, eksperimentas gali remtis daugybe duomenų ir įžvalgų, kad būtų galima visapusiškai įvertinti tris babito dengimo metodus. Plokštelės leidžia kiekybiškai įvertinti

tempimo bandymus, o plokšti apvalūs pavyzdžiai palengvina kokybinius dangų savybių ir struktūrinių charakteristikų tyrimus. Kartu šie pavyzdžių dizainai įkūnija kruopštų eksperimento pobūdį, užtikrinant, kad babito dangų įvertinimas būtų kuo išsamesnis.

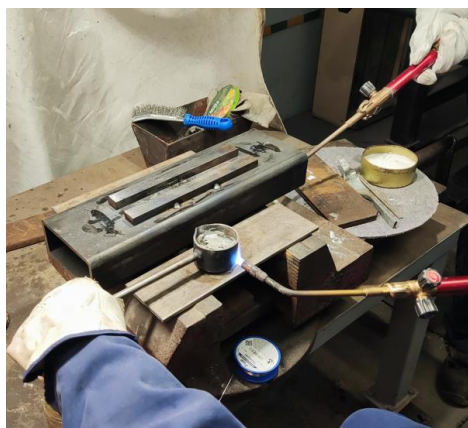
3.4. Lydymo krosnyje ir liejimo tiesiai iš tiglio metodo stebėjimas ir bandinių gamyba

Po atliktų babito medžiagos lydymo ir rafinavimo krosnyje, bandinių paviršiaus paruošimo, flusavimo ir alavavimo operacijų buvo atliekamas pirmųjų bandinių liejimas naudojant tiesioginio pylimo iš tiglio metodą. Kadangi šio metodo liejimo tikslumas apsiriboja įprasto liejimo parametrais, būtina užtikrinti jog liejamas babilas skystoje fazėje neištekės pro šonus gaminant „V formos“ bandinius, todėl šiam tikslui pasiekti buvo suprojektuotas ir pagamintas liejimo stendas (25 pav.).



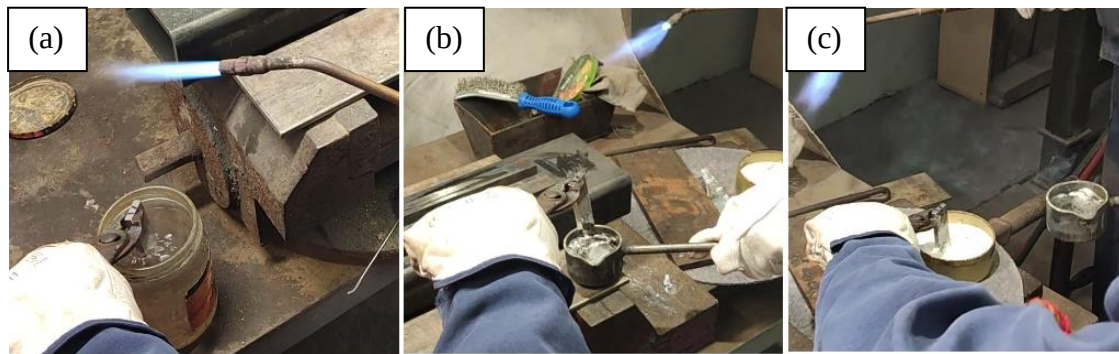
25 pav. Tiesioginio liejimo iš tiglio stendas: (a) – stendo nuotrauka, (b) – stendo eskizas

Kadangi procesas nėra kontroliuojamas pasitelkiant šilumos šaltinį kaip kituose eksperimento metuose, būtina užtikrinti reikiamą temperatūrą viso liejimo proceso metu, todėl pasiruošiant išpilti babilą iš tiglio, liejimo paviršius ir tiglio buvo nuolat kaitinamas iš išorės nesukuriant kontakto su šilumos šaltiniu (26 pav.).



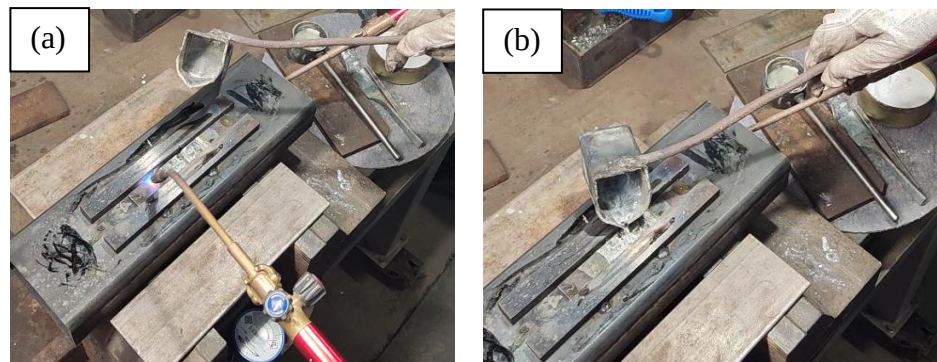
26 pav. reikiamos temperatūros palaikymo procesas, prieš tiesioginį liejimą

Lygiagrečiai yra atliekamas pagrindinio metalo „V formos“ bandinių plokštelių nuriebalinimas bei plovimas, ši operacija patikrinama bandinius panardinant į karštą vandenį ir stebint ar nesusidaro vandens plėvelė. Iš karto po to plokštelė nardinama į išlydytą alavą, o sekančiai į amonio fluorida miltelius. Ši flusavimo ir alavavimo operacija atliekama du kartus. Viso proceso metu medžiagų temperatūra palaikoma liepsnos šaltiniu (27 pav. (a)).



27 pav. Paviršiaus paruošimo procedūros: (a) – nuriebalinimo patikrinimas, (b) – alavavimas, (c) – flusavimas

Plokštelės paruošimo liejimui procedūra kartojama ir antrai bandinio pusei (plokštelei), o tuo metu pirmoji plokštelė yra lygiagrečiai šildoma ne alavuoto metalo pusėje (technologiniame gale) su atvira liepsna. Po paskutinio paruošimo nedelsiant abi plokštelės sustatomos taip, kad briaunos suformuotų V tipo vonelę liejimui ir pasiruošiama pilti išlydytą babitą (28 pav.(a)). Pilama lėtai ir tolygiai, fiksuotu pasukimo judesiu. Būtina išpilti daugiau babito nei gali tilpti į V formos griovelį, išvengiant nesulydymo dėl medžiagos trūkumo, vėliau šis perteklius bus pašalintas mechaniškai (28 pav. (b)).



28 pav. babito užliejimo procesas: (a) – pasiruošimas liejimui, (b) – liejimas

Eksperimento tikslumui užtikrinti buvo matuojama temperatūra po babito dangą, ją užliejus ant pagrindinio metalo paviršiaus, gauta reikšmė siekė 378°C , kuri yra tinkama ir saugi babito liejimui, kuomet teoriškai yra bandoma užtikrinti, jog vienas iš pagrindinių elementų – stibis nėra išdeginamas dėl per didelio šilumos kiekio įvedimo.



29 pav. Bandiniai gauti tiesioginio liejimo metu: (a) – V formos tipo „K“ bandinys, (b) – U formos tipo „TIG“ bandinys

Po liejimo buvo gauti 5 bandiniai tempimui ir 1 analogiškai pagamintas apvalus bandinys, V formos tipo bandiniai, kai reikalinga buvo apdirbti mechaniškai pašalinant perteklių atsižvelgiant į tempimo bandymo standartą. Plokštelės V formos tipo, tiesioginio liejimo tiesiai iš tiglio, bandiniai buvo

pavadinti „K“ raide (29 pav. (a)) juos numeruojant nuo K1 iki K5, taip simbolizuojant babito lydymą krosnyje. Apvaliam bandiniui suteiktas „TIG“ žymuo simbolizuojantis žodį – tiglio (29 pav. (b)). Toliau metodo palyginimui su kitais metodais, buvo pasirinkta įvertinti V formos tipo bandinių gamybos technologinę kortelę su operacijų kiekiu, gautomis reikšmėmis, apskaičiuotais parametrais ir naudotos įrangos identifikavimu (4 lentelė).

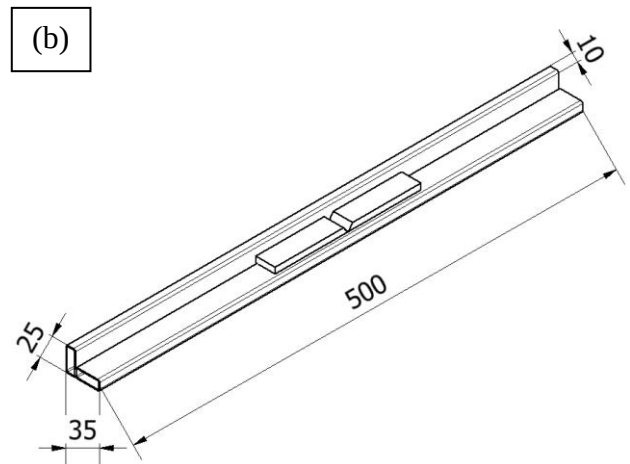
4 lentelė. Tiesioginio liejimo iš tiglio į V formą technologinė kortelė

Eil. Nr.	Operacija	Vertė	Laikas	Medžiagos	Pastabos
1.	Pasiruošiamieji darbai	-	3,00 min	-	Medžiagų, ruošinių sudėjimas ant stendo
2.	Babito lydymas krosnyje	Skysta fazė iki 370° C	12,17 min	Babitas B-83	Krosnis UTERNA
3.	Išlydyto babito rafinavimas	Iki švaraus babito	4,15 min	Dehidratuotas amonio chloridas	Su spec. samteliu
4.	Paviršių ir alavo kaitinimas	370° C	4,28 min	Propanas; Deguonis; Alavas; Plienas S355J2;	Dujinis degiklis su reduktoriumi
5.	Nuriebalinimo patikrinimas	Sausas paviršius	0,05 min	Vanduo	Negali būti matomos drėgnos plėvelės
6.	Flusavimas ir alavavimas	2 ciklai	1,70 min	Alavas Plienas S355J2 Amonio fluoridas	2 bandinio puselės
7.	Babito išliejimas	400 mm ³	0,02 min	Babitas B-83	Tiesiai iš tiglio
8.	Kontroliuojamas ataušimas	-100° / min.	2,70 min	Propanas; Deguonis;	Iki 100° C, vėliau kambario temp.
Σ			28,07 min		

Tiesioginio liejimo iš tiglio yra vienas iš seniausių būdų kaip pakankamai kokybiškai galima sukurti babito dangas, todėl tokio metodo metu sukurti bandiniai turėtų suformuoti tinkamą pradžią šio eksperimento tyrimams atlikti. Remiantis literatūros šaltiniais, toks babito liejimo būdas gali būti stambiagrūdės struktūros priežastis, o tai neleidžiamas defektas tokio tipo dangose. Tai bus informatyvus atskaitos taškas vertinant senąją technologiją su šiek tiek naujesnėmis technologijomis.

3.5. Lydymo atvira liepsna metodo stebėjimas ir bandinių gamyba

Babito lydymo tiesiai ant darbinio paviršiaus, naudojant oksiduojančią liepsną kurią generuoja degantis propano ir deguonies dujų mišinys, formuoja atskirą padengimo metodą jeigu žvelgsime per liejimo iš tiglio prizmę. Šis metodas buvo išrastas kaip papildantis, išcentrinio tiesioginio liejimo metodui, procesas. Skirtingai nei skysto babito liejimui, čia reikalingas kitokios konfigūracijos stendas, kur viena kraštinė yra atvira, kadangi lydant su liepsna žiūrėjimo kampas nuo paviršiaus sudaro nuo 25° iki 35° kampą. Tam buvo suprojektuotas ir pagamintas specialus šiam metodui stendas (30 pav.).



30 pav. Liejimo naudojant atvirą liepsną stendas: (a) – stendo nuotrauka, (b) – stendo eskizas

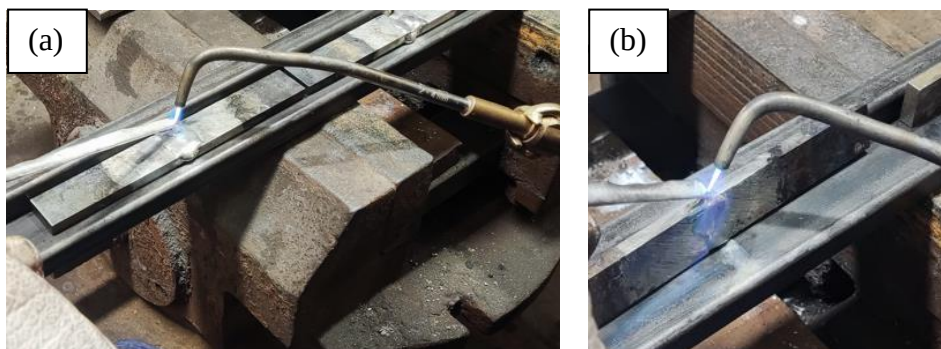
Toliau bandinių paruošimo, flusavimo ir alavavimo procesai vyksta analogiškai pylimo iš tiglio metodui, kaip aprašyta šio darbo 3.4 skyriaus 3 ir 4 pastraipoje. Tačiau toliau technologija keičiasi, ir padengimo procesas vyksta net 5 bandiniams iš karto, kai tuo tarpu tiesioginiame pylime galime dėmesį skirti tik vienam bandiniui per vieną užpylimą (31 pav. a).

Šio metodo pradžioje būtina mišinį sureguliuoti taip, kad liepsna būtų prisotinta vandenilio, t.y. taptų mėlynos spalvos atspalvio smailios formos liepsna, kad pasiekti šį faktorių, deguonies padavimas atsukamas santykiu 4:1 su propano dujomis. Liejimas atliekamas stumiant babito strypelį tiesiai į smailią liepsną, nukreiptą tiesiai į norimą aplieti paviršių, kad babitas išsilydytų reikiamoje srityje. Liejimas atliekamas sinchroniškai kiekvienam bandiniui iš eilės, pirmiausiai apliejant V formos griovelio apačią, taip suformuojant šaknį (31 pav. (a)).



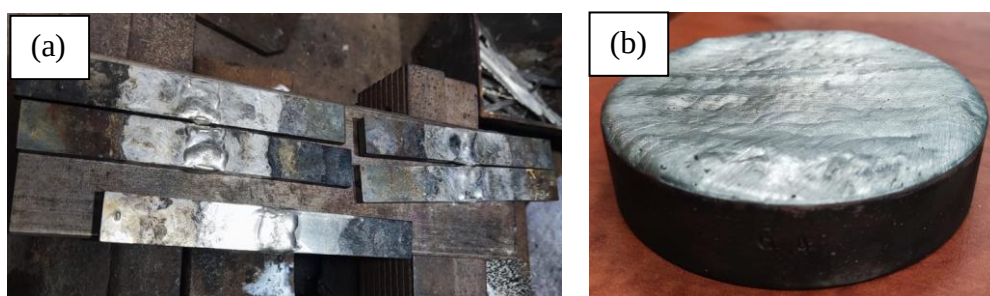
31 pav. Liejimo, naudojant atvirą liepsną, pirminės procedūros eiga: (a) – šaknies formavimas, (b) – galų uždarymas

Grįžtant prie pirmiausiai pradėto bandinio paviršiaus dengimo, toliau formuojami vonelės galai žiūrint iš skerspjūvio pusės „uždarant“ visų bandinių vonelės galuose. Toliau procesas ir vėl sinchroniškai atliekamas visiems bandiniams iš eilės (31 pav. (b)). Kai liejimą atlikti saugu, kadangi sumažinama rizika babito išsiliejimui per vonelės galus, operatorius pradeda galutinį vonelės užpildymą lydant pridėtinį babitą centre vedžiodamas liepsną ir strypelį nuo galo iki galo, taip perliejant ir galuose apstingusį babitą (32 pav. (a)). Kadangi perliejant galus babitas šiek tiek išsilieja, bandiniai paverčiami ant šono ir atliekamas pataisymas (32 pav. (b)).



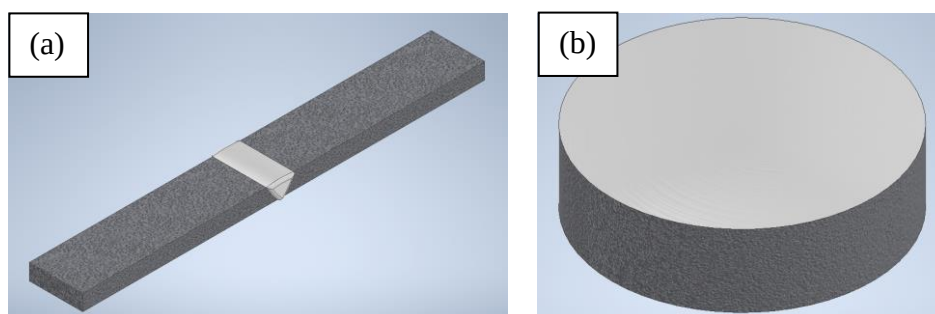
32 pav. Liejimo, naudojant atvirą liepsną, proceso pabaigos eiga: (a) – vonelės užpildymas, (b) – galų pataisymas

Pasirinktas atviros liepsnos metodas nurodė aiškų operatyvumo dėsni, kuris, ko gero, labiausiai išskirs šį metodą galutiniam palyginimui, kai bus gauti visi tyrimų rezultatai. Taip pat šis metodas suformavo kitokį liejimo kontrolės supratimą, kai stebėjimo metu, buvo galima aiškiai stebėti kaip yra formuojamas babitas ir kokių dėsningumų yra struktūriškai kuriama danga. Po liejimo gauti bandiniai išsiskyrė savo tvarkingesne išvaizda (33 pav. (a)), lyginant su tiesioginio liejimo iš tiglio metodu. Lygiagrečiai pagamintas ir U formos tipo bandinys kuriam suteiktas žymuo – „GA“, simbolizuojantis dujas iš anglų kalbos žodžio „gas“. Tempimui skirti V formos tipo bandiniai buvo paženklinėti raide „D“, kuri perteikė lietuviško žodžio „dujos“ prasmę. Bandiniai vėliau sužymėti atitinkamai nuo D1 iki D5.



33 pav. Bandiniai, gauti atviros liepsnos metodo metu: (a) – V Formos tipo bandiniai, (b) – U formos tipo bandinys

Iš principo visų metodų bandiniai buvo pagaminti taip, kaip buvo projektuojami ir yra panašūs į sukurtus modelius (34 pav.).



34 pav. Bandinių modeliai: (a) – V formos tipo, (b) – U formos tipo

Šiam metodo palyginimui su kitais, buvo vėl pasirinkta skaičiuoti V formos tipo bandinių gamybos technologinę kortelę su operacijų kiekiu, gautomis reikšmėmis, apskaičiuotais parametrais ir naudotos įrangos identifikavimu (5 lentelė).

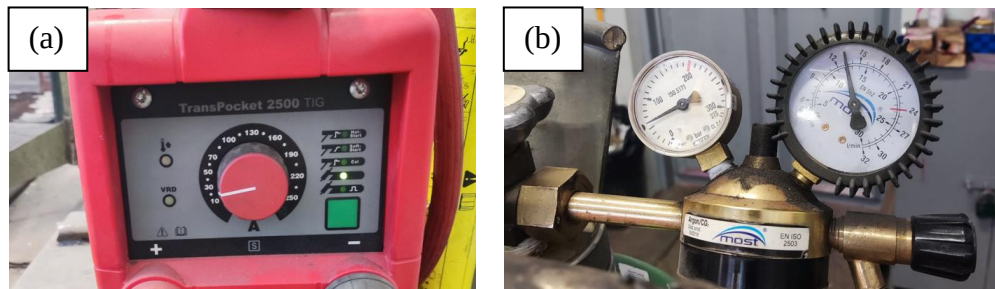
5 lentelė. Liejimo naudojant atvirą liepsną technologinė kortelė

Eil. Nr.	Operacija	Vertė	Laikas	Medžiagos	Pastabos
1.	Pasiruošiamieji darbai	-	1,00 min	-	Medžiagų, ruošinių sudėjimas ant stendo
3.	Paviršių ir alavo kaitinimas	370° C	4,15 min	Propanas; Deguonis; Alavas; Plienas S355J2;	Dujinis degiklis su reduktoriumi
4.	Nuriebalinimo patikrinimas	Sausas paviršius	0,05 min	Vanduo	Negali būti matomos drėgnos plėvelės
5.	Fliusavimas ir alavavimas	2 ciklai	1,75 min	Alavas Plienas S355J2 Amonio fluoridas	2 bandinio puselės
6.	Babito liejimas su liepsna tiesiai ant paviršiaus	užpildomas tūris: 400 mm ³	0,59 min	Babitas B-83; Propanas; Deguonis;	visi 5 bandiniai per 2,90 min
7.	Kontroliuojamas ataušimas	-100° / min.	2,70 min	Propanas; Deguonis;	Iki 100° C, vėliau kambario temp.
Σ			10,24 min		

Stebint šio metodo eigą jau iš karto buvo aišku jog procesas trunka bent du kartus greičiau, o atlikus analizę ir surašius technologinę kortelę, tai pasitvirtino. Lyginant su tiesioginiu metodu matomas aiškus laiko skirtumas, taip pat vizualiai matoma ir geresnė dangos paviršiaus kokybė. Ko gero bene geriausias privalumas taikant šį metodą, tai ganėtinai didelis proceso kontroliavimo laipsnis, kuomet operatorius geba babito medžiagą valdyti taip kaip reikalaujama pagal darbų specifiką. Tačiau remiantis mokslo straipsniais ir kitais literatūriniais šaltiniais šis metodas turėtų pasižymėti aukštu dujų porų skaičiumi. Šis faktorius bus atskleistas pritaikant bandymą skverbikliais, bei radiografinį tyrimą. Bandinio struktūrą būtina analizuoti keliais sluoksniais periodiškai šlifuojant esamą dangą, o struktūros analizė atliekant mikro tyrimą skerspjuvyje turėtų atskleisti kristalinę ryšį bei galimų porų įtaką jam.

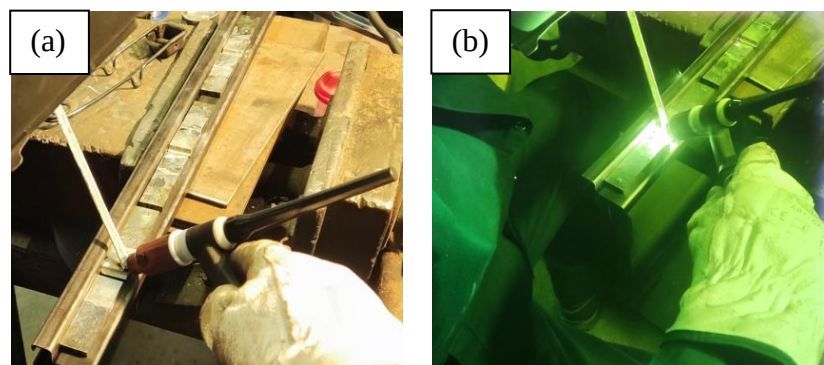
3.6. Lydymo elektrolanku metodo stebėjimas ir bandinių gamyba

Bene pats moderniausias pasirinktas liejimo būdas yra lydymas ant pagrindinio metalo paviršiaus naudojant elektrolanko išlydį pasikliaujant volframo elektrodą inertinių dujų aplinkoje. Metodus iš principo labai primena standartinį suvirinimo procesą, kuris dar žymimas kaip „TIG“ (iš anglų kalbos „Tungsten Inert Gas“), „GTAW“ (iš anglų kalbos „Gas Tungsten Arc Welding“) arba „141“ tarptautiniu būdu žymėjimu. Tačiau šio metodo metu pridėtinė medžiaga yra babitas, tiksliau jo strypeliai, taip kaip ir liejant su atvira liepsna. Iš esmės šis būdas panašus kaip ir naudojant oksiduojančią liepsną, tik čia šilumos šaltinis yra elektrolankas. Šiam procesui naudojamas tas pats stendas kaip ir liepsnos metodui (30 pav.). Be akivaizdžių panašumų metodas iš esmės ir skiriasi kadangi čia jau naudojama visa suvirinimo įranga, tokia kaip suvirinimo aparatas „Fronius TransPocket 2500 TIG“ bei argono (Ar) dujos paduodamos per „Most“ reduktorių (35 pav.) ir 1,6 mm skersmens volframo elektrodas „Abicor Binzel“ skirtas paprastam juodam ir nerūdijančiam plienui.



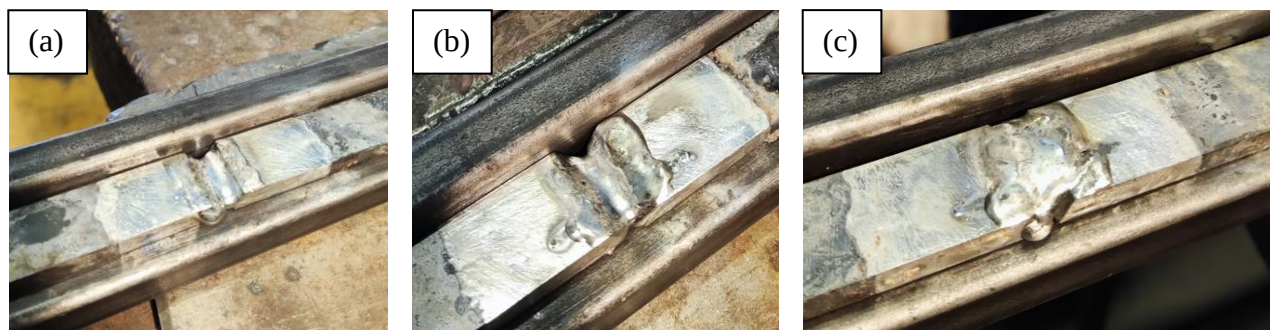
35 pav. Naudojama įranga liejant elektrolankiniu būdu: (a) – „Fronius TransPocket 2500 TIG“ suvirinimo aparatas, (b) – „Most“ reduktorius

Kalbant apie bandinių paruošimą, flusavimą ir alavavimą, šie procesai taip pat vyksta analogiškai kaip ir pylimo iš tiglio ar atviros liepsnos metodai, kaip aprašyta šio darbo 3.4 skyriaus 3 ir 4 pastraipose. Tačiau toliau technologija, kaip ir atviros liepsnos metode keičiasi, ir padengimo procesas vyksta net 5 bandiniams iš karto (36 pav. (a)).



36 pav. Elektrolankinio babito liejimo metodo proceso pradžia: (a) – Prieš lanko uždegimą, (b) – degant elektrolankui

Vos tik pradėjus liejimą elektrolankiniu būdu, tuoj pat galima pastebėti lydimo kontrolės skirtumą lyginant su liejimu atvira liepsna, čia kontrolė yra ant tiek tiksli, kad nebereikia vonelės užsidaryti galuose. Lydant elektrolanku, išlydytas babilas momentaliai paklūsta operatoriaus rankos judesiams, kadangi babilas yra stumiamas lanko ir papildomai pučiamas inertinių dujų pagalba, todėl žymiai lengviau formuoti sudėtingesnę geometriją. Priešingai nei naudojant atvirą liepsną čia babilas nebėga per kraštus, o taisyklingai yra formuojamas nuo krašto iki krašto (36 pav. (b)).



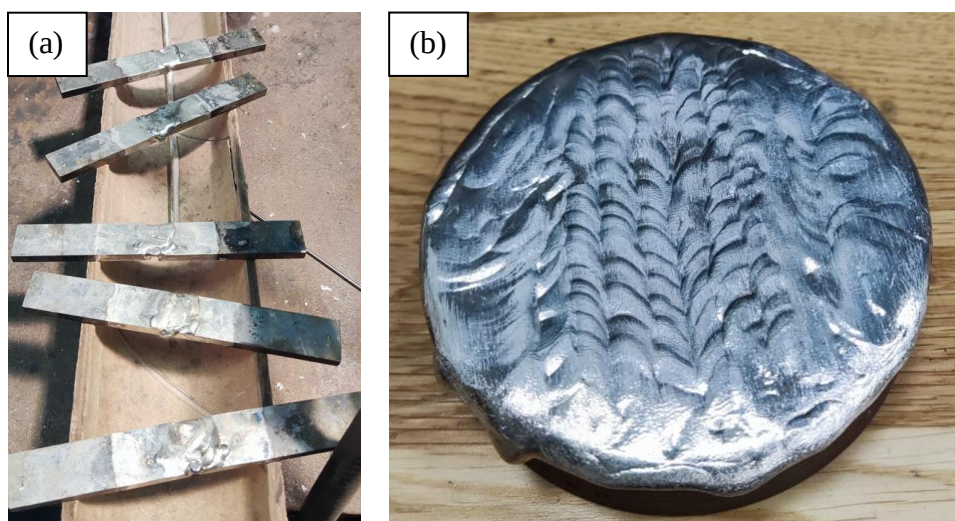
37 pav. Babito dangos, naudojant elektrolanką, formavimo etapai: (a) – 1 ėjimas, (b) – 2 ėjimas, (c) – 3 ėjimas

Kadangi proceso metu nebereikia atlikti papildomų saugos procedūrų, lydymas atliekamas panašiai kaip suvirinimo metu, sluoksnis liejamas vienas po kito (37 pav.), leidžiant tarp ėjimų babilui šiek tiek sustingti, kadangi esant per dideliui skysto babito tūriui jis dėl padidėjusios masės pradės lieti

į kraštus ir fliusavimo metu sukurtas skysčio gebėjimas palaikyti kontaktą su kietu paviršiumi ir jo pusiausvyrą tarp lipniojo tipo ir rišlaus tipo tarpmolekulinės sąveikos, būtų neveiksmingas. Lydant šiuo metodu yra jaučiamas didesnis babito struktūros tankinimas, todėl vienu ėjimu medžiaga užpildo mažiau tūrio nei liejant liepsna, kur šilumos šaltinis tik išlydo babilą, o formavimas atliekamas babito strypelio judesiu, tokiu būdu galimai neužtikrinant reikiamo tankio.

Atliekant babito dangos padengimo darbus naudojant elektrolankinį metodą, iškilo hipotezė jog galbūt šis metodas dėl savo energijos šaltinio savybių užtikrina geriausią dangos kokybę lyginant su kitais šiame darbe tiriamais metodais. Elektrolanko degimo metu sukuriamą grandinę, leidžianti nenutrūkstamai elektros srovei tekėti per tarpą tarp babito strypelio ir metalinio ruošinio. Dėl šios elektros iškrovos sukurta intensyvi šiluma jonizuoja aplink esančias argono dujas ir sukuria plazmos būseną. Esant tokiai būsenai, elektros lankas gali pasiekti aukštesnę nei 6000 laipsnių Celsijaus temperatūrą, todėl jis yra puikus metalo apdirbimo įrankis.

Elektros lanko poveikis babito medžiagai yra didžiulis. Jis ne tik išlydo babilą sąlyčio taške, bet ir gretimose srityse įveda karščio paveiktas zonas, kurios veikiamos aukštesnės temperatūros, patiria metalurginius pokyčius, kurie gali pakeisti medžiagos mikrostruktūrą. Dėl šios transformacijos gali pasikeisti dangos porėtumas, kietumas, atsparumas tempimui ir kitos mechaninės savybės. Naudojant elektros lanką sukurti bandiniai buvo atitinkamai identifikuoti raide „T“ simbolizuojant „TIG“ suvirinimo būdą, o bandiniai paženklinėti nuo T1 iki T5 (38 pav. (a)). Tuo tarpu lygiagrečiai pagamintam U formos tipo bandiniui suteiktas „AR“ simbolis, suteikiantis argono dujų „Ar“ simbolinę prasmę (38 pav. (b)).



38 pav. Bandiniai, gauti elektrolankinio metodo metu: (a) – V formos tipo „T“ bandiniai, (b) – U formos tipo „AR“ bandinys

Dėl santykinai žemos lydymosi temperatūros babitas paprastai išlydomas neelektriniais šildymo būdais. Volframo lankinis suvirinimas sukuria žymiai aukštesnę temperatūrą, dėl kurios tam tikros babito medžiagos gali išgaruoti arba suirti, todėl metodas sukuria ir atitinkamas rizikas. „TIG“ suvirinimas sukuria didelio intensyvumo lanką, kurį gali būti sunku valdyti esant mažos galios nustatymui. Išlydyti medžiagą, kurios lydymosi temperatūra žema, kaip babito, naudojant „TIG“ suvirinimą, gali būti sudėtinga, nes lankas gali būti per intensyvus, todėl lydymasis netolygus ir gali būti pažeistas netauriųjų metalų. „TIG“ suvirinimo metode paprastai naudojamas volframo elektrodas inertinių dujų aplinkoje, kurios sumažina užteršimą. Bandant išlydyti babilą naudojant šį metodą, iš

elektrodo ir apsauginių dujų gali patekti pašalinių elementų, o tai gali neigiamai paveikti babetą ir jungties vientisumą. „TIG“ suvirinimas yra žinomas dėl savo tikslumo ir kontrolės, todėl puikiai tinka sudėtingoms suvirinimo užduotims. Tačiau naudojant jį babito išlydymui ir dangos kūrimą ant metalinio paviršiaus gali trūkti tikslumo, lyginant su įprastiniu suvirinimu, tačiau lyginant dangų kūrimo metodiką, tikslumas yra pakankamas ir vertinamas kaip vienas geresnių tarp šiame darbe lyginamų metodų. Šiam metodui įvertinti tolimesniuose tyrimuose, taip pat aprašyta technologinė kortelė V formos tipo bandiniams (6 lentelė).

6 lentelė. Liejimo naudojant elektros lanką technologinė kortelė

Eil. Nr.	Operacija	Vertė	Laikas	Medžiagos	Pastabos
1.	Pasiruošiamieji darbai	-	1,00 min	-	Medžiagų, ruošinių sudėjimas ant stendo
3.	Paviršių ir alavo kaitinimas	370° C	4,15 min	Propanas; Deguonis; Alavas; Plienas S355J2;	Dujinis degiklis su reduktoriumi
4.	Nuriebalinimo patikrinimas	Sausas paviršius	0,05 min	Vanduo	Negali būti matomos drėgnos plėvelės
5.	Fliusavimas ir alavavimas	2 ciklai	1,75 min	Alavas Plienas S355J2 Amonio fluoridas	2 bandinio puselės
6.	Babito liejimas naudojant elektros lanką	užpildomas tūris: 400 mm ³	1,60 min	Babitas B-83; Argono dujos (Ar); Volframo elektrodas; Suvirinimo aparatas;	visi 5 bandiniai per 8 min. Srovė: 20 A Įtampa: 10 ÷ 20 V Varža: 0,5 ÷ 1,0 Ω
7.	Kontroliuojamas ataušimas	-100° / min.	2,70 min	Propanas; Deguonis;	Iki 100° C, vėliau kambario temp.
Σ			11,25 min		

Šis metodas nėra plačiai naudojamas ar žinomas dėl panašaus modernesnio metodo – elektrolankinio purškimo, kur babitas ne tik lydomas elektros lanko pagalba, bet dar ir purškiamas tiesiai ant paviršiaus. Tačiau šiame tyrime jo realizavimas tikėtina atskleis jo potencialą vertinant modernesnių dangos kūrimo metodų grupę. Vertinant technologiškąją pusę šis būdas operatyvumo perspektyvoje ne daug atsilieka nuo atviros liepsnos metodo, kur bendras vieno bandinio pagaminimo greitis buvo 10 min, čia naudojant elektrolanką yra 11,25 min. tad kiekybiniu atžvilgiu metodas yra lygiavertis.

Vertinant panaudotų medžiagų ir įrangos kainas, metodas tikėtina yra didesnės savikainos, kadangi prieš tai analizuotose būduose, nėra jokių įmantrių priemonių, viskas atliekama tradiciniais liejimo ir litavimo būdais. Todėl būtent kokybiniai parametrai leis padaryti konkrečią ir detalę analizę tolimesniame šio tyrimo etape. Vienas iš svarbiausių kriterijų tiriant šio metodo bandinius bus porėtumas ir mikrostruktūra, kadangi kaip jau buvo apžvelgta literatūros analizės metu, šis metodas tikėtina eliminuoja defektus dažnai atsirandančius būtent dėl mažo tankinimo, silpno molekulinio ryšio ir didelio porėtumo.

3.7. Techninių parametrų nustatymo metodai

Medžiagų mokslo ir inžinerijos srityje eksperimentiniai tyrimai atlieka pagrindinį vaidmenį atskleidžiant sudėtingą įvairių medžiagų elgesį ir savybes bei jų sąveiką su įvairiomis bandymų metodikomis. Pateikto tyrimo kontekste pagrindinis dėmesys skiriamas babito dangų įvertinimui, kai buvo kruopščiai išnagrinėti trys skirtingi dengimo metodai. Eksperimentinis projektas yra apgalvotai struktūrizuotas, kad būtų užfiksuotas platus parametrų rinkinys, apimantis mechaninius, struktūrinius ir cheminius šių babito dangų aspektus. Tempimo bandymai naudojami siekiant įvertinti dangų mechaninį vientisumą ir atsparumą tempimui, o kietumo matavimai leidžia suprasti jų atsparumą deformacijai.

Radiografiniai ir skvarbieji bandymai naudojami kaip neardomieji metodai, atskleidžiantys galimus vidinius trūkumus, kurie gali būti nematomi vizualinio patikrinimo metu. Mikrostruktūros ir cheminės sudėties analizės leidžia geriau suprasti dangų vidinę struktūrą ir elementines sudedamąsias dalis, kurios yra labai svarbios vertinant bendrą jų kokybę ir veikimą. Šių įvairių bandymų metodikų suderinta sąveika eksperimentinėje sistemoje leidžia išsamiai įvertinti babito dangų mechanines, struktūrines ir chemines savybes. Šie daugialypiai tyrimai yra pagrindas nustatant dangų tinkamumą įvairioms reikmėms, o tai galiausiai prisideda prie medžiagų mokslo ir inžinerijos žinių pažangos.

Šių eksperimentinių bandinių imtis pateikiama bendroje suvestinėje (7 lentelė)

7 lentelė. Eksperimentinių bandinių imtis

Bandinio Nr.	Vnt.	Dangos kūrimo metodas	Bandinio formos tipas	Bandymo tipas
K-1 ÷ K-5	5	Liejimas tiesiai iš tiglio	„V“	M;
TIG	1	Liejimas tiesiai iš tiglio	„U“	PT, HT, RT, PMI;
D-1 ÷ D-5	5	Liejimas atvira liepsna	„V“	M;
GA	1	Liejimas atvira liepsna	„U“	PT, HT, RT, PMI;
T-1 ÷ T-5	5	Liejimas elektrolanku	„V“	M;
AR	1	Liejimas elektrolanku	„U“	PT, HT, RT, PMI;
TIG _{1, 2, 3, 4, 5}	5	Liejimas tiesiai iš tiglio	„U“ makro	Makro
GA _{1, 2, 3, 4, 5}	5	Liejimas atvira liepsna	„U“ makro	Makro
AR _{1, 2, 3, 4, 5}	5	Liejimas elektrolanku	„U“ makro	Makro
GA ₂₋₂	1	Liejimas tiesiai iš tiglio	„U“ mikro	Mikro
TIG ₄₋₂	1	Liejimas atvira liepsna	„U“ mikro	Mikro
AR ₄₋₂	1	Liejimas elektrolanku	„U“ mikro	Mikro
Bandinių sk.:	36			

Šia bandinių imtimi buvo atlikti eksperimentiniai tyrimai, pagal kurių rezultatus bus galima pateikti išvadas dėl tiriamų dangų tinkamumo naudoti ir mokslinio palyginimo tarp skirtingų technologijų. Metodų stebėjimo metu ir po to, mechaninio apdirbimo metu, buvo sukurti 36 skirtingi bandiniai, kurie buvo sukurti mechanškai dalinant liejimo metu sukurtus pagrindinius bandinius. Verta pastebėti, kad tokia imtis reikalinga rezultatų pakartojamumui. Kiekvienam metodui buvo siekiama rasti vidutinę techninio parametro reikšmę.

3.7.1. Tempimo bandymas

Tempimo bandymai yra pagrindinis trijų skirtingų šiame tyrime naudojamų babeto dangų technologijų visapusiško vertinimo komponentas. Kiekviena iš šių metodikų buvo kruopščiai patikrinta atliekant tempimo bandymus, siekiant įvertinti jų mechanines savybes ir atsparumą tempimui. Atliekant tempimo bandymus, bandinys veikiamas palaipsniui didėjančia ašine apkrova iki plyšimo taško, kad būtų galima nustatyti esminius mechaninius parametrus. Šie tempimo bandymai atlikti UAB „IREMAS“ Metalų bandymų laboratorijos mechaninių savybių nustatymo skyriuje (39 pav.)



39 pav. UAB „IREMAS“ mechaninių savybių nustatymo skyrius

Kiekvienos tiriamos babeto dangos technologijos tempimo bandymai suteikia svarbių įžvalgų apie jų konstrukcinį vientisumą ir atsparumą apkrovoms. Šis bandymo metodas parodo dangų gebėjimą atlaikyti taikomas jėgas ir atsparumą deformacijai. Matuojant įtempį ir deformaciją, tempimo bandymai palengvina medžiagų savybių, pvz., didžiausio tempimo stiprumo ir takumo ribą, skaičiavimą, o tai suteikia vertingų kiekybinių duomenų apie dangų veikimą [24]. Bandymo metu eksperimentiškai buvo ieškomas jėgos ir tempimo greičio santykis, kadangi tiriamą medžiagą nėra tokių mechaninių savybių kaip pagrindinis metalas ir standartinis greitis babetui yra per didelis, buvo parinktas 13,82 mm per minutę greitis, kuris gautas skaičiuojant pagal formulę (1).

$$v = v_{min} + (10 - 1) \cdot \frac{(v_{min} - v_{max})}{(35 - 1)}; \quad (1)$$

Čia v_{min} – minimalus tempimo bandymų mašinos greitis kuris yra lygus 0,005 mm / min., v_{max} – maksimalus greitis kuris lygus 50 mm / min., tempimo greičio lygis parinktam 1:10 perdavimo laipsniui yra 10 vienetų vertės, o maksimalus verčių lygis – 35.

Pagal formulę apskaičiuojamas tempimo greitis:

$$v = 0,005 + (10 - 1) \cdot \frac{(0,005 - 50)}{(35 - 1)} = 0,005 + 9 \cdot \frac{(49,995)}{(34)} = 13,824 \text{ mm/min};$$

Greitis parinktas pagal babeto medžiagai išardyti reikalingos jėgos vertę kuri apytiksliai lygi 10kN, todėl eksperimento metu buvo bandoma gauti 100 N vienam duomenų taškui rezoliuciją, kuri apskaičiuota pagal formulę (2).

$$\Delta F = \frac{F_m}{n_{duom.}}; \quad (2)$$

Čia ΔF – bandymo rezoliucija, F_m – maksimali jėga, $n_{duom.}$ – duomenų taškų kiekis. Norint gauti $n_{duom.}$ Būtina atlikti skaičiavimus pagal formulę (3).

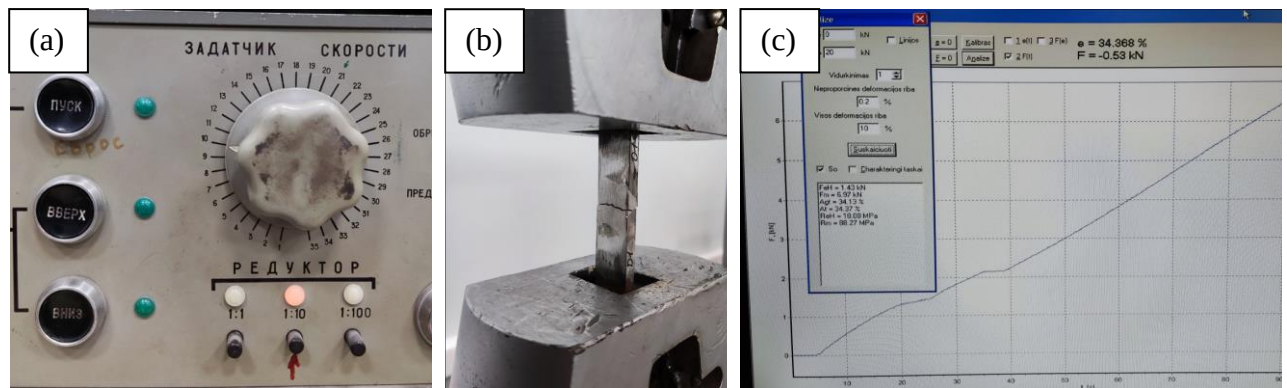
$$n_{duom.} = \frac{\Delta t}{1s}; \quad (3)$$

Čia Δt – bandymo laikas, kuris pagal maksimalią jėgą yra lygus 100 sekundžių.

Pagal formulę apskaičiuojama bandymo rezoliucija:

$$\Delta F = \frac{10.000N}{100} = 100 N/duom.;$$

Šis bandymas yra atliktas pagal LST EN ISO 4136:2022 standartą, bandymui naudotas įrenginys – 1958U-10-1, kuriam yra specialiai sukurta programinė įranga grafikų kūrimui ir verčių suskaičiavimui. (40 pav.)



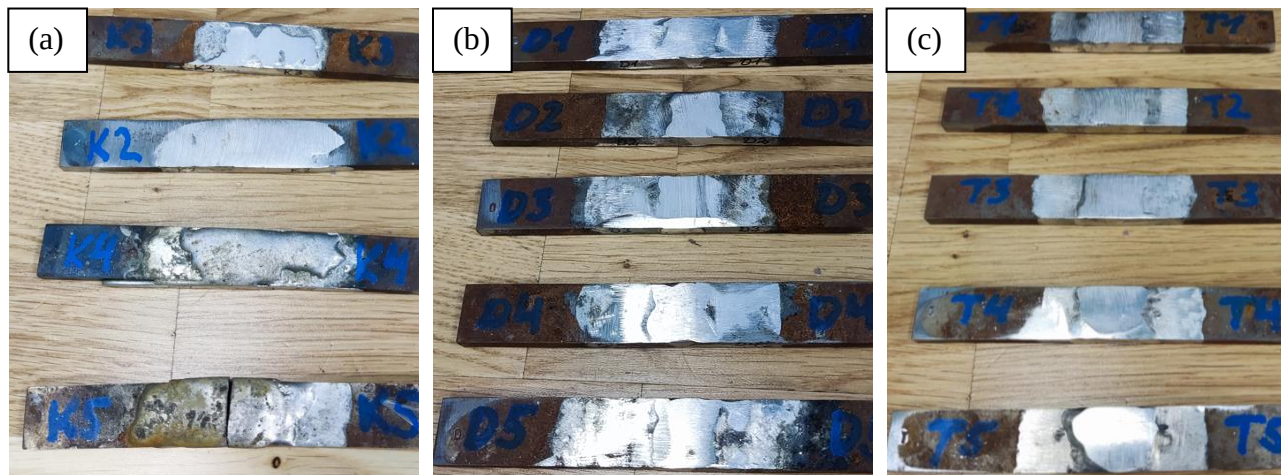
40 pav. Tempimo mašinos 1958U-10-1 komponentai: (a) – valdiklis, (b) – griebtuvai, (c) – išvesties duomenų diagrama

Norint tikslingai suskaičiuoti babito stiprumo ribą R_m , reikia gautos reikšmės įsistatyti į formulę (4), kadangi mašinos skaičiuoklėje nėra galimybės įvesti bandinio ploto duomenų, kurie reikalingi skaičiuojant stiprumo ribą, kadangi ji skaičiuojama absorbuotą jėgą dalinant iš veikimo ploto.

$$R_m = \frac{F_m}{S}; \quad (4)$$

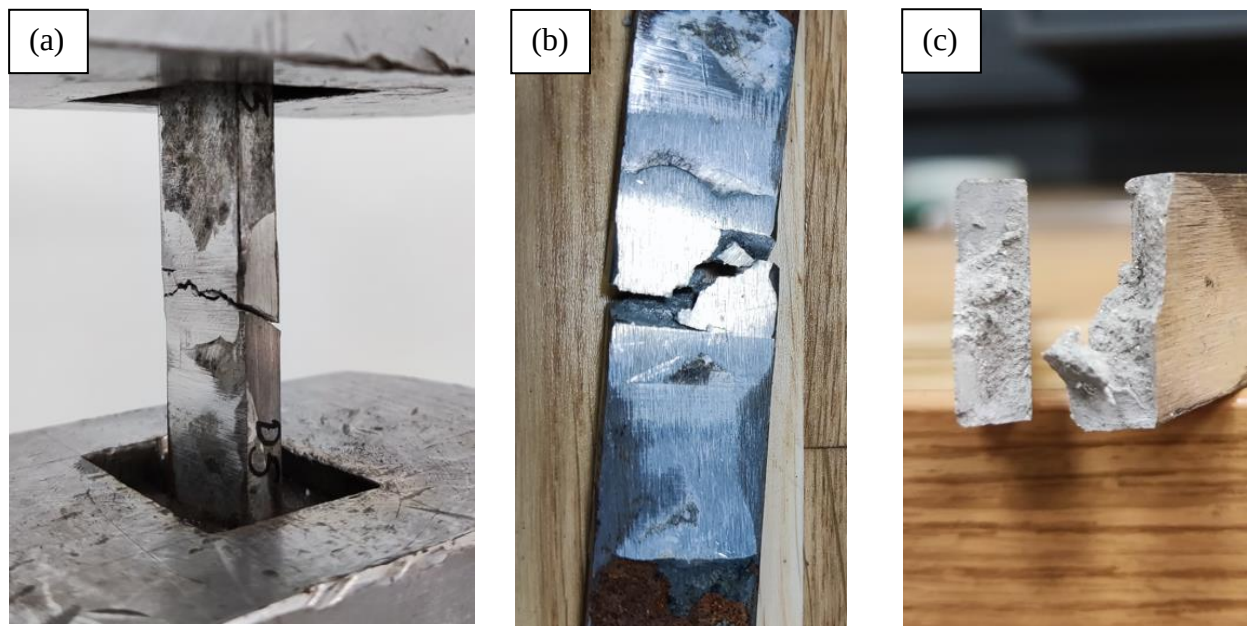
Čia R_m – stiprumo riba (MPa), F_m – stiprumo jėga (N), S – bandinio skerspjūvio plotas (mm²).

Tempiamasis stipris apskaičiuojamas didžiausią jėgą, sugertą per tempimo bandymą Niutonais (N), padalijus iš bandinio skerspjūvio ploto kvadratiniais milimetrais (mm²). Šis bandymas yra svarbus inžinerijos ir medžiagų mokslo srityse, nes suteikia vertingų įžvalgų apie medžiagos kokybę, ilgaamžiškumą ir veikimą įvairiomis sąlygomis, šiuo atveju laboratorijoje bandymai atlikti esant 22° C aplinkos temperatūrai. Surinkus duomenis apie atsparumą tempimui, galima įvertinti ir užtikrinti, kad dangų gamyboje ar jų projektavimui naudojamos medžiagos atlaikytų įtempius, su kuriais jie susidurs taikant numatytą paskirtį [24]. Tempimo bandymo metu buvo paruošta penkiolika bandinių, kur kiekvienam dangų kūrimo metodui gavosi po penkis bandinius (41 pav.)



41 pav. Tempimo bandiniai: (a) – liejimo tiesiai iš tiglio bandiniai, (b) – liejimo naudojant atvirą liepsną bandiniai, (c) – liejimo naudojant elektrolankinį metodą bandiniai

Tempimo bandymo esmė yra Huko dėsnis (ang. „*Hookes law*“), pagrindinis fizikos principas, apibūdinantis ryšį tarp įtempių ir deformacijų plastiškose medžiagose. Įtempis yra jėga, taikoma ploto vienetui, o deformacija yra dėl to atsirandantis medžiagos suirimas arba pailgėjimas [25]. Bandymo metu bandinys palaipsniui veikiamas didėjančios apkrovos. Ši apkrova sukuria vidinius įtempius medžiagoje, todėl ji deformuojasi (42 pav.). Medžiagos atsakas į taikomą jėgą matuojamas įtempių ir deformacijų požiūriu.



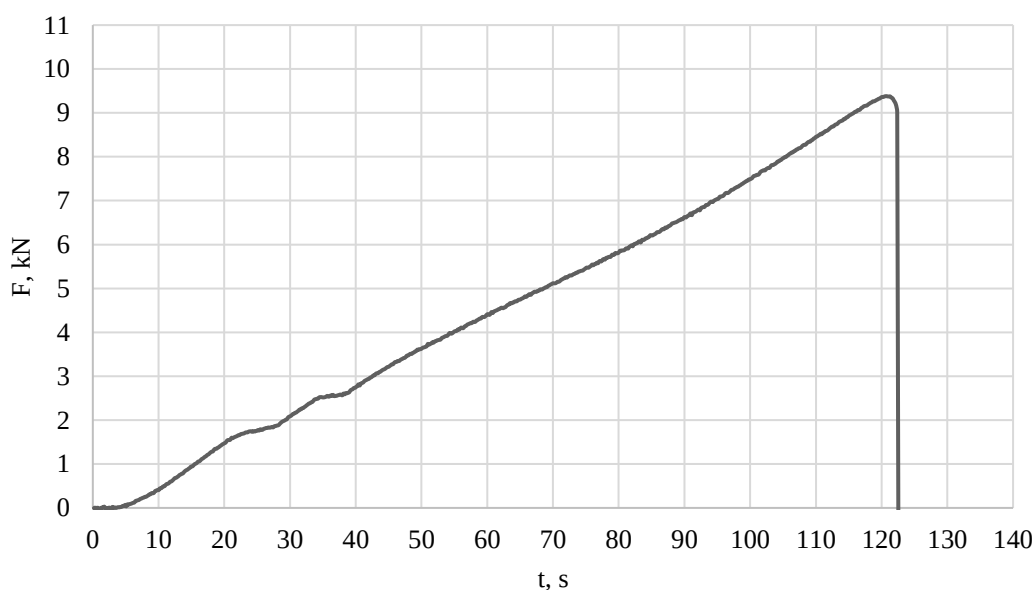
42 pav. Tempimo bandymo atlikimas: (a) – deformuojamas bandinys, (b) – bandinys po deformacijos, (c) – bandinys po išardymo

Bandymo mašina registruoja jėgą (įtempį) ir laiko atkarpą per kurią bandinys išbandomas maksimaliu jo stiprumo parametru. Bandymo metu sukurta įtempių ir laiko tarpo kreivė suteikia esminės informacijos apie medžiagos mechaninį elgesį, kaip ribinį atsparumą tempimui. Gauti rezultatai pateikiami vienoje lentelėje kartu visiems bandiniams (8 lentelė), po atlikto perskaičiavimo pagal formulę (4). Atitinkamai paskaičiuotas R_m vidurkis kiekvienam metodui. Lentelėje taip pateikiami bandinių faktiniai matmenys, išvesties duomenys iš įrenginio ir trūkio vieta.

8 lentelė. Tempimo bandymų rezultatai

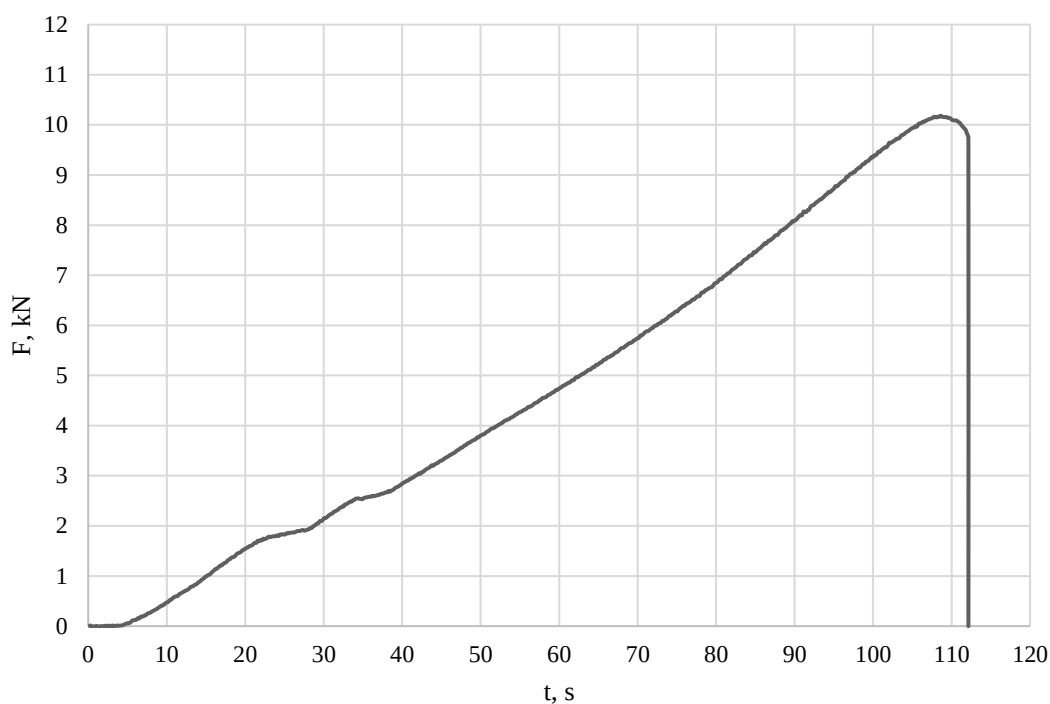
<i>Bandinio aprašymas</i>			<i>Maksimali jėga F_m, kN</i>	<i>Stiprumo riba R_m, MPa (N/mm²)</i>	<i>Trūkio vieta</i>	<i>Pastabos</i>
<i>Bandinio tipas</i>	<i>Nr.</i>	<i>Bandinio matmenys, mm $b_0 \times t \times L_c$</i>				
K	K1	20,2x6x151	8,38	69,00	briauna	$t_w = 6,8$ mm
	K2	20x6x147,6	3,65	30,00	briauna	$t_w = 6,7$ mm
	K3	20,1x6,1x150,45	9,38	78,00	briauna	$t_w = 6,4$ mm
	K4	20,3x6,2x152	0,00	0,00	briauna	neatlaikė
	K5	20,4x6x151,5	0,00	0,00	briauna	neatlaikė
Δ				59,00		
D	D1	20,2x6x155	6,97	58,00	briauna	$t_w = 6,9$ mm
	D2	20,2x6x150,2	6,78	56,00	babitas	$t_w = 6,8$ mm
	D3	20,25x6,2x150,6	9,30	77,00	babitas	$t_w = 5,5$ mm
	D4	20,25x6,1x147	10,18	84,00	babitas	$t_w = 6,4$ mm
	D5	20,2x6,1x150,9	9,46	78,00	briauna	$t_w = 6,5$ mm
Δ				70,00		
T	T1	20x6,1x151,35	12,25	102,00	briauna	$T_w = 7,2$ mm
	T2	20,1x6,05x150,3	8,04	67,00	briauna	$T_w = 7,4$ mm
	T3	20,15x6,1x150,95	9,71	80,00	briauna	$T_w = 6,6$ mm
	T4	20,1x6,1x149,4	10,66	88,00	babitas	$T_w = 6,9$ mm
	T5	20x6,05x150,3	9,42	79,00	babitas	$T_w = 7,5$ mm
Δ				83,00		

Grafikų sudarymui pasirinkti bandiniai kurie atlaikė didžiausias apkrovas bandymo metu, tinkamam metodų sulyginimui.



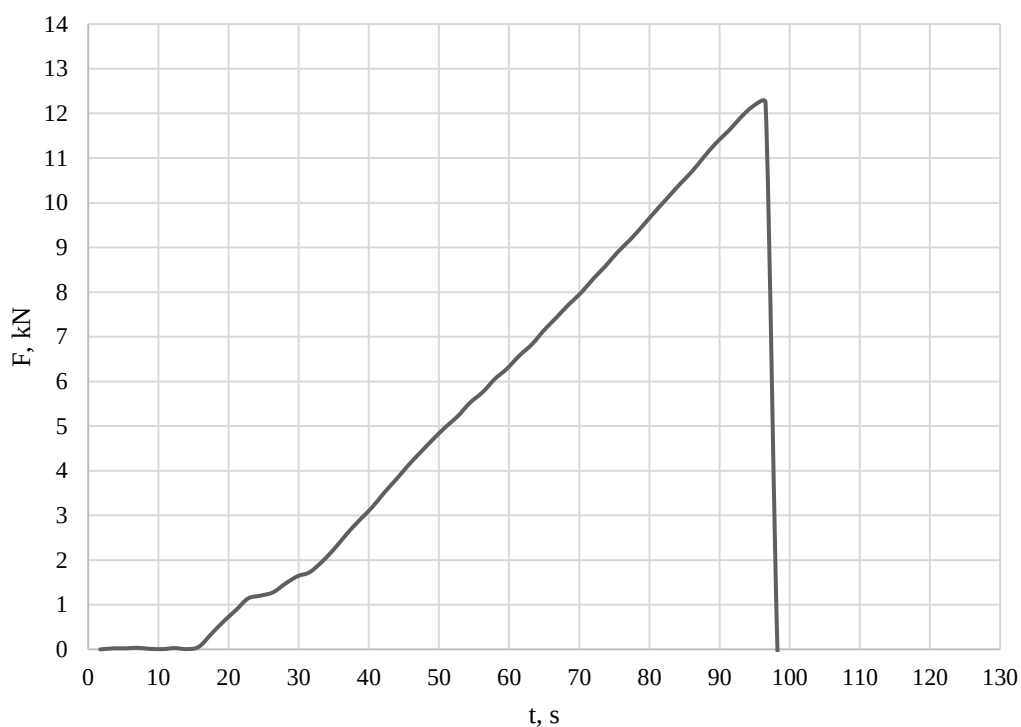
43 pav. K3 bandinio tempimo bandymo diagrama

Iš diagramos galima matyti, kad maksimali absorbuota jėga buvo 9,38 kN, o laikas iki neatlaikant babito dangai – 122 s. Takumo ribos parametras diagramoje neatsispindi.



44 pav. D4 bandinio tempimo bandymo diagrama

Iš diagramos galima matyti, kad maksimali absorbuota jėga buvo 10,18 kN, o bandymo laikas iki neatlaikant babito dangai – 111 s. Takumo ribos parametras diagramoje taip pat neatsispindi.



45 pav. T1 bandinio tempimo bandymo diagrama

Iš diagramos galima matyti, kad maksimali absorbuota jėga buvo 12,25 kN, o bandymo laikas iki maksimalios stiprumo ribos – 96 s. Dėl babito medžiagos savybių maksimali takumo ribos reikšmė diagramoje neatsispindi, o sąlyginis takumas naudojant šią bandymų įrangą nėra nustatomas.

Kiekvienos dangos technologijos tempimo bandymų rezultatai yra pagrindinis etalonas vertinant jų mechaninį patikimumą ir atsparumą, o tai yra esminis jų galimo pritaikymo aspektas [25]. Atliekant standartizuotus tempimo bandymus šioms dangoms, šiuo tyrimu siekiama atskleisti jų mechanines savybes bei jų tinkamumą naudoti įvairiose pramonės ir inžinerijos srityse. Šis kruopštus dangų tempimo savybių įvertinimas suteikia vertingų įžvalgų renkantis technologiją ir projektuojant dangą, taip prisidedant prie medžiagų mokslo žinių plėtimo.

Tempimo bandymų rezultatai suteikia vertingų įžvalgų apie babito dangų, pagamintų naudojant tris skirtingas technologijas, mechanines savybes. Vidutiniškai nustatyta maksimali dangų stiprumo riba liejant tiesiai iš tiglio yra 59 MPa, liejant su atvira liepsna – 70 MPa, elektrolankiniu liejimo būdu – 83 MPa. Šie rezultatai rodo, kad elektrolankinis liejimo metodas pasižymi didžiausiu tempimo stipriu tarp trijų metodų, po kurio seka atviros liepsnos liejimo metodas ir liejimo tiesiai iš tiglio metodas.

Šios išvados turi didelę reikšmę praktiniam babito dangų pritaikymui. Dėl didesnio dangų, pagamintų liejant elektrolankiniu būdu, atsparumo tempimui galima jas naudoti, kai mechaninis vientisumas ir stiprumas yra labai svarbūs. Kita vertus, atviros liepsnos metodas gali būti tinkamesnis tais atvejais, kai kitos savybės, pvz., naudojimo paprastumas arba ekonomiškumas, yra svarbesnės ir priimtinas šiek tiek mažesnis tempiamasis stipris.

Apibendrinant galima teigti, kad tempimo bandymų rezultatai yra vienas iš pagrindų pasirinkti tinkamiausią babito dengimo metodą, atsižvelgiant į konkrečius numatomo naudojimo reikalavimus, analizuojant tokius veiksnius kaip mechaninis stiprumas, kaina ir naudojimo paprastumas.

3.7.2. Kietumo matavimas

Kietumo matavimai yra vienas iš esminių babito dangų vertinimo aspektų, nes jie suteikia informacijos apie medžiagos atsparumą mechaniniam poveikiui, formuojant įspaudą. Šiame tyrime Brinelio metodo bandymo mašina buvo naudojama kiekvieno bandinio kietumui išmatuoti ant šlifuoto plokščio paviršiaus. Gautos kietumo vertės suteikia vertingos informacijos apie dangos gebėjimą atlaikyti mechaninę jėgą eksploatacijos metu. Šie bandymai atlikti tame pačiame mechaninių bandymų skyriuje, naudojant TB-5004 pusiau automatinį kietumo matuoklį (46 pav.).



46 pav. Brinelio kietumo matuoklis TB-5004

Babito dangų kietumas yra nepaprastai svarbus, ypač tais atvejais, kai danga yra veikiamą didelių apkrovų arba abrazyvinių jėgų. Didelė kietumo vertė rodo didesnę atsparumą deformacijai ir

nusidėvėjimui, o tai gali reikšti ilgesnį tarnavimo laiką ir dengtų komponentų pagerintą veikimą. Todėl norint užtikrinti jų kokybę ir efektyvumą, būtina pasiekti optimalų babito dangų kietumą. Specifinės kietumo vertės, reikalingos babito dangoms, gali skirtis priklausomai nuo numatomo naudojimo. Paprastai tikimasi, kad babito dangų Brinelio kietumo vertė yra nuo 27 iki 30 HB (Brinelio kietumo vienetai), kad būtų užtikrintas pageidaujamas patvarumo ir atsparumo dilimui lygis. Tačiau idealus kietumas gali skirtis atsižvelgiant į tokius veiksnius kaip įrenginio tipas, keliamieji reikalavimai ir eksploataavimo sąlygos.



47 pav. Kietumo nustatymas pagal Brinelį

Brinelio kietumo bandymas yra plačiai naudojamas metodas medžiagų, įskaitant babito dangas, kietumui nustatyti. Pagrindinis Brinelio kietumo bandymo principas yra išmatuoti medžiagos atsparumą įspaudimui. Bandymas apima grūdinto plieno rutulio, 10 milimetrų skersmens, presavimą į medžiagos paviršių, veikiant 1 jėgos kilogramo. Ši jėga taikoma 10 sekundžių (47 pav.). Brinelio kietumo tyrimo rezultatas išreiškiamas Brinelio kietumo vienetais (HB arba BHN). Kietumo vertė apskaičiuojama dalijant panaudotą jėgą (jėgos kilogramais, kgf) iš įdubos paviršiaus ploto, likusio ant medžiagos nuėmus rutulį (5 formulė). Įdubos skersmuo (48 pav.) matuojamas naudojant graduotą mikroskopą automatinio įrenginio būdu arba ranka atskiru įrenginiu [26].



48 pav. Babito bandiniai po kietumo matavimų: (a) – AR bandinio kietumas, (b) – GA bandinio kietumas, (c) – TIG bandinio kietumas

$$HB = \frac{F}{A}; \quad (5)$$

Čia, F – taikoma jėga jėgos kilogramais, A – įdubos paviršiaus plotas mm².

įspaudimo rutulio skersmuo, taikoma jėga ir įdubimo dydis yra standartizuoti atliekant bandymo procedūrą. Kuo didesnė įduba ant medžiagos, tuo medžiaga laikoma minkštesne. Toliau pateikiami gauti rezultatai išmatavus įdubas po jėgos apkrovimo su rutuliu (9 lentelė).

9 lentelė. „U“ formos tipo bandinių kietumo rezultatai

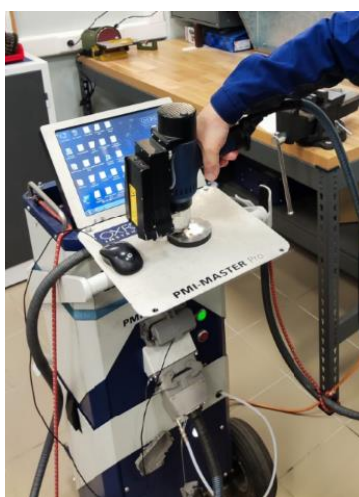
Bandinio Nr.	AR			GA			TIG		
Matavimai Nr. 1÷3	35,6	36,6	38,8	29,1	29,9	31,9	30,9	30,9	31,5
Δ Kietumas, HB	37,0			30,3			31,1		

Apibendrinant galima pasakyti, kad trijų babito dengimo metodų kietumo bandymo rezultatai atskleidžia aiškius skirtumus. Liejimo metodas naudojant elektros lanką parodė didžiausią vidutinį kietumą – 37 HB, o liejant atvira liepsna – šiek tiek mažesnis – 30,3 HB, o liejant tiesiai iš tiglio – 31,3 HB. Šie vidutiniai kietumo verčių skirtumai gali būti siejami su skirtingais apdorojimo būdais ir mikrostruktūromis, susijusiomis su kiekvienu metodu. Labai svarbu atsižvelgti į šiuos kietumo matavimus renkantis tinkamą babito dengimo metodą konkrečioms reikmėms, nes kietumas vaidina svarbų vaidmenį nustatant medžiagos atsparumą dilimui, laikomąją galią ir bendrą našumą.

Norint geriau suprasti skirtingų babito dengimo metodų kietumo skirtumus, būtina atlikti tolesnę mikrostruktūros analizę. Mikrostruktūros analizė suteiks įžvalgų apie konkrečias charakteristikas ir ypatybes, kurios prisidės prie kiekvieno bandinio stebimų kietumo verčių. Bus bandoma nustatyti tokius veiksnius kaip grūdelių dydis, fazių pasiskirstymas ir bet kokie defektai ar netobulumai, kurie gali turėti įtakos medžiagos kietumui. Atlikus išsamią mikrostruktūros analizę, bus tiksliai nustatyti pagrindiniai mechanizmai, atsakingi už kietumo skirtumus, ir priimti pagrįsti sprendimai dėl babito dengimo metodų pasirinkimo ir optimizavimo įvairiems pramoniniams tikslams.

3.7.3. Medžiagos cheminių elementų nustatymas

Cheminė babito B-83 sudėtis yra kritinis parametras, kuris labai įtakoja jo veikimą ir tinkamumą įvairioms reikmėms. Šios sudėties analizė yra būtina siekiant užtikrinti medžiagos struktūros sudėtį ir vientisumą, ypač tais atvejais, kai ji gali būti veikiamą šilumos. Šiuo tikslu vertinga priemonė tampa teigiamų medžiagų identifikavimas (iš ang. „*Positive materials identification*“, arba – PMI), naudojant pažangius spektrometrus, tokius kaip Oxford PMI Master PRO (49 pav.), kurių vienas yra UAB „IREMAS“ metalų bandymų laboratorijoje.



49 pav. Oxford PMI Master Pro spektroanalizatorius

PMI su spektrometru leidžia tiksliai ir greitai išanalizuoti babito B-83 elementinę sudėtį. Jis gali nustatyti pagrindinių elementų, pvz., stibio, alavo, švino, vario ir kitų legiruojamųjų sudedamųjų dalių, buvimą ir koncentraciją. Kai kurie elementai, tokie kaip stibis, esantys babito kompozicijoje,

gali išgaruoti. PMI padeda stebėti šiuos pokyčius dangų gamybos etapuose, kad atskleistų medžiagos vientisumo pokyčius, jeigu tokie egzistuoja. PMI remiasi pagrindiniu principu, kad kiekvienas elementas turi unikalią atominę struktūrą, dėl kurios susidaro būdingi rentgeno spindulių atspindžiai arba spalvų spektras dėl šiluminės energijos poveikio. Matuodami šiuos atspindžius arba spektrus, PMI prietaisai gali nustatyti ir kiekybiškai įvertinti medžiagoje esančius elementus.



50 pav. Babito „U“ formos tipo bandinys po PMI tyrimo

Oxford sukurtas įrenginys yra optinės emisijos spektroskopas (OES) kuris naudoja kibirkščių reiškinių, atsirandanti iš metalo bandinio, kai jį veikia didelės energijos elektros iškrova (50 pav.). Tada analizuojama kibirkščių skleidžiama šviesa, siekiant nustatyti elementus. Cheminė sudėtis buvo nustatyta visiems bandiniams, o rezultatai pateikti 10 lentelėje.

10 lentelė. Cheminės analizės duomenys

Bandinio pavadinimas	Cheminių elementų procentinė dalis sudėtyje, %							
	Sn	Sb	As	Bi	Pb	Cu	Fe	Ni
I žymuo „AR“ bandinys	81,50	13,10	0,007	0,001	0,051	5,57	0,090	0,001
	Al	Zn	Cd	Ag	Co	In		
	0,002	0,006	0,001	0,001	0,003	0,004		
II žymuo „GA“ bandinys	83,40	12,70	0,007	0,001	0,093	3,69	0,090	0,001
	Al	Zn	Cd	Ag	Co	In		
	0,002	0,006	0,001	0,001	0,003	0,007		
III žymuo „TIG“ bandinys	83,00	12,40	0,007	0,001	0,034	3,73	0,090	0,001
	Al	Zn	Cd	Ag	Co	In		
	0,002	0,006	0,001	0,001	0,003	0,004		
Elementų pavadinimai:								
Sn: alavas	Pb: švinas	Al: aliuminis	Ag: sidabras	Co: kobaltas	In: indium			
Sb: stibis	Cu: varis	Zn: cinkas	Cd: kadmis	Ni: nikelis	Bi: bismutas			
As: arsenas	Fe: geležis							

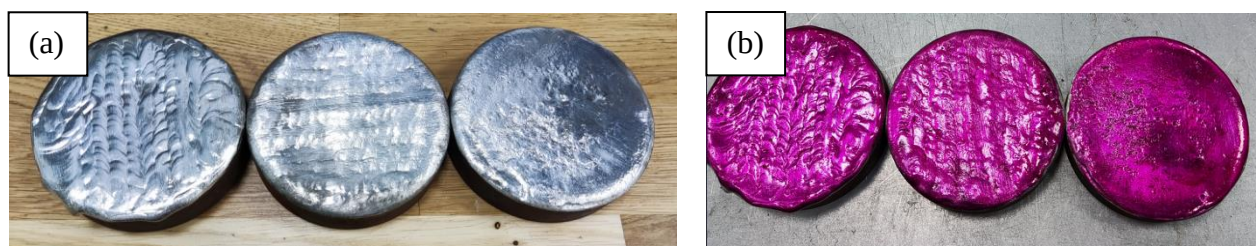
Trijų babito dengimo metodų cheminės analizės rezultatai atskleidžia pagrindinių elementų, visų pirma stibio (Sb) ir vario (Cu), kiekio skirtumus. Taikant elektrolankinį metodą, Sb kiekis yra santykinai didesnis – 13,10%, kartu su 5,57% Cu. Liepsnos metodas rodo šiek tiek mažesnę Sb kiekį – 12,70 % ir 3,69 % Cu, o liejimo iš tiglio metodas – Sb – 12,40 %, o Cu – 3,73 %.

Šie skirtumai gali būti siejami su keliais veiksniais, įskaitant temperatūros skirtumus, deguonies poveikį ir garavimo greitį dengimo proceso metu. Didesnis elektrolankinio metodo Sb kiekis gali būti dėl homogeniškesnio struktūros susiformavimo, kur stibis tolygiai susimaišė ir įsiliejo į bendrą matricą. Ir atvirkščiai, taikant atviros liepsnos metodą Sb ir Cu kiekis gali būti šiek tiek mažesnis dėl skirtingų dengimo charakteristikų ir ne vienodo šilumos poveikio, kur galimai susidarė šių elementų kietieji intarpai. Liejimo iš tiglio metodas išlaiko panašią sudėtį kaip ir liejimo naudojant atvirą liepsną, nors tai ir susiję su kitokiu metalurginiu procesu, bet galimai taip pat pasižymi tarpų būvimu.

Apibendrinant galima pasakyti, kad babito B-83 cheminės sudėties analizė naudojant PMI yra labai svarbi siekiant užtikrinti tinkamą jo naudojimą, saugą ir atitiktį standartams. Tai leidžia gamintojams ir naudotojams priimti pagrįstus sprendimus dėl jo taikymo, priežiūros ir galimų koregavimų, kad būtų išvengta elementų praradimo dėl šilumos ar kito fizinio poveikio. Norint padaryti galutines išvadas ir suprasti pagrindines šių skirtumų priežastis, atliekami tolesni bandymai. Mikrostruktūros analizė, galės suteikti įžvalgų apie veikiančius mechanizmus. Šie ir kiti tolesni išsamūs testai padės patobulinti babito dengimo procesus ir optimizuoti galutinio produkto kokybę.

3.7.4. Bandymas skverbikliais

Įsiskverbimo bandymas yra vertingas metodas, naudojamas babito dengimo technologijose, siekiant aptikti paviršiaus defektus ir įvertinti dengtų medžiagų kokybę. Šis neardomasis bandymo metodas turi keletą privalumų, todėl jis yra viena iš esminių kokybės kontrolės proceso dalių. Iš esmės bandymas skverbikliais atliekamas ant babito dengto komponento paviršiaus užtepus skvarbų skystį, dažnai spalvotą dažiklį arba fluorescencinį skystį. Kapiliariniu būdu šis skystis patenka į paviršių lūžtančius defektus ar netolygumus. Suteikus pakankamai laiko įsiskverbimui, skverbiklio perteklius pašalinamas nuo paviršiaus. Tada užtepamas ryškalas, paprastai balti milteliai arba ryškinimo purškalas. Šis ryškalas ištraukia skverbiklį iš defektų, sukurdamas matomas indikacijas. Šias indikacijas galima ištirti pagal jų dydį, formą ir intensyvumą [27]. Bandymų skverbikliais eiga prasidėjo bandinių paviršiaus skverbimosi tyrimu, kad suprasti tinkamai kokiomis porėtumo savybėmis pasižymi bandiniai, būtina tyrimą pradėti nuo pačio viršutinio sluoksnio (51 pav.).



51 pav. Bandiniai skverbimosi tyrimo metu: (a) – bandinių paruošimas PT testui, (b) – bandiniai po skverbiklio užnešimo

Remiantis ISO 4386-3 standartu, atliekant skverbimosi testą, galima nustatyti įvairių tipų defektus, tokius kaip įtrūkimai, porėtumas ir kiti paviršiaus trūkumai [27]. Šis metodas yra labai efektyvus aptinkant atvirus defektus, kurie tęsiasi iki paviršiaus, todėl jis ypač tinka babito dangoms. Įsiskverbimo ir ryškalo pasirinkimas priklauso nuo konkrečios paskirties ir bandomų medžiagų. Labai svarbu laikytis pripažintų standartų ir procedūrų, taikomų skverbimosi testavimui, kaip nurodyta literatūros šaltiniuose, tokiuose kaip ISO 4386-3 [27]. Šių standartų laikymasis užtikrina, kad defektai būtų nuosekliai aptikti ir įvertinami, taip prisidedant prie bendros babito dangų kokybės kontrolės.

Bandymui naudota įrangą sudaro:

1. Skverbiklis MR® 67 – III tipas, Carrier medium Mineral-oil & Glycol, „Jumbo-Pen“ tipo;
2. Skverbiklio valiklis (specialus valiklis) MR® 79 – metodas C, Carrier medium solvent, aerosolio tipo;
3. Ryškalas MR® 70 – forma e, Carrier medium solvent, aerosolio tipas;
4. Liuksmetras UNI-T UT381;
5. MATLAB programinė įranga;

Šiame tyrime buvo išmėgintas naujos kartos novatoriškas skverbiklio sprendimas – paviršius padengiamas skvarbalu dažant markerio tipo rašikliu (52 pav.), o ne purškiant iš aerosolio. Šis metodas labai palengvina patį bandymą, kadangi valdymas tampa labai paprastas. Taip pat pagerėja ir bandymo ergonomika, kai aplinka nėra teršiama garuojant purškiamam skverbikliui.



52 pav. „JUMBO-PEN“ MR 67 rašiklio tipo skverbiklis

Ankstesniame tyrime, apie babito sluoksnių įtaką poringumui, buvo sukurtas naujas metodas babito dangų paviršiaus porėtumui įvertinti. Šis metodas panaudoja skaitmeninės analizės ir automatizavimo įrankį naudojant MATLAB programavimą. Sukūrus pasirinktinį kodą (53 pav.), buvo galima tiksliai identifikuoti ir kiekybiškai įvertinti paviršiaus defektus, analizuojant įsiskverbimo žymes, likusias atliekant skvarbumo bandymus.

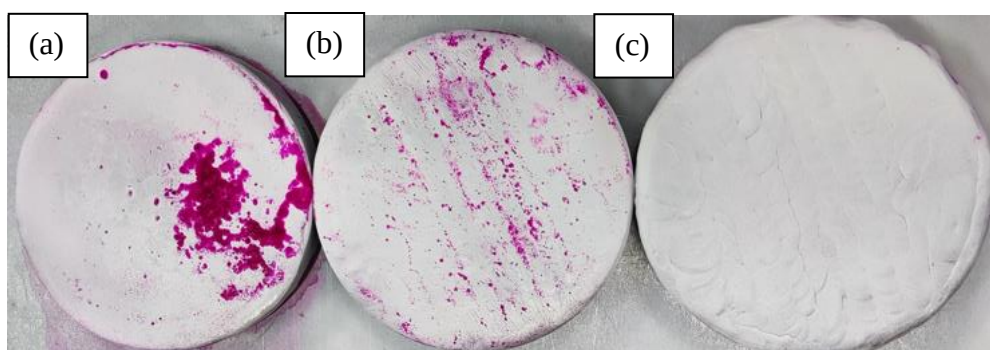
```
Editor - C:\Users\tomka\OneDrive - Kaunas University of Technology\Baigiamasis darbas\Bandymai\3 Metodų palyginimas\Skverbikliams\porsk02.m
porsk02.m
1  clc
2  clear all
3
4  % Nuskaityti paveikslėlį
5  image = imread('GA.jpg');
6
7  % Konvertuoti paveikslėlį į Lab spalvų erdvę
8  labImage = rgb2lab(image);
9
10 % Nustatyti rožinės spalvos diapazoną Lab spalvų erdvėje
11 pinkRange = [85 20 -20; 100 60 20]; % Pritaikykite diapazoną, jei reikia
12
13 % Sukurti binarinį rožinės spalvos regionų maskavimą naudojant adaptuotą slenkstį
14 pinkMask = (labImage(:,:,2) >= pinkRange(1,2) & labImage(:,:,2) <= pinkRange(2,2)) & ...
15             (labImage(:,:,3) >= pinkRange(1,3) & labImage(:,:,3) <= pinkRange(2,3));
16
17 % Atlikti morfologines operacijas maskavimui pagerinti
18 se = strel('disk', 10); % Pritaikykite struktūrinio elemento dydį, jei reikia
19 pinkMask = imclose(pinkMask, se);
20 pinkMask = imfill(pinkMask, 'holes');
21
22 % Pašalinti mažus triukšmus filtruojant mažus regionus
23 pinkMask = bwareaopen(pinkMask, 500);
24
25 % Apskaičiuoti rožinių regionų plotą
26 pinkArea = sum(pinkMask(:));
27
28 % Apskaičiuoti viso paveikslėlio plotą
29 totalArea = numel(pinkMask);
30
31 % Apskaičiuoti procentą, kurį užima rožinė spalva paveikslėlyje
32 percentagePink = (pinkArea / totalArea) * 100;
33
34 % Atvaizduoti procentą
35 disp(['Paveikslėlio plotas, kurį užima rožinė spalva: ', num2str(percentagePink), '%']);
36
37 % Atvaizduoti rezultatų paveikslėlį su neįymėtais regionais baltos spalvos ir rožinėmis spalvomis žymėtais regionais
38 imshow(pinkMask, 'Colormap', [1 1 1; 1 0 0]);
39 title('Bandymo rezultatai: Balti ir rožiniai regionai');
```

53 pav. MATLAB programinio kodo langas

Sukurtas MATLAB kodas leidžia automatiškai aptikti ir išmatuoti defektų sritis. Jis nustato skirtingas indikacijų charakteristikas ir apskaičiuoja tikslų jų dydį bei vietą ant padengto paviršiaus. Šis naujoviškas metodas ne tik supaprastina analizės procesą, bet ir suteikia tikslius bei pakartojamus

rezultatus. Remiantis ankstesniu tiriamuoju darbu, defektų įvertinimui yra pasirenkamas ISO 4386-3 standartas, o lygmuo B kaip vertinimo kriterijus. Jais vadovaujantis linijinė indikacija yra neleidžiama, o nelinijinė indikacija a maksimaliai iki 4 mm skersmens. Sujungtas linijinis defektas taip pat neleidžiamas, o nelinijinių defektų gali būti iki 4 vienetų per 16 dm² plotą. Didžiausias galimas defektų plotas yra 20 mm² / dm².

Naudojant šią tinkintą MATLAB programą buvo įmanoma geriau suprasti babito dangų porėtumą, todėl buvo galima priimti pagrįstus sprendimus dėl dangos kokybės ir galimų patobulinimų. Šis metodas yra reikšmingas žingsnis į priekį babito dangų kokybės kontrolės srityje, nes sujungia skaitmeninės analizės galią su išvalgomis, gautomis naudojant tradicinius bandymo metodus. Šio bandymo atlikimo techniką sudaro skverbiklio užnešimas ant paviršiaus, kuris paliekamas ant paviršiaus 10 min įsiskverbimui, tuomet perteklius nuvalomas su valikliu, kreidos pagrindo ryškalo užpurškimas, kuriam paskirtas 10 min trukmės ryškinimo laikas. Galutinis vertinimas po 30 min.



54 pav. Bandinių paviršius, tyrimo skverbikliais metu: (a) – „TIG“ bandinys, (b) – „GA“ bandinys, (c) – „AR“ bandinys

Kaip ir ankstesniame tiriamajame projekte apie sluoksnių įtaką paviršiaus porėtumui, čia kai kurie bandiniai taip pat pasižymi dideliu porų kiekiu žvelgiant vizualiai (54 pav.), todėl šį tyrimą būtina perkelti į skaitines reikšmes suteikiantį lygmenį. Kiekvienas bandinys atskirai keliamas į MATLAB programinį kodą ir yra analizuojamas pasitelkiant „Image Processing Tool“, „Computer Vision Toolbox“ ir „Statistics and Machine Learning Toolbox“ įrankius. Trumpai tariant kodas su įrankiais atlieka paveikslėlio konvertavimą, filtravimą, ribų aptikimą, sluoksniavimo operacijas, skaičiavimus (55 pav.) ir paveikslėlio atvaizdavimą su pažymėtais rodikliais. Bandymo rezultatai pateikiami 11 lentelėje.

Workspace	
Name ▲	Value
image	2395x2414x3 uint8
labImage	2395x2414x3 double
percentagePink	8.1554
pinkArea	471508
pinkMask	2395x2414 logical
pinkRange	[85,20,-20;100,60,20]
se	1x1 strel
totalArea	5781530

55 pav. MATLAB programos suskaičiuoti išvesties duomenys

Indikacijų plotas randamas pasitelkiant formulę (6) ploto skaičiavimui, o lyginamojo bendro bandinio ploto, kuris yra apskritimo formos skaičiavimui naudojama formulė (7)

$$S_{ind.} = \frac{A_{band.} \cdot x_{ind.} \%}{100}; \quad (6)$$

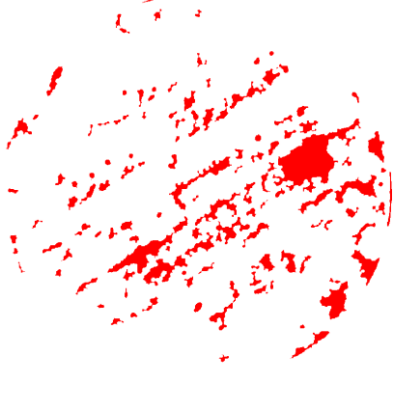
Čia, $S_{ind.}$ – yra indikacijų plotas dm^2 arba mm^2 , $A_{band.}$ – apskrito bandinio plotas dm^2 arba mm^2 , $x_{ind.} \%$ – pateikta indikacijų procentinė išraiška MATLAB programoje.

$$A = \pi r^2; \quad (7)$$

Čia, A – apskrito bandinio plotas dm^2 arba mm^2 , r – bandinio spindulys, mm.

$$A = 3,14 \cdot 50^2 = 7854 \text{ mm}^2;$$

11 lentelė. Bandinių paviršiaus porėtumo įvertinimas po liejimo

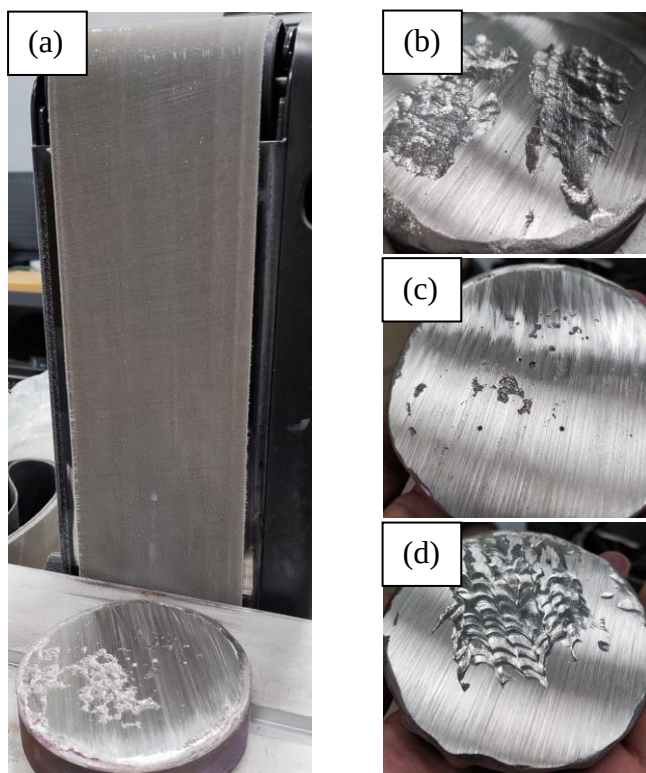
1.	Bandinys Nr. „TIG“	Bandinys Nr. „GA“	Bandinys Nr. „AR“
2.			
3.	12,7515 %	8,1554 %	0 %
4.	0,100 dm^2	0,064 dm^2	0 dm^2
5.	1001,50 mm^2	640,52 mm^2	0 mm^2

Čia:

- 1 – bandinio žymuo;
- 2 – išvesties analizės vaizdas po bandymo pateikiamas MATLAB programoje;
- 3 – programos suskaičiuotas plotas procentais;
- 4 – suskaičiuotas indikacijų plotas kvadratiniais decimetrais;
- 5 – suskaičiuotas indikacijų plotas kvadratiniais milimetrais;

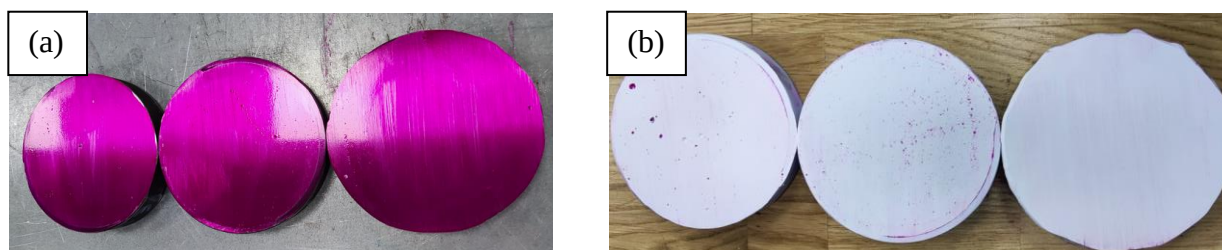
Skvarbumo bandymų rezultatai suteikė esminių įžvalgų apie babito dangų, pagamintų skirtingais metodais, poringumo lygį. Šios išvados yra labai svarbios vertinant dangų kokybę ir struktūrinį vientisumą. Pirma, liejimo būdu tiesiai iš tiglio sukurto bandinio paviršiaus poringumas buvo 12 procentų. Šis didelis porėtumas rodo, kad dangoje yra trūkumų. Tai rodo, kad tiesioginio liejimo metodą gali reikėti toliau optimizuoti, kad būtų sumažintas porėtumas ir pagerinta bendra babito dangos kokybė. Priešingai, dangos, pagamintos naudojant liepsnos metodą, porėtumas buvo mažesnis – 8 proc. Nors šis metodas vis dar rodo tam tikrą porėtumą, šis metodas rodo pagerėjimą, palyginti su tiesioginiu liejimu iš tiglio. Tačiau, siekiant sumažinti akytumą ir pagerinti dangos veikimą, galima dar tobulinti. Pažymėtina, kad elektrolankinis metodas davė paviršių su 0 procentų poringumu, o tai reiškia beveik tobulą dangą porėtumo požiūriu. Šis rezultatas parodo elektrolankinio metodo efektyvumą gaminant babito dangas su minimaliais defektais.

Siekiant geriau suprasti babito dangų porėtumo gylį ir mastą, buvo atlikti papildomi tyrimai. Pradinis skverbiklio bandymas atskleidė, kad paviršiuje yra porėtumas, tačiau buvo svarbu nustatyti, ar šie defektai išsiplėtė giliau į dangą, ar apsiribojo paviršiaus sluoksniais. Šiai problemai spręsti buvo imtasi metodinio požiūrio. Pirma, bandiniai, padengti babetu, buvo kruopščiai šlifuojami (56 pav. (b), (c), (d)), kad būtų pašalinti paviršiaus sluoksniai, išsaugant apatinį metalą. Šlifavimas buvo atliekamas babetą šlifuojant su mikronų klasės mineraliniais abrazyvais, konkrečiai – 3M Trizact A56 markės šlifavimo juosta, o naudojamos staklės buvo „Scheppach BTS900“ (56 pav. (a)). Po šlifavimo proceso bandymas skverbikliais buvo pakartotas dar du kartus ant visiškai lygaus šlifuoto babito medžiagos paviršiaus skirtinguose gyliuose.



56 pav. „U“ formos tipo bandinių šlifavimas iki plokščio ir lygaus paviršiaus: (a) – šlifavimo staklės, (b) – bandinys Nr. „TIG“, (c) – bandinys Nr. „GA“, (d) – bandinys Nr. „AR“

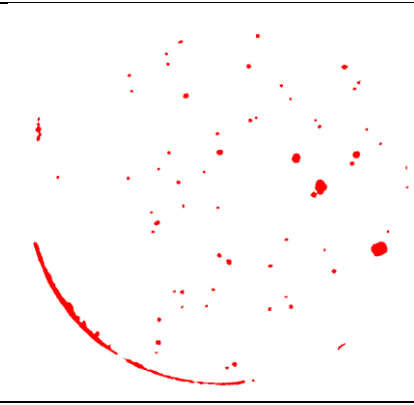
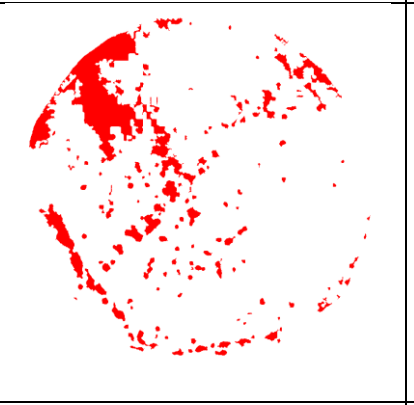
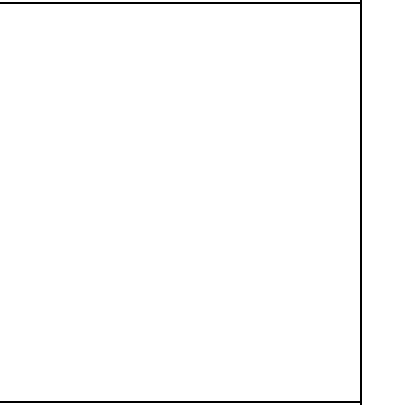
Toliau po šlifavimo buvo atliekamas pakartotinis bandymas skverbikliais ant visiškai plokščio babito dangos paviršiaus (57 pav.).



57 pav. Pakartotinis bandymas skverbikliais, ant lygių paviršių: (a) – užnešus skverbiklį, (b) – po ryškinimo

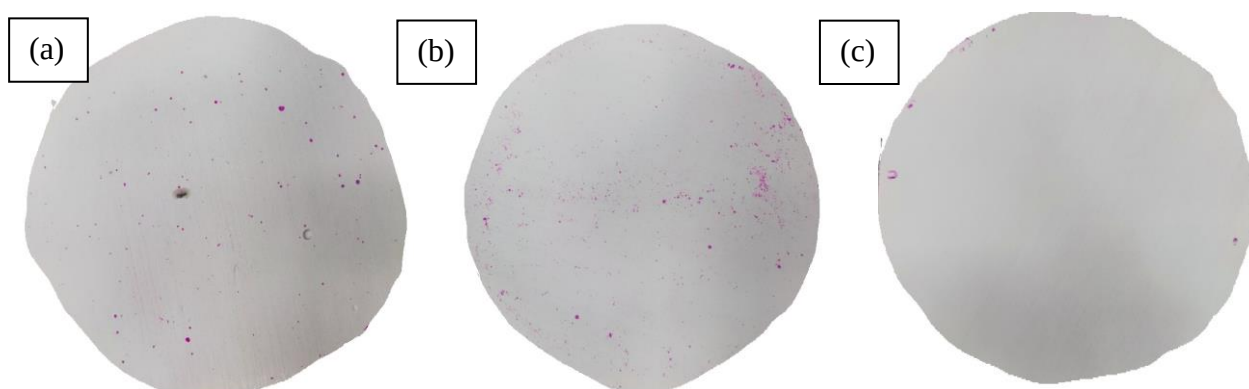
Kaip ir pradiniam bandyme, atvėrus sluoksnių struktūrą porėtumas išliko, tačiau verta paminėti, kad šį kartą vizualiai jis žymiai mažesnis. Teisingam palyginimui, vėl atliekami skaičiavimai MATLAB programoje (12 lentelė).

12 lentelė. Bandinių paviršiaus porėtumo įvertinimas po šlifavimo

1.	Bandinys Nr. „TIG“	Bandinys Nr. „GA“	Bandinys Nr. „AR“
2.			
3.	1,2889 %	7,6869 %	0 %
4.	0,010 dm ²	0,060 dm ²	0 dm ²
5.	101,23 mm ²	603,72 mm ²	0 mm ²

Pakartotinis bandymas atskleidė reikšmingą babilu dengtų bandinių porėtumo lygio sumažėjimą. Anksčiau paviršiaus porėtumas buvo matuojamas 12 procentų liejant iš krosnies ir 8 procentų liejant liepsna. Tačiau po vėlesnio šlifavimo ir PT bandymo skirtinguose dangos gyliuose abiejų šių metodų porėtumas buvo nustatytas iki maždaug 1,5 ir 7,5 proc. vertės. Šis porėtumo sumažėjimas „TIG“ bandinyje yra daug žadantis pokytis, rodantis, kad šlifavimas turėjo teigiamą poveikį sumažinant paviršiaus defektus. Nepaisant to, interpretuojant šiuos rezultatus reikia laikytis atsargaus požiūrio, nes būtina įvertinti, ar ši tendencija yra nuosekli, ir ištirti visus pagrindinius veiksnius, prisidedančius prie pastebėtų pokyčių.

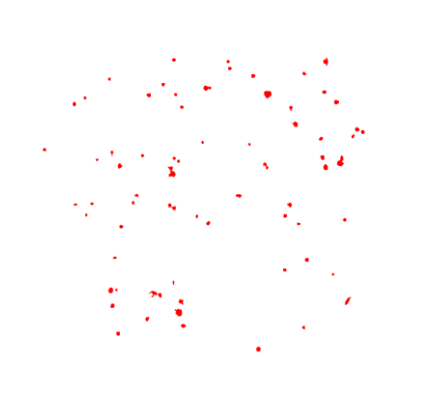
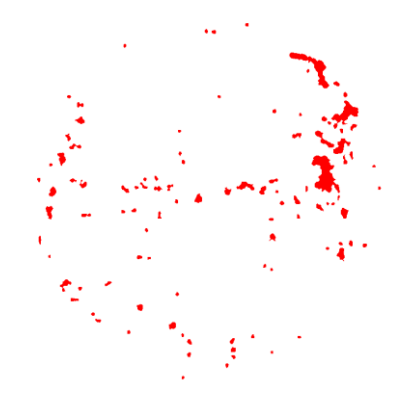
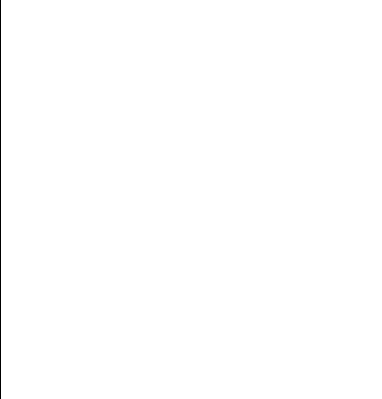
Įdomu tai, kad nepaisant geresnės liejimo iš tiglio dangos, liejimas naudojant elektrolankinį metodą ir toliau yra beveik tobulos būklės su nepastebimu porėtumu. Šis nuoseklumas rodo elektrolankinio metodo tvirtumą ir pabrėžia būtinybę atlikti tolesnį tyrimą (58 pav.), siekiant nustatyti pagrindines kitų metodų skirtumų priežastis (13 lentelė).



58 pav. „U“ formos tipo bandiniai po galutinio bandymo, vaizdas paruoštas MATLAB analizei: (a) – TIG bandinys, (b) – GA bandinys, (c) – AR bandinys

Vizualiai galima pastebėti reikšmingą skirtumą galutiniame rezultate, taip galima įžvelgti ir „AR“ bandinio mažus defektus, tačiau pastarieji atmeti dėl technologinio galo savybių, kur atsiranda netolygumai dėl pagrindinio metalo briaunos, kai pagal technologiją suliejimas čia nereikalingas.

13 lentelė. Bandinių paviršiaus porėtumo įvertinimas po galutinio šlifavimo

1.	Bandinys Nr. „TIG“	Bandinys Nr. „GA“	Bandinys Nr. „AR“
2.			
3.	0,5553 %	2,0931 %	0 %
4.	0,004 dm ²	0,016 dm ²	0 dm ²
5.	43,61 mm ²	164,39 mm ²	0 mm ²

Išsami aktytumo tendencijų analizė suteikė vertingų įžvalgų apie babito dengimo procesus ir ateityje padės toliau tobulinti, kad įvairiose srityse būtų nuolat užtikrinamos aukštos kokybės dangos. Šių vėlesnių pakartotinių bandymų rezultatai suteikė kritinių įžvalgų apie porėtumo gylį ir pasiskirstymą. Įvertinus defektų buvimą įvairiuose dangos gyliuose, tapo įmanoma atskirti, ar porėtumas apsiribojo paviršiniais sluoksniais, ar prasiskverbė giliau į dangą.

Apibendrinant galima pasakyti, kad gilesnis babetu dengtų bandinių tyrimas atskleidė daug žadančią porėtumo lygio mažėjimo tendenciją. Pakartotinai įvertinus tapo akivaizdu, kad gilinant į dangų sluoksnius porėtumas gerokai sumažėjo. Konkrečiai, liejimo iš tiglio metodas dabar rodo mažą 0,5 procento porėtumą, o tai yra pasiektas aukštas kriterijus, palyginti su pradiniais matavimais. Panašiai liejimo atvira liepsna metodas, kurio porėtumas ankstesniuose bandymuose buvo 8 procentai, buvo pasiektas 2 procentų porėtumas didesniame dangos gylyje. Šios išvados rodo dengimo proceso kitimus, dėl kurių dangos turi didesnius paviršiaus defektus. Tuo pačiu metu elektrolankinis metodas nuolat demonstruoja išskirtinį našumą, išlaikant 0 procentų porėtumą net ir paskutinių bandymų metu. Svarbu pažymėti, kad šie rezultatai atspindi dangos sluoksnių porėtumą ir neatsižvelgia į galimus kitus defektus, esančius tarp skirtingų sluoksnių.

Aktytumo skirtumai tarp metodų pabrėžia būtinybę tęsti tyrimus, siekiant tiksliai nustatyti pagrindinius veiksnius, atsakingus už šiuos neatitikimus. Kadangi nors ir stebimas porėtumo mažėjimas skirtinguose gyliuose, vis vien pagal ISO 4386-3 B lygmenį, bandiniai „TIG“ ir „GA“ neatitiko iškeltų kokybės parametrų, kai nelinijinių defektų gali būti iki 4 vienetų per 16 dm² plotą, o didžiausias galimas defektų plotas yra 20 mm² / dm². Nors ir bandinys „AR“ pabrėžė elektrolankinio metodo nepalyginamus skirtumus, pasiekiant aukščiausią kokybę, būtina atlikti vidaus defektų tyrimą bandinių neardant, t.y. nešlifuojant. Tokiu būdu būtų patikrinta ar bandiniai neturi paslėptų defektų, kurių bandymas skverbikliais neatskleidė. Šiam tikslui pasiekti dar prieš šį bandymą buvo atliktas radiografinis tyrimas.

3.7.5. Radiografinis tyrimas

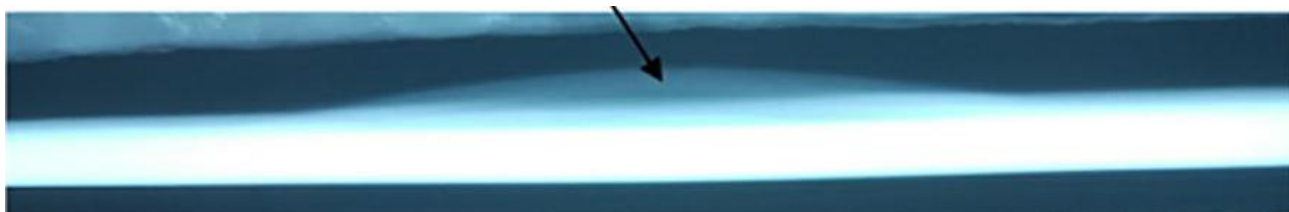
Radiografinis tyrimas pagal EN ISO 17636-1 standartą atlieka svarbų vaidmenį vertinant medžiagų vidinę struktūrą ir vientisumą, o jo įgyvendinimas šiame eksperimente apėmė prieš tai nagrinėtų trijų

skirtingų bandinių tyrimą: "AR", "GA" ir "TIG". Šis neardomasis bandymo metodas naudoja rentgeno spindulius, kad prasiskverbtų į medžiagą, sukuriant vaizdą, kuris gali atskleisti vidinius defektus, netolygumus, tuštumas ar kitus pakitimus. Bandymas atliktas UAB „IREMAS“ Metalų bandymų laboratorijos rentgenologijos skyriuje (59 pav.)



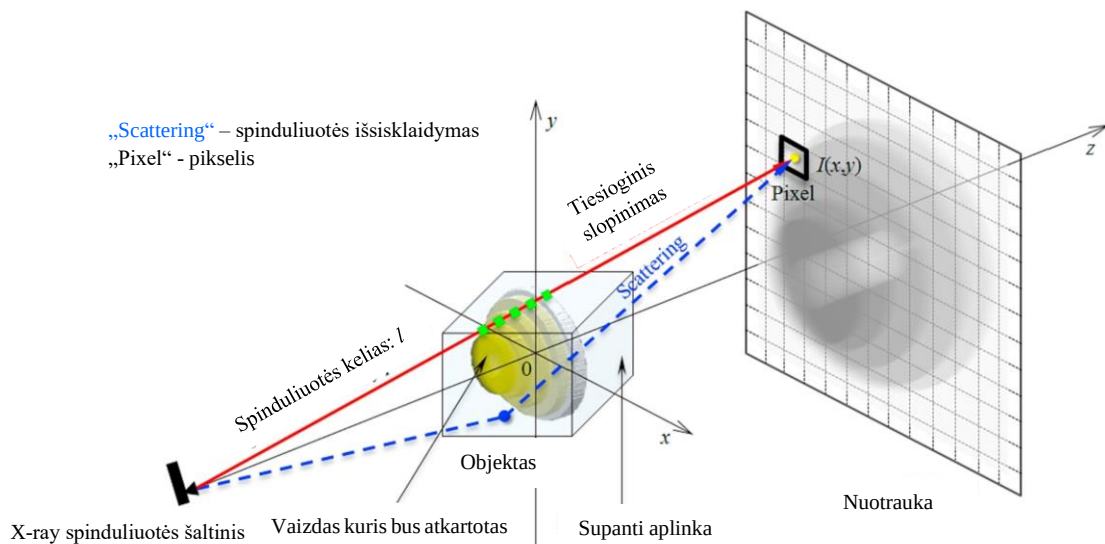
59 pav. Rentgenologijos švietimo patalpa

Rentgeno tyrimas suteikė išsamų babito dangų ir metalinio pagrindo vidinės struktūros vaizdą, leidžiantį nustatyti bet kokius galimus defektus, kurie nebuvo matomi atliekant paviršiaus ir tarpsluoksnių patikrinimus. Šis metodas ypač vertingas užtikrinant dengtų komponentų patikimumą ir saugumą, nes leidžia aptikti vidinius defektus, galinčius įtakoti dangų techninius parametrus. Radiografinio tyrimo rezultatai suteikia vertingų įžvalgų apie babito dangų, pagamintų skirtingais liejimo metodais, vidinį vientisumą. Ši informacija yra labai svarbi norint įvertinti bendrą dangų kokybę ir toliau tobulinti liejimo procesus, kad atitiktų griežtus pramonės standartus ir taikymo reikalavimus (60 pav.) [28].



60 pav. Dangos vidinio vientisumo rentgeno nuotrauka [28]

Šis eksperimentinis bandymas remiasi rentgeno vaizdavimo principais, siekiant atskleisti vidinę medžiagų struktūrą. Mūsų eksperimente rentgeno spindulių generatorius atliko pagrindinį vaidmenį šiame procese. Rentgeno spindulių generatoriai sukuria didelės energijos elektromagnetinę rentgeno spinduliuotę, kuri praeina per tiriamą medžiagą. Rentgeno spindulių sąveika su vidine medžiagos struktūra lemia skirtingą slopinimo lygį, sukuriantį struktūros vaizdo šešėlį ant juostos, esančios priešingoje pusėje (61 pav.) [29].



61 pav. Rentgeno spindulių kertamo objekto šešėlinio atvaizdavimo schema [29]

Rentgeno spindulių generatorius skleidžia kontroliuojamą rentgeno spindulių spindulį, kuris prasiskverbia į tiriamąjį objektą. Storesnės ir tankesnės medžiagos sritys sugeria daugiau rentgeno spindulių ir išryškintoje juostoje atrodo kaip tamsesnės sritys. Priešingai, mažesniu storio ar tankiu pasižyminčios sritys praleidžia daugiau rentgeno spindulių, todėl plėvelėje susidaro šviesesnės vietos. Šis diferencinis slopinimas suteikia išsamų vidinių savybių vaizdą, įskaitant defektus, netolygumus ir tankio pokyčius [29]. Atliekant radiografinius bandymus šiame eksperimentiniame tyrime, rentgeno vaizdai užfiksuoti naudojama speciali juosta (plėvelė). Plėvelė, dedama už bandinio, užfiksuoja perduodamą spinduliuotę, sudarydama latentinį vaizdą, kuris tampa matomas po išryškinimo. Tada gauta rentgenograma analizuojama, ar nėra medžiagos pažeidimų ar struktūrinių problemų (62 pav.).



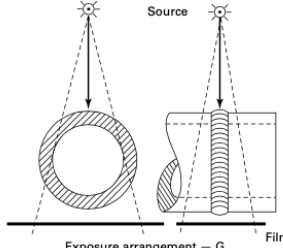
62 pav. Rentgenogramos analizė po ryškinimo

Rentgeno spindulių generatoriaus ir specialios juostos derinys atliekant radiografinius tyrimus leidžia nuodugniai ištirti medžiagų vidinę struktūrą, suteikiant vertingų įžvalgų apie išbandytų bandinių vientisumą ir kokybę. Šis metodas plačiai taikomas įvairiose pramonės šakose, įskaitant gamybą ir medžiagų bandymus, siekiant užtikrinti svarbiausių komponentų patikimumą ir saugą [29]. Šiame bandyme naudojama įranga pateikiama 14 lentelėje., o bandymų parametrai 15 lentelėje.

14 lentelė. Radiografinio bandymo metu naudota įranga

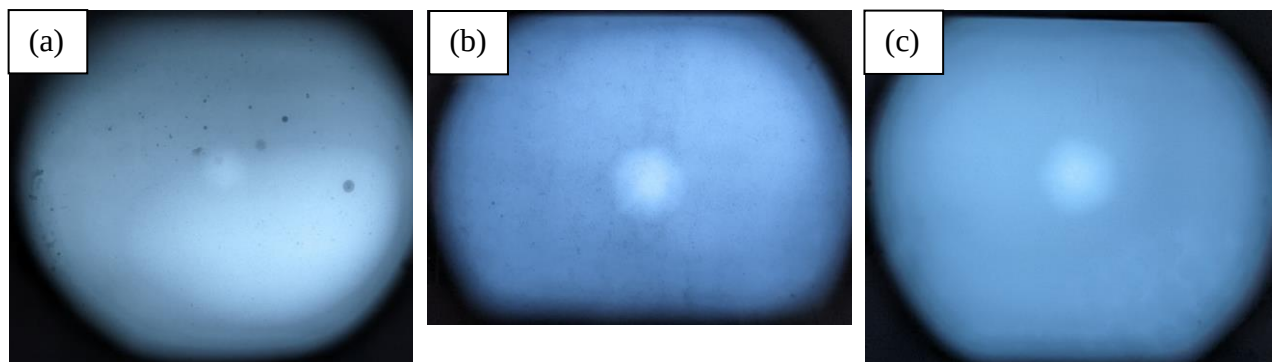
Eil. Nr.	Įrangos pavadinimas	Gamintojo, modelio pavadinimas	Techninės charakteristikos, specifikacija
1	Rentgeno radiografas	Teledyne ICM SiteX D1802	0,8x0,8mm (EN 12543)
2	Negatoskopas	LCNDT FV-2008plus	Optinis tankis iki 4,3
3	Densitometras	Wilnos LCD-51	Optinis tankis iki 5,0
4	Rentgeno plėvelė	Carestream Industrex MX125 contactpak	C3 (EN ISO 11699-1) , Švinas (Pb)
5	Ekranai spinduliuotės slopinimui	Švinas (Pb)	priekinis – 0,027, galinis – 0,027, papildomas iš galo – 0,2 mm
6	Ryškinimo aparatas	DURR XR 24 NDT	Automatinis
7	Ryškalas	XR D NDT Developer	-
8	Fiksažas	XR F NDT Fixer	-

15 lentelė. Radiografinio bandymo parametrai

Eil. Nr.	Parametras	Nustatyta / kontroliuojama vertė	Pastaba
1	Aplinkos temperatūra, ° C	+20° C	Rh 25%
2	Apšvietimas, lx	500 lx	Dirbtinis
3.1	Bandymo schema pagal EN	Nr. 11/12 ↔○	EN ISO 17636-1:2022
3.2	Bandymo schema pagal ASME	T-271.2(b)(2) 	ASME BPVC Section V edition 2021
4	Objekto storis, mm	25,00 mm	Pagr. metalo su danga
5	Objekto medžiaga(-os)	Babitas B-83 / S355J2+N	2 medžiagos
6	Fokuso atstumas, mm	500 mm	fiksuotas
7	Anodo įtampa, kV	180 kV	maks. 180 kV
8	Anodo srovė, mA	2,0 mA	maks. 3 mA, prie 180kV – 2mA
9	Ekspozicijos laikas, min	9,6 min	SiteX programinė įranga
10	Jautrio indikatoriaus padėtis	Iš šaltinio pusės	3.1 ir 3.2 punktai
11	Jautrio indikatoriaus tipas	10FEEN	ISO 19232-1
12	Jautrio indikatoriaus minimalus jautris	W14	ISO 19232-1
13	Plėvelės jautris, mm	0,016 mm	ISO 19232-1
14	Gautas optinis tankis	2,8	Wilnos LCD-51

Toliau pateikiami rezultatai susiję su šiuo eksperimentiniu tyrimu. Verta paminėti jog bandymas yra paremtas LST EN ISO 17636-1, nors ir babito medžiagos savo apimtyje nenurodo. Susijęs standartas LST EN ISO 10675-1 defektų nustatymui nėra taikomas, kadangi tai eksperimentinis tyrimas, ir objektas nėra standartinis. Kadangi radiografinis tyrimas kaip ir bandymas skverbikliu yra kokybinis

tyrimo metodas negeneruojantis skaitinių reikšmių, vertinimas yra atliekamas vizualiniu principu. Dėl sudėtingų techninių sąlygų, tikslų juostos vaizdą konvertuoti į skaitmeninę nuotrauką techniškai neįmanoma kadangi plėvelė yra peršviečiama naudojant negatoskopą kuris šviečia dideliu ryškumu generuojant tankų optinį srautą. Todėl fotoaparatas, dėl jam neįprasto optinio tankio ir plėvelės slopinimo, nefiksuoja tiksliai matomo vaizdo ir jį fiksuoja ne visai taip, kaip yra matoma akimi. Skaitinio metodo pritaikyti šiam tradiciniam metodui techniškai neįmanoma. Rezultatai pateikiami 63 paveikslėlyje.



63 pav. Radiografinio tyrimo rezultatai: (a) – „TIG“ bandinys, (b) – „GA“ bandinys, (c) – „AR“ bandinys

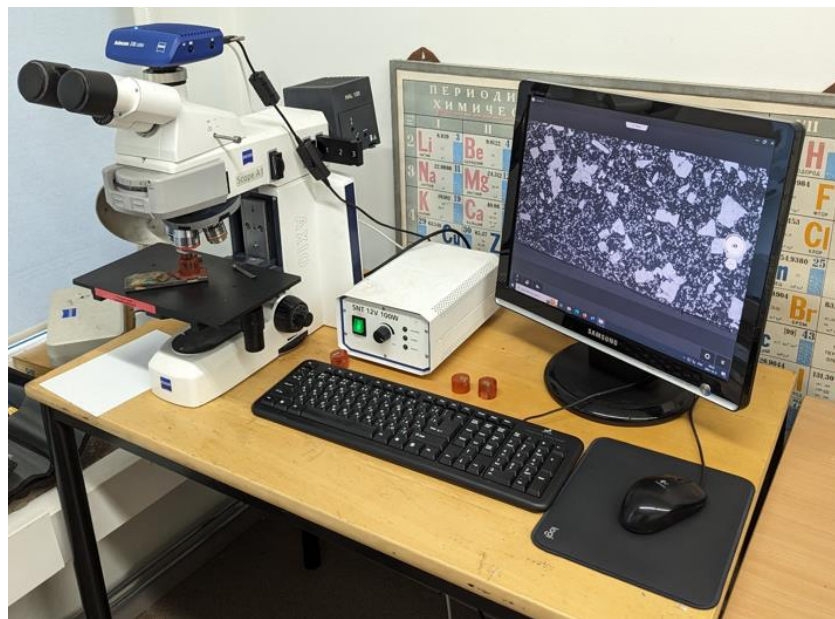
Kaip ir bandymo skverbikliais metu buvo nustatytas didelis porėtumas „GA“ ir „TIG“ bandiniuose, taip ir radiografinio tyrimo metu matoma panaši tendencija. Tačiau šio eksperimento metu, bandiniai lieti naudojant atviros liepsnos ir tiesioginį metodą, pasižymi sąlyginai mažesniu indikacijų kiekiu nei analizuojant paviršinius defektus. „GA“ bandinyje indikacijų tipas nesikeičia, pasižymi smulkiosiomis poromis, kurios atvaizduojant skaitmenine nuotrauka matosi sunkiau nei žiūrint analoginį vaizdą. Bandinys „TIG“ kaip ir išorėje, taip ir viduje pasižymi didelio skersmens poromis, tačiau didelėmis sancaupomis nepasižymi, kaip buvo matoma paviršiuje. Lyginant su bandymu skverbikliais nuotraukose matomas vaizdas gali būti prilygstantis 12 lentelėje – „TIG“ bandinys ir 13 lentelėje – „GA“ bandinys. Naudojant volframo elektrodą inertinių dujų aplinkoje padengtas bandinys ir toliau parodo nepriekaištingą kokybę, indikacijų kiekis yra lygus nuliui.

Apibendrinant galima teigti jog šis metodas nežinomų defektų neatskleidė, o patvirtino prieš tai atlikto metodo rezultatus analizuojant skirtingus tarpsluoksnius, bei parodė jog paviršiaus netolygumai neatsispindi rentgeno nuotraukose, taip pat iškilo hipotezė jog rentgeno metu indikacijos perdengia vieną kitą, todėl matomos atsitiktinės, skirtinguose sluoksniuose esančios indikacijos. Galima teigti, kad teisingam įvertinimui būtina naudoti tiek paviršiaus defektų nustatymų, tiek vidinių defektų nustatymo neardomosios kontrolės metodus.

3.7.6. Medžiagos struktūros mikro tyrimai

Mikrostruktūros analizė yra pagrindinis metodas, naudojamas tiriant medžiagų mikroskopines charakteristikas, suteikiant vertingų įžvalgų apie jų sudėtį, grūdelių struktūrą ir bendrą vientisumą. Analizė apima medžiagos vidinių savybių tyrimą mikroskalėje, atskleidžiant detales, kurios yra labai svarbios norint suprasti jos mechanines ir chemines savybes. Mikroskopinė analizė leidžia išsamiai ištirti įvairius komponentus, padeda suprasti lydinio elgseną skirtingomis eksploataavimo sąlygomis ir patobulinti dengimo procesą siekiant optimalių rezultatų.

Iš esmės metalurginės mikrostruktūros analizėje dažniausiai naudojama optinė mikroskopija, siekiant padidinti ir vizualizuoti mikro dydžio bandinio savybes. Optinė mikroskopija naudoja matomą šviesą bandiniams tirti. Šis metodas leidžia stebėti grūdelių, fazių, intarpų ir kitų mikrostruktūrinių elementų išsidėstymą medžiagoje. Mikrostruktūros tyrimas atliktas Kauno technologijos universiteto mechanikos ir dizaino fakulteto mikrostruktūrų tyrimų laboratorijoje. Naudojamas mikroskopas „Zeiss AXIO Scope A1“ su objektyvais nuo 5 iki 50 kartų didinimo galimybe, apšvietimas „HAL 100“, o atvaizdavimo kamera „Zeiss Axiocam 208 Color“ su Zeiss Labscope programine įranga (64 pav.).



64 pav. Zeiss AXIO Scope A1 mikroskopas

Mikrostruktūros analizė atskleidė informaciją apie grūdelių dydį, pasiskirstymą ir morfologiją, kuri tiesiogiai įtakoja medžiagos mechaninį stiprumą, kietumą ir kitas savybes. Tai taip pat padėjo nustatyti bet kokius pažeidimus, defektus ar anomalijas, kurios gali turėti įtakos dangos veikimui.

Pagrindiniai babito lydinių mikrostruktūriniai komponentai yra šie:

Alavo pagrindo matrica – pagrindinė sudedamoji dalis, sudaranti ištisinę matricą, suteikiančią lydiniai minkštas ir kaliašias savybes.

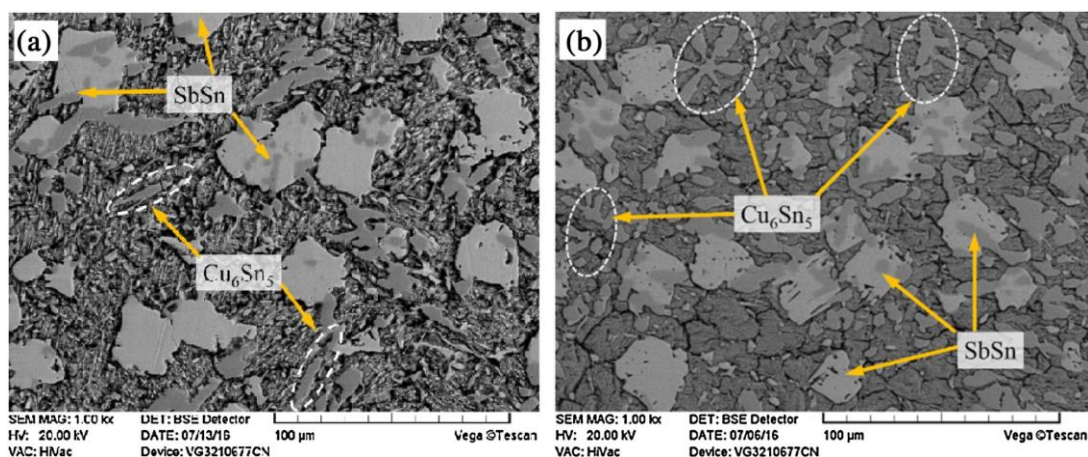
Švinas – yra išsklaidytos dalelės arba pailgi grūdeliai matricoje, prisidedantys prie bendrų lydinio tepimo savybių.

Stibis – padidina lydinio kietumą ir dažnai randamas kristaliniuose dariniuose matricoje.

Varis – padidina lydinio stiprumą ir atsparumą dilimui, pasirodo kaip išsklaidytos fazės arba kartu su kitais elementais.

Babito mikrostruktūrai būdinga išskirtinė minkštos, įterpiamos metalinės matricos, susimaišiusios su kietesnėmis kristalinėmis fazėmis, sudėtis. Babito lydinių mikrostruktūra paprastai susideda iš alavo pagrindo matricos su įterptomis alfa kietojo tirpalo alavo ir vario (Cu_6Sn_5) fazėmis alave arba kietųjų kubo formos beta fazės alavo – stibio (SnSb) intarpų. Alavo – vario intermetaliniai junginiai dažnai pasižymi žvaigždės formos dariniais, o Alavo ir stibio – plokšteline forma (65 pav.). Būtent šie lydiniai ir yra žinomi dėl savo plokštelinės arba sluoksninės struktūros, kai minkštesnė alavo alfa kietojo tirpalo matrica supa ir palaiko kietesnes kristalines fazes kurios paprastai identifikuojamos kaip atskiri kristaliniai grūdeliai arba dalelės. Struktūros plokštelinis pobūdis yra lydinio kietėjimo

proceso rezultatas, kai skirtingi komponentai kietėja esant skirtingoms temperatūroms ir sudaro sluoksnius medžiagoje [30].



65 pav. Ėsdinto babito struktūra: (a) – netekstūruotas paviršius, (b) – lazeriu tekstūruotas babito paviršius [30]

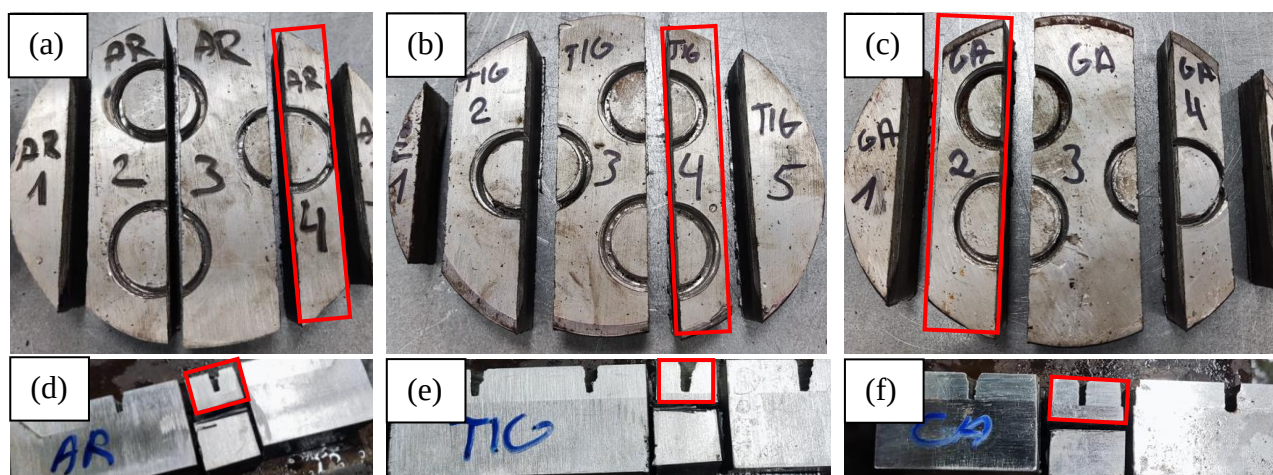
Babito dangų mikrostruktūra gali labai skirtis dėl kelių įtakingų veiksnių, kurių kiekvienas atlieka lemiamą vaidmenį nustatant galutinę lydinio struktūrą. Įtakingiausios skirtingų babito mikrostruktūrų priežastys yra kietėjimas ir aušinimo greitis, kuriuo išlydytas babito lydinys aušinamas liejimo proceso metu, turi įtakos grūdelių dydžiui ir pasiskirstymui mikrostruktūroje. Greitas aušinimas gali sukelti smulkesnius grūdelius, o lėtesnis aušinimas gali sukelti didesnius kristalų darinius. Priemaišų ar tarpų, pvz., oksidų ar nemetalinių dalelių, buvimas kietėjimo metu gali paveikti grūdelių susidarymo vietas ir turėti įtakos mikrostruktūros vienodumui ir vientisumui, o lydinio sudėties (įskaitant alavo, stibio, vario ir kitų priedų proporcijas) pokyčiai lemia fazių susidarymo ir kristalinės gardelės struktūrų skirtumus. [30]. Paruošimo procesas paprastai apima ne didelių medžiagos dalių paruošimą pjaustant ir poliruoja. Šiame tyrime buvo naudojamas automatinis „Lam Plan“ šlifavimo ir poliravimo įrenginys (66 pav.). Po to paruošti bandiniai tiriami mikroskopu, o gauti vaizdai analizuojami ir daromos išvados apie medžiagos mikrostruktūrą.



66 pav. Automatinis šlifavimo ir poliravimo įrenginys „Lam Plan“

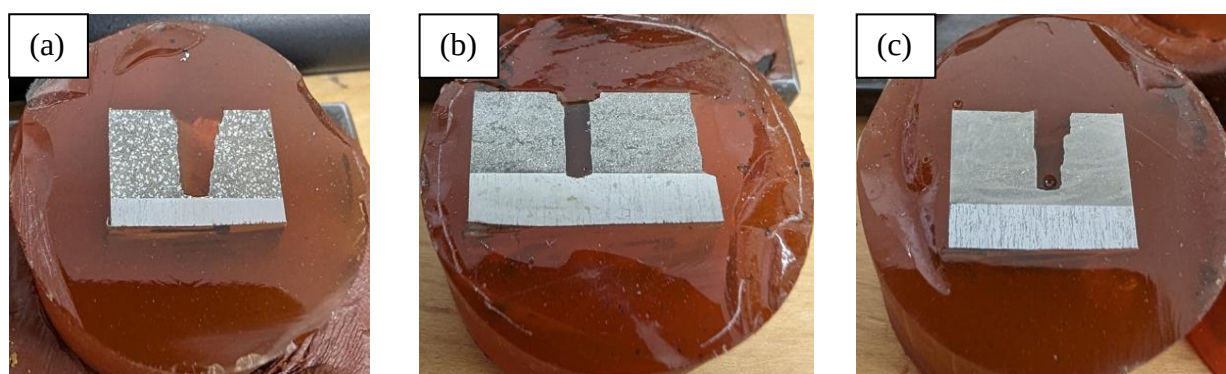
Šio babito dangų eksperimento kontekste mikrostruktūros analizė vaidins lemiamą vaidmenį siekiant suprasti, kaip skirtingi dengimo metodai daro įtaką grūdelių išdėstymui ir kitoms mikrostruktūrinėms

savybėms. Koreliuodami mikrostruktūros duomenys su kitais bandymų rezultatais, leis visapusiškai suprasti dangos kokybę, ilgaamžiškumą ir eksploatacines charakteristikas. Mikrostruktūros tyrimui buvo pasirinkta naudoti apvalius „U“ formos tipo bandinius: „TIG“, „GA“ ir „AR“. Pradžioje šie bandiniai buvo padalinti į 5 dalis, tolimesniems sekančių projektų tyrimams. Iš kiekvieno bandinio vienos pasirinktos dalies skerspjūvio buvo išpjautos ne didelės sritys, kad tilptų į ruošiamą mikrošlifą formą (67 pav.).



67 pav. Išpjauti bandinukai mikrošlifų ruošimui, pasirinkta: (a) – „AR“ bandinio 4 dalis, (b) – „TIG“ bandinio 4 dalis, (c) – „GA“ bandinio 2 dalis, (d) – „AR“ mikrošlifų ruošinys, (e) – „TIG“ mikrošlifų ruošinys, (f) – „GA“ mikrošlifų ruošinys

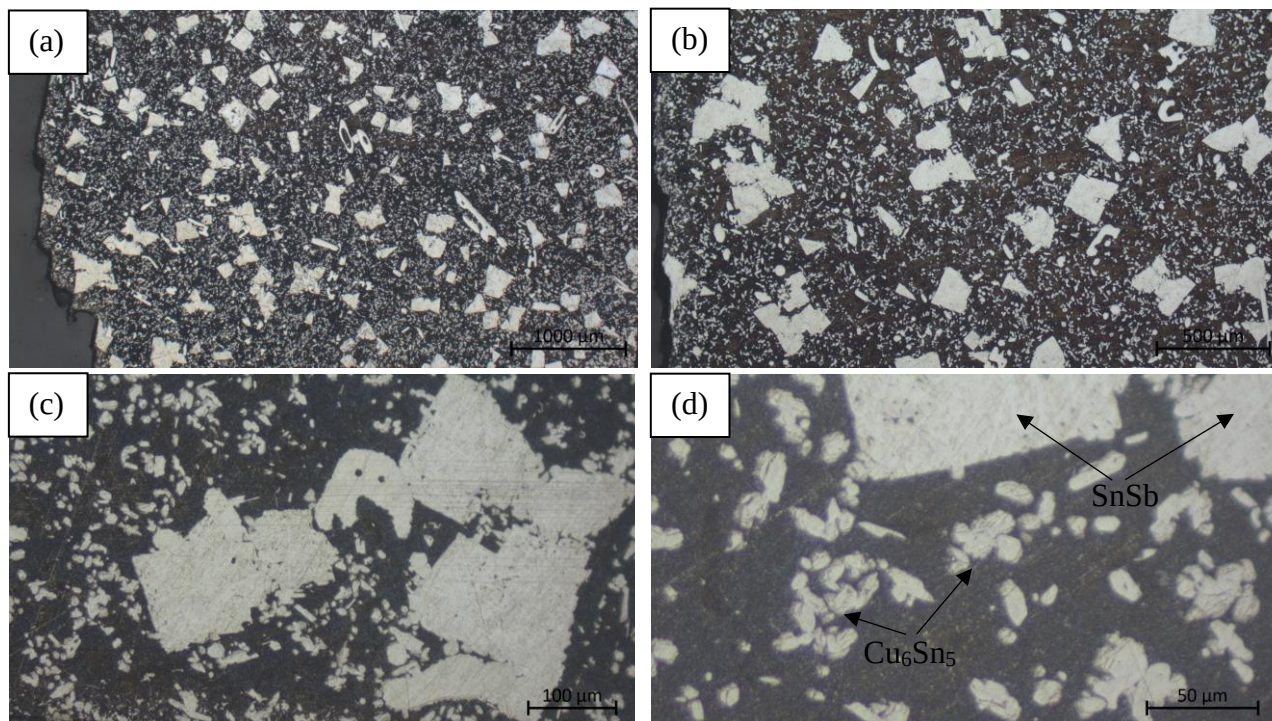
Atliekant metalurginės mikrostruktūros analizę bandiniams, dėmesys skiriamas ir į epoksidą. Epoksidas yra universalus polimeras, plačiai naudojamas kaip liejimo medžiaga dėl savo puikaus sukibimo, mažo susitraukimo kietėjimo metu ir gebėjimo uždengti sudėtingas formas. Bandinių gaminimo procedūra apima metalinio paviršiaus paruošimą, kuris yra švarus, sausas ir be teršalų. Tada metalinis bandinys atsargiai įdedamas į formą, o skysta epoksidinė derva, sumaišyta su kietikliu, užpilama ant metalinio paviršiaus. Epoksidinis mišinys išsiskverbia į mikroskopinius metalo nelygumus, užtikrindamas tvirtą metalo ir epoksidinės matricos ryšį (68 pav.).



68 pav. Paruošti mikrošlifai struktūrinei analizei: (a) – „TIG“ bandinys, (b) – „GA“ bandinys, (c) – „AR“ bandinys

Pati epoksidinė matrica susideda iš dviejų pagrindinių komponentų, tai epoksidinė derva ir kietiklis. Derva tai pagrindinis komponentas, suteikiantis matricai struktūrinį vientisumą ir lipnumo savybes. Kietiklis inicijuoja epoksidinės dervos polimerizacijos procesą, todėl susidaro kieta ir kryžminė struktūra. Mikrostruktūros analizėje azoto rūgštis (HNO_3) buvo panaudota kaip šlifuojantis agentas, siekiant

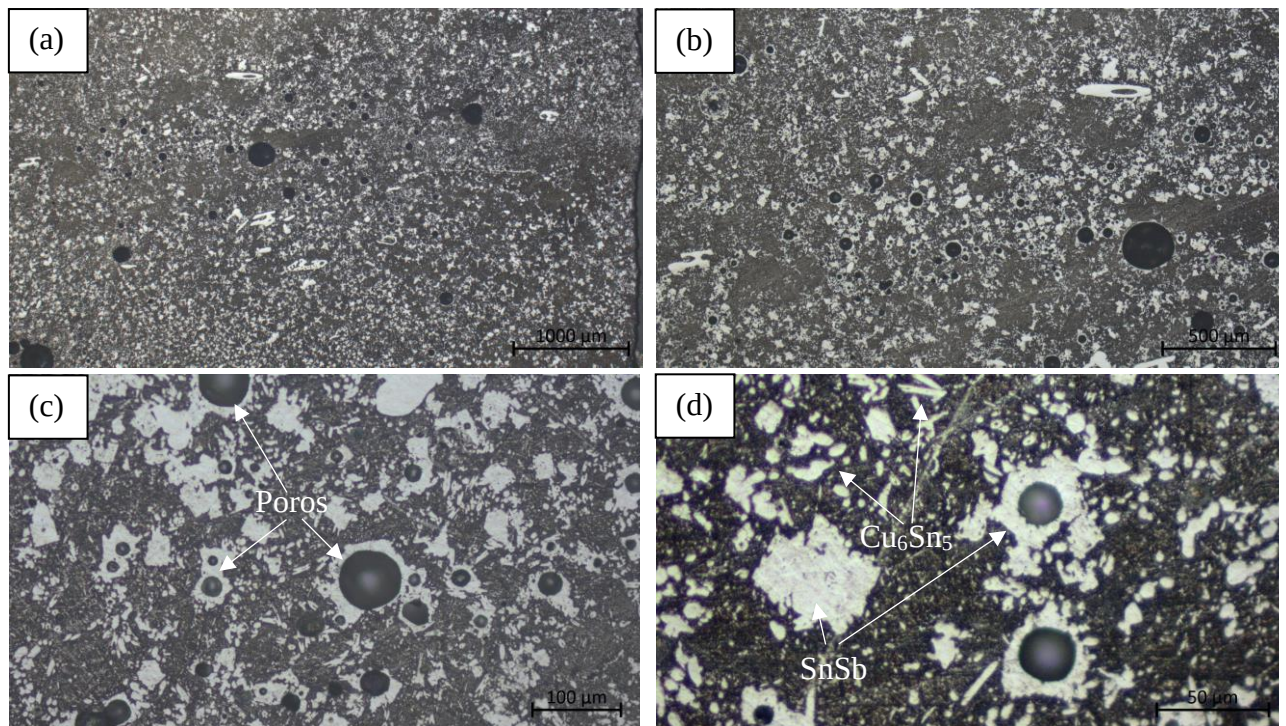
atskleisti metalų lydinių, įskaitant babito, struktūrines savybes. Naudojama ėsdinimui, azoto rūgštis selektyviai reaguoja su tam tikromis metalo mikrostruktūros fazėmis, sukurdamą kontrastą ir padarydama skirtingus struktūrinius komponentus geriau matomus mikroskopu. Šio eksperimentinio tyrimo rezultatai pateikiami 69, 70 ir 71 paveikslėlyje, kuriuose atitinkamai atspindi kiekvienos dangos struktūros padidintos 2,5, 5, 20 ir 50 kartų.



69 pav. Babito dangos, liejant tiesioginiu būdu tiesiai iš tiglio („TIG“ bandinys), mikrostruktūros tyrimo rezultatai: (a) – didinimas 2,5x, (b) – didinimas 5x, (c) – didinimas 20x, (d) – didinimas 50x

Mikrostruktūroje yra aiškiai matomi dideli Alavo-stibio (SnSb) junginiai, šalia jų taip pat ir smulkūs alavo-vario (Cu_6Sn_5) intarpai. Tiesiogiai iš krosnies išlietos babito dangos mikrostruktūra, kuriai būdingas didelių SnSb intarpų dominavimas, gali turėti didelės įtakos dangos savybėms. Neužbaigtas lydinio homogenizavimas gali būti viena iš priežasčių, kuomet lydinio komponentai, tokie kaip alavas (Sn) ir stibis (Sb), liejimo metu gali būti nevienodai susimaišę arba išsilydę, todėl susidarė vietinė koncentracija. Greitas kietėjimas arba netolygus aušinimo greitis liejimo metu gali prisidėti prie didesnių intarpų susidarymo kurie sukuria stambiagrūdę struktūrą.

Tokios struktūros minusai yra sumažėjusios mechaninės savybės. Šią teoriją taip pat patvirtina anksčiau atlikti tempimo bandymai, kur stiprumas buvo mažiausias tarp visų metodų. Nors stibis teoriškai didina babito kietumą, tačiau jo būvimas intermetaliniuose junginiuose to neįtakoja, o bendra struktūra dėl netolygumo pasižymi mažesniu kietumu lyginant su elektrolankiniu metodu. Pastebimi intarpai yra vaizdinis galimų liejimo proceso problemų indikatorius, todėl reikia koreguoti būsimus procesus jei tokia danga būtų pasirinkta eksploatacijai. Būtina reguliuoti tokius parametrus, kaip temperatūra, aušinimo greitis ir lydinio sudėtis, kurie gali padėti sumažinti didelių intarpų atsiradimą. Norint pagerinti mikrostruktūrą ir sumažinti žalingų intarpų buvimą, gali būti naudojamas terminis apdorojimas arba papildomi rafinavimo etapai.

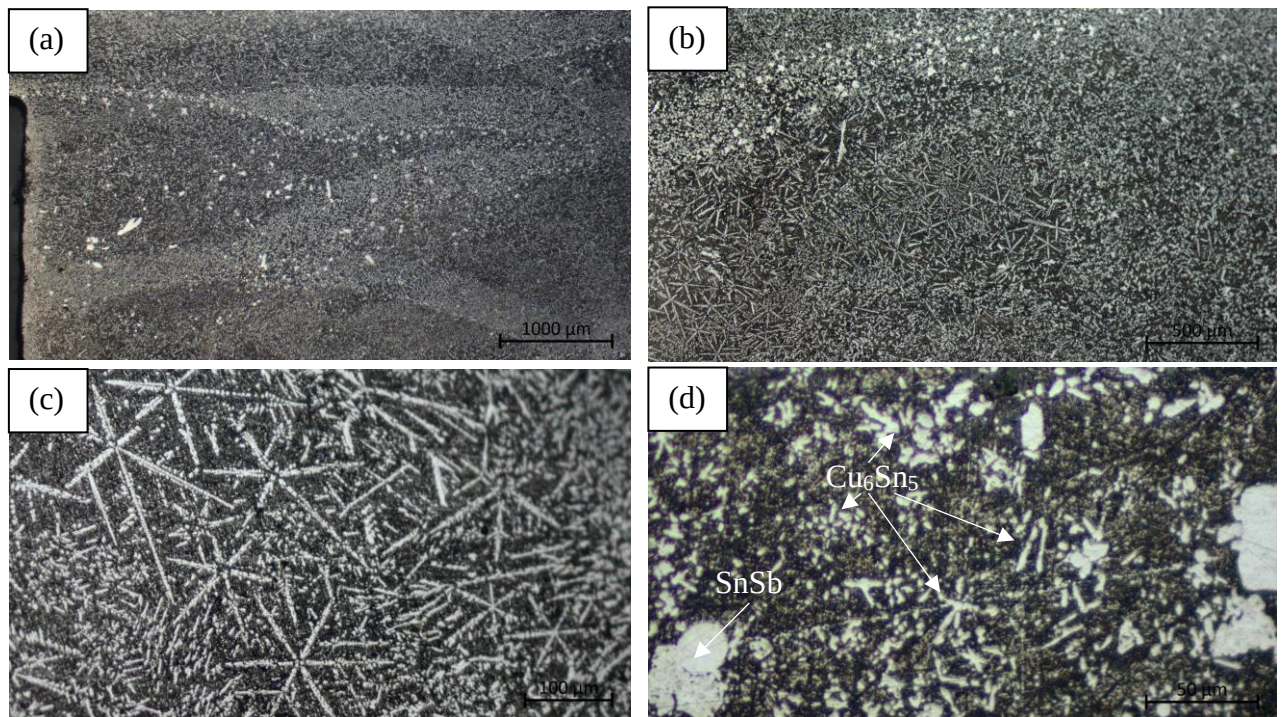


70 pav. Babito dangos, liejant liepsnos būdu („GA“ bandinys), mikrostruktūros tyrimo rezultatai: (a) – didinimas 2,5x, (b) – didinimas 5x, (c) – didinimas 20x, (d) – didinimas 50x

Babito dangos, liejamos tiesiai ant paviršiaus, naudojant liepsną, mikrostruktūra atskleidžia sudėtingą išsidėstymą, kuriam būdinga daugybė porų ir skirtingų intarpų. Dėmesio vertas pastebėjimas – įvairaus dydžio porų, išsidėsčiusių visoje dangoje, gausa. Be to, mikrostruktūroje yra SnSb intarpų, apsuptų Cu_6Sn_5 mažesniais dariniais, sudarančių nevienalytį tinklą dangoje. Tačiau šių intarpų kombinacija pasiskirsčiusi ne tokiu dideliu dydžių santykiu kaip tiesioginiame liejime, o tai pagerina bendrą dangos kokybę.

Įvairaus dydžio ir pasiskirstymo porų paplitimas rodo, kad dangoje yra tuštumų. Šios poros gali paveikti dangos struktūrinį vientisumą ir mechanines savybes. Įdomus aspektas yra porų uždarymas SnSb formose. Ši lokalizacija rodo ryšį tarp intarpų susidarymo ir porų atsiradimo liejimo ar kietėjimo proceso metu. Unikalią mikrostruktūrą pirmiausia įtakoja dinamiškas liepsnos panaudojimo pobūdis dengimo proceso metu. Liepsnos temperatūra, liejimo greitis ir sąveika su pagrindiniu metalu galimai prisideda prie stebimų savybių atsiradimo. Mikrostruktūra patvirtina ir ankstesnių bandymų rezultatus, kur mažesnis stiprumas tempimui yra dėl didelio porėtumo, išskirtinai SnSb intarpuose, dėl kurio sumažėjęs struktūros tankis mažina mechanines savybes. Kietumo vertė galimai taip pat yra mažesnė dėl struktūros pakitusio tankio.

Apibendrinant, tikslūs liepsnos taikymo parametrai, tokie kaip temperatūros kontrolė ir babito medžiagos pernešimo būdas, galimai galėtų sumažinti porų susidarymą ir prisidėti prie homogeniškesnės mikrostruktūros. Naudojant apdorojimo procesus po liejimo, tokius kaip kontroliuojamas terminis apdorojimas, galimai padėtų patobulinti mikrostruktūrą ir pagerinti bendrą dangos veikimą.



71 pav. Babito dangos, liejant elektrolankiniu metodu inertinių dujų aplinkoje („AR“ bandinys), mikrostruktūros tyrimo rezultatai: (a) – didinimas 2,5x, (b) – didinimas 5x, (c) – didinimas 20x, (d) – didinimas 50x

Babito dangos mikrostruktūra, liejama naudojant volframo elektrodą argono dujų aplinkoje, atskleidžia išskirtines savybes, suteikiančias išvalgų apie liejimo proceso sudėtingumą. Daugybę žvaigždės formos struktūrų buvimas rodo Cu_6Sn_5 intarpų dominavimą. Specifinė geometrija gali atsirasti dėl elektrodo medžiagos ir išlydyto babito lydinio sąveikos, dėl kurios susidaro unikalios kristalinės formacijos. Smulki mikrostruktūra atrodo išskirtinai puiki, o tai rodo kontroliuojamas kietėjimo sąlygas. Ši puiki struktūra gali padėti pagerinti mechanines savybes ir atsparumą dilimui, todėl danga tinka naudoti, kai taikomi griežti veikimo reikalavimai. Mikrostruktūroje matomi liejimo proceso pėdsakai, kurie greičiausiai atsiranda dėl elektrolanko. Šie takai pateikia vaizdinį babito medžiagos pernešimo kelio įrašą, parodantį tikslumą ir valdymą, pasiektą liejimo operacijos metu.

Priešingai nei kiti liejimo metodai, mikrostruktūroje yra mažesnis didelių SnSb intarpų kiekis. Ši charakteristika rodo galimą pranašumą mažinant su tokiais tarpais susijusius struktūrinius trūkumus, pvz., lokalizuota streso koncentracija. Šią teoriją taip pat patvirtina atlikti tempimo, kietumo ir cheminės sudėties bandymai kur visų rezultatai pasižymėjo išskirtinai geriau. Vienodai susimaišęs stibis užtikrina aukštesnę kietumo vertę, o smulkūs vario ir alavo junginiai padidino stiprumą, lyginant su kitų dengimo metodų bandymų rezultatais.

Apibendrinant galima pasakyti, kad babito dangos mikrostruktūra, naudojant volframo elektrodą argono dujų aplinkoje, yra unikalus savybių derinys. Žvaigždės formos dariniai, smulki struktūra ir visiškai nebuvimas rodo galimus pranašumus, susijusius su mechaninėmis savybėmis ir kontroliuojamu liejimo procesu.

3.8. Eksperimento rezultatai

Išsamus babito dangų tyrimas, atliktas naudojant tris skirtingus metodus – liejimas iš tiglio, liejimas liepsna ir liejimas volframo elektrodu argono dujų aplinkoje – davė daug duomenų, pateikiančių

įvairius jų struktūrinių, mechaninių ir sudėtinių savybių aspektus. Ši analizė yra visapusiškas dangų tinkamumo pramonėje tyrimas. Atliekant tempimo bandymus, kietumo matavimus, bandymus skverbikliais, radiografinius tyrimus ir mikrostruktūros analizę, buvo siekiama atskleisti kiekvieno dengimo metodo niuansus. Šis eksperimentinis vertinimas ne tik suteikia išsamų supratimą apie dangų savybes, bet ir sudaro sąlygas pagrįstoms rekomendacijoms ir įžvalgoms apie galimus optimizavimo būdus įvairiems pramonės atvejams. Šių rezultatų analizė ir palyginimas yra tinkamas pagrindas rekomendacijoms, pritaikytoms išnaudoti visą babito dangų potencialą pramonėje.

3.8.1. Analizė

Sudėtinga bandymų rezultatų imtis atskleidžia trijų babito dengimo metodų stipriųjų ir silpnųjų pusių savybes. Tempimo bandymas parodo elektrolankinio metodo pranašumą, pasižymintį aukščiausiomis mechaninėmis savybėmis, o liepsnos metodas stovintis per vidurį, neženkliai yra pranašesnis už liejimą iš tiglio, kurio vertės yra žemiausios. Kietumo matavimų skirtumai išlieka panašūs, kai elektrolankinis metodas vėl yra pirmaujantis, o liepsnos metodas neįprastai yra šiek tiek mažesnis, nuo tiesioginio liejimo metodo. Analizuojant cheminę analizę, galima pabrėžti elektrolankinio metodo išskirtinai geresnę cheminę sudėtį, kur stibio ir vario procentas yra didesnis nei kitų metodų bandiniuose. Atliekant bandymą skverbikliais, išryškėja ryškūs skirtumai, o elektrolankiniu metodu dengtas bandinys yra beveik nepriekaištingas, be jokių porų. Priešingai, liepsnos metodas pasižymi dideliu porėtumu, o tiesioginio liejimo danga pasižymi ne tik dideliu porėtumu, bet ir jų susigrupavimu į lokalizuotas sritis. Rentgeno tyrimas patvirtina bandymo skverbikliais rezultatus ir kitų defektų, tokių kaip įtrūkimai ar nevienalytiškumai, neatksleidė.

Mikrostruktūros analizė padėjo tašką analizuojant šių skirtingų metodų rezultatus, atkreipdama dėmesį į išskirtinę smulkią elektrolankiniu metodu lieta babito struktūrą, pasižyminčią žvaigždės formos Cu_6Sn_5 intarpais. Ir atvirkščiai, kiti metodai atskleidžia trūkumus, kur liepsnos metodas pasižymi dideliu SnSb intarpų poringumu, o tiesioginis liejimo metodas – dideliais SnSb intarpais ir jų dominavimu struktūroje. Ši daugialypė analizė ne tik atriboja skirtingus kiekvieno metodo rezultatų profilius, bet ir sudaro sąlygas gan tikslioms rekomendacijoms, kaip panaudoti jų stipriąsias puses ir sumažinti trūkumus norint tinkamai eksploatuoti dangas įvairiuose pramonės sektoriuose.

3.8.2. Palyginimas

Norint palengvinti supratimą, labai svarbu paversti daugybę testo rezultatų į glaustą ir vizualiai prieinamą formatą. Matrica ir grafiko vaizdavimas, yra efektyvi priemonė palyginimui [31]. Šioje matricoje kiekvieno babito dengimo metodo mechaninės savybės, kietumo vertės, cheminės sudėties procentai ir poringumo lygiai yra kruopščiai sutvarkyti ir paversti į indeksuotą vertę. Ši matrica ne tik sutraukia daugybę duomenų, bet ir leidžia greitai atpažinti kitimo tendenciją. Papildydama matricą, diagrama prideda vaizdinį informacijos sluoksnį [31]. Kartu šios vaizdinės priemonės sudėtingus duomenis paverčia prieinamu formatu, skatinant gilesnį supratimą apie babito dengimo metodų veikimo niuansus. Šis metodas užtikrina, kad suinteresuotosios šalys galėtų greitai suvokti kiekvieno metodo stipriąsias ir silpnąsias puses.

Sukūrus vieningą bendros matricos indeksą, reikia normalizuoti įvairius testavimo rezultatus pagal bendrą skalę [31]. Šis procesas užtikrina, kad būtų galima veiksmingai palyginti skirtingus rodiklius, tokius kaip stiprumas megapaskaliais, procentinė sudėtis, kietumas pagal Brinellį, poringumo procentas ir struktūrinės charakteristikos. Normalizavimo procesas gali būti pasiektas taikant standartizacijos metodą, dažnai naudojant z balus, kur kiekviena reikšmė išreiškiama standartiniu

nuokrypiu nuo vidurkio [31]. Z balas, dar žinomas kaip standartinis balas, yra statistinis matas, kiekybiškai įvertinantis, kiek konkretus duomenų taškas yra nutolęs nuo duomenų grupės vidurkio. Jis išreiškiamas standartiniais nuokrypiais. Duomenų taško z balo apskaičiavimo formulė X duomenų rinkinyje su vidurkiu μ ir standartinis nuokrypis σ gaunamas taip:

$$z = \frac{X - \mu}{\sigma}; \quad (8)$$

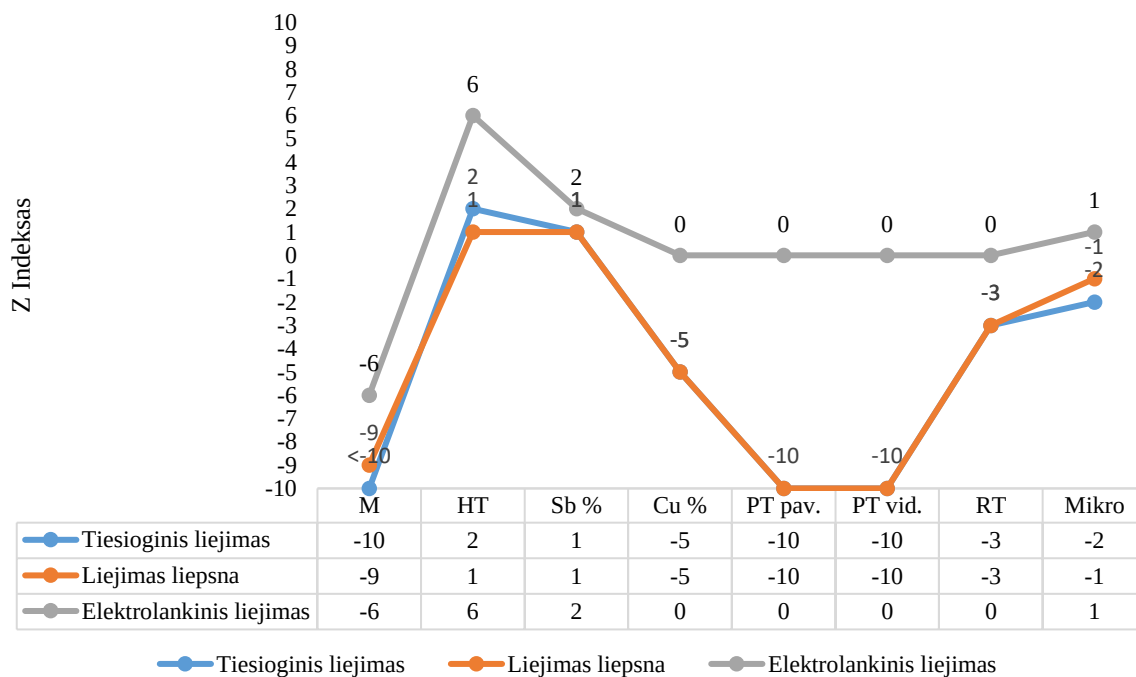
Čia, X – vertinamas individualus duomenų taškas (pvz., konkreti tempimo stiprio vertė, procentinė sudėtis, kietumo matavimas ir kt.), μ – duomenų vidurkis, parodantis vidutinę visos duomenų imties vertę, σ – standartinis nuokrypis, kuris matuoja duomenų imties kitimo arba sklaidos dydį [31]. Gautas z balas parodo, kiek standartinių nuokrypių duomenų taškas yra nuo vidurkio. Teigiamas z balas rodo, kad duomenų taškas yra didesnis už vidurkį, o neigiamas z balas rodo, kad jis yra mažesnis už vidurkį. Konvertuojant visus duomenų taškus į z balus, jie patenka į bendrą skalę. Z balų vidurkis tampa nulių, o kiekvienas duomenų taškas išreiškiamas pagal standartinių nuokrypių skaičių nuo vidurkio [31].

Šis metodas leidžia palyginti skirtingus duomenų tipus su skirtingais vienetais ar skalėmis. Pavyzdžiui, tempiamasis stipris, išmatuotas MPa, gali būti tiesiogiai lyginamas su kietumo matavimais HB, nes jie abu yra standartizuoti pagal bendrą skalę, remiantis jų atitinkamų duomenų rinkinių vidurkiu ir standartiniu nuokrypiu. Tai palengvina teisingą ir prasmingą skirtingų testavimo vienetų palyginimą (16 lentelė).

16 lentelė. Visų bandymų rezultatų palyginimas ir konvertavimas

Nr.	Bandiniai	Tyrimo metodas	Gauta vertė	Nominalus vidurkis	Standartinis nuokrypis	indeksas
1.	K-1 ÷ K-5	Tempimo bandymas	59 MPa	115 Mpa	±5 Mpa	-11
2.	D-1 ÷ D-5	Tempimo bandymas	70 MPa	115 Mpa	±5 Mpa	-9
3.	T-1 ÷ T-5	Tempimo bandymas	83 MPa	115 Mpa	±5 Mpa	-6
4.	TIG	Paviršiaus poringumas	1001,5 mm ²	1,963 mm ²	±1,9 mm ²	-528
5.	GA	Paviršiaus poringumas	640,52 mm ²	1,963 mm ²	±1,9 mm ²	-338
6.	AR	Paviršiaus poringumas	0 mm ²	1,963 mm ²	±1,9 mm ²	0
7.	TIG	Vidinis poringumas	43,61 mm ²	1,963 mm ²	±1,9 mm ²	-24
8.	GA	Vidinis poringumas	164,39 mm ²	1,963 mm ²	±1,9 mm ²	-88
9.	AR	Vidinis poringumas	0 mm ²	1,963 mm ²	±1,9 mm ²	0
10.	TIG	Kietumo nustatymas	31,1 HB	28,5 HB	±1,5 HB	2
11.	GA	Kietumo nustatymas	30,3 HB	28,5 HB	±1,5 HB	1
12.	AR	Kietumo nustatymas	37,0 HB	28,5 HB	±1,5 HB	6
13.	TIG	Stibio procentinė dalis	12,4 %	10 %	±2 %	1
14.	GA	Stibio procentinė dalis	12,7 %	10 %	±2 %	1
15.	AR	Stibio procentinė dalis	13,1%	10 %	±2 %	2
16.	TIG	Vario procentinė dalis	3,73 %	6 %	±0,5 %	-5
17.	GA	Vario procentinė dalis	3,69 %	6 %	±0,5 %	-5
18.	AR	Vario procentinė dalis	5,57 %	6 %	±0,5 %	0
19.	TIG	Radiografinis tyrimas	> 4/16 dm ²	2/16 dm ²	±2/16 dm ²	< -3

Nr.	Bandiniai	Tyrimo metodas	Gauta vertė	Nominalus vidurkis	Standartinis nuokrypis	indeksas
20.	GA	Radiografinis tyrimas	> 4/16 dm ²	2/16 dm ²	±2/16 dm ²	< -3
21.	AR	Radiografinis tyrimas	0/16 dm ²	2/16 dm ²	±2/16 dm ²	0
22.	GA ₂₋₂	Mikrostrukt. tyrimas	0	2	±1	-2
23.	TIG ₄₋₂	Mikrostrukt. tyrimas	1	2	±1	-1
24.	AR ₄₋₂	Mikrostrukt. tyrimas	3	2	±1	1



72 pav. Tyrimų rezultatų indeksuotų verčių diagrama

Apibendrinant galima pasakyti, kad z indekso palyginimas vienareikšmiškai nurodo elektrolankinio dengimo metodą kaip geriausią pasirinkimą, o kiti metodai atsilieka mechaninio atsparumo, porėtumo kontrolės, cheminės sudėties ir mikrostruktūros vientisumo požiūriu. Šis išsamus įvertinimas suteikia vertingų įžvalgų būsimiems svarstymams pasirenkant efektyviausią babito dengimo metodą konkrečioms reikmėms.

3.8.3. Rekomendacijos

Remiantis išsamia bandymų rezultatų analize, galima pasiūlyti keletą rekomendacijų, kurios padėtų ateityje imtis veiksmų naudojant babito dangą. Pirma, atsižvelgiant į puikų elektrolankinio metodo veikimą, jis yra labai rekomenduojamas tais atvejais, kai svarbiausia yra didelis mechaninis stiprumas, minimalus porėtumas ir optimizuota cheminė sudėtis. Pramonės šakoms, siekiančioms didesnio savo mašinų patikimumo ir ilgaamžiškumo, elektrolankinis metodas gali būti ypač naudingas. Tais atvejais, kai elektrolankinis metodas gali būti nepraktiškas arba brangus, liepsnos ir tiesioginio liejimo metodus vis tiek galima apsvarstyti su tam tikromis išlygomis. Tačiau reikia atsižvelgti į galimas problemas, susijusias su porėtumo kontrole ir tinkamos svarbiausių elementų, pvz., stibio ir vario, koncentracijos užtikrinimu. Tai gali apimti liejimo proceso parametų tobulinimą ir papildomų metodų taikymą, siekiant pagerinti bendrą dangos kokybę. Siekiant pagerinti liejimo liepsna ir tiesioginio, liejant iš tiglio, metodų kokybę, galima atlikti kelis tikslinius koregavimus ir atnaujinimus. Visų pirma, būtina kruopšti liejimo parametų kontrolė. Tikslūs kintamieji, tokie kaip

temperatūra, aušinimo greitis ir lydinio sudėtis, gali reikšmingai paveikti galutinę dangos mikrostruktūrą ir mechanines savybes. Pažangių stebėjimo ir valdymo sistemų naudojimas gali padėti pasiekti tikslesnes ir nuoseklesnes liejimo sąlygas. Be to, įdiegus papildomus rafinavimo etapus, tokius kaip apdorojimas po liejimo arba antriniai procesai, gali padėti išspręsti tokias problemas kaip porėtumas. Norint sumažinti nepageidaujamų tuštumų susidarymą dangoje, gali būti ištirtos tokios technologijos kaip vakuuminis degazavimas arba liejimas kontroliuojamoje atmosferoje. Siekiant nustatyti ir ištaisyti visus defektus, kurie gali pakenkti dangos vientisumui, itin svarbu įgyvendinti išsamias kokybės kontrolės priemones liejimo proceso metu ir po jo.

Kalbant apie medžiagų parinkimą, nuolatiniai alternatyvių lydinių ar lydinio modifikacijų tyrimai gali sudaryti kompozicijas, kurios, gal būt, labiau pritaikytos paprastesniems metodams. Tai gali apimti legiravimo elementų pridėjimo tyrimą arba jų santykio koregavimą, siekiant pagerinti bendrą dangos būklę ir patikimumą. Be to, naudojant dengimo metodų technologinį tobulinimą, net ir esant šių procesų apribojimams, galima pasiekti geresnių rezultatų. Pavyzdžiui, tikslesnės įrangos, automatizuotų sistemų ar robotikos pritaikymas liejimo procese gali padėti sušvelninti kai kuriuos iššūkius, susijusius su rankiniu įsikišimu, todėl danga bus nuoseklesnė ir labiau kontroliuojama. Iš esmės, žemesnės pakopos babito dengimo metodų atnaujinimas ir koregavimas apima proceso optimizavimą, kokybės kontrolės patobulinimus ir medžiagų naujoves. Sistemingai šalinant nustatytus apribojimus, šiuos metodus galima atnaujinti, kad būtų sukurtos dangos, pasižyminčios patobulintomis mechaninėmis savybėmis, sumažintu porėtumu ir padidintu bendrą patikimumą įvairiose pramonės srityse.

3.9. Liejimo technologijų tyrimų, analizės, palyginimo ir rekomendacijų apibendrinimas

Apibendrinant analizę apima dangų struktūrinių, mechaninių ir sudėtinių savybių aspektus, suteikdama visapusišką vaizdą apie jų tinkamumą pramonėje. Atlikti bandymai, tokie kaip tempimo bandymai, kietumo matavimai, bandymai skverbikliais, radiografiniai tyrimai ir mikrostruktūros analizė, leido išryškinti kiekvieno dengimo metodo niuansus. Tempimo bandymai parodė, kad elektrolankinis metodas pasižymi aukščiausiomis mechaninėmis savybėmis, o liepsnos metodas yra tarpinis, pranašesnis už liejimą iš tiglio. Kietumo matavimai ir cheminė analizė atskleidė elektrolankinio metodo pranašumus, ypač stebint stibio ir vario procentinę dalį. Bandymai skverbikliais ir radiografiniai tyrimai patvirtino šiuos rezultatus, pabrėždami elektrolankinio metodo mažą poringumą. Mikrostruktūros analizė detalai parodė, kad elektrolankinis metodas sukuria babito struktūrą su žvaigždės formos Cu_6Sn_5 intarpais, o kiti metodai turi trūkumų, tokių kaip didelis poringumas ar didelių intarpų susigrupavimas. Palyginimas, pateiktas lentelėje Nr. 16 ir diagramoje (72 pav.), leidžia lengvai įvertinti kiekvieno metodo stipriąsias ir silpnąsias puses. Indeksavimo procesas leidžia palyginti skirtingus rodiklius pagal bendrą skalę, užtikrinant tikslesnį palyginimą. Gauti rezultatai rodo, kad elektrolankinis metodas išsiskiria kaip geriausias pasirinkimas, o kitų metodų veikimas yra ribotas mechaninio atsparumo, porėtumo kontrolės, cheminės sudėties ir mikrostruktūros vientisumo požiūriu. Ši informacija suteikia vertingų įžvalgų, galinčių būti naudingomis pramonės sprendimams pasirinkti efektyviausią babito dengimo metodą konkrečioms reikmėms. Remiantis gautais rezultatais, siūlomos rekomendacijos ateities veiksams su babito danga. Elektrolankinis metodas yra rekomenduojamas, ypač ten, kur svarbu didelis mechaninis stiprumas. Liepsnos ir tiesioginio liejimo metodai gali būti alternatyva su sąlygomis, tačiau reikalauja kruopštaus proceso valdymo ir medžiagų parinkimo. Toliau siūloma tobulinti procesus, įdiegiant pažangesnes technologijas ir optimizuojant medžiagų sudėtį, siekiant pagerinti dangų kokybę.

4. Liejimo technologijų ekonominis palyginimas

4.1. Ekonominė analizė

Ekonominė analizė yra neatsiejama nuo babito dengimo metodų plėtojimo ir efektyvumo nustatymo, atsižvelgiant į tokius veiksnius kaip sąnaudos, laikas, medžiagos ir bendras išteklių panaudojimas. Kiekvienas metodas – liejimas liepsna, liejimas iš tiglio ir elektrolankinis liejimas – turi savo ekonominių privalumų ir trūkumų.

Kalbant apie kainą, liejimas su liepsna dažnai laikomas ekonomiškesniu dėl jo įrangos paprastumo ir santykinai mažų energijos sąnaudų. Tačiau jo trūkumai yra didesnio medžiagų švaistymo galimybė ir kvalifikuoto rankų darbo poreikis, turintis įtakos darbo sąnaudoms ir kokybei. Liejimas tiesiai iš tiglio, nors ir gana paprastas, gali kainuoti didesnes energijos sąnaudas, palyginti su liejimu liepsna. Naudojant tiesioginį metodą reikalinga kontroliuojama temperatūra, todėl gali padidėti eksploatacinės išlaidos. Medžiagų švaistymas gali būti labiau kontroliuojamas nei liejant liepsna, tačiau vis tiek reikia atidžiai stebėti. Priešingai paplitusiam įsitikinimui, šio projekto eksperimentinis elektrolankinis liejimo metodas nenaudoja automatinio proceso, vietoj to tai rankinis metodas, atliekamas žmogaus rankomis. Nepaisant potencialiai didesnių pradinių investicijų į įrangą, šis metodas gali pasiūlyti pranašumų efektyvumo požiūriu. Naudojamos technologijos pranašumas sumažina priklausomybę nuo rankų darbo ir šalutinių aplinkos poveikių, o tai prisideda prie galimo ilgalaikio išlaidų taupymo. Tačiau reikia atsižvelgti į energijos sąnaudas elektros lanko proceso metu, o bendras ekonomiškumas priklauso nuo gamybos masto.

Laikas yra esminis ekonominės analizės veiksnys. Liejimas liepsna, nes tai yra rankinis procesas, gali būti greitesnis atliekant mažesnio masto operacijas, o elektrolankinio liejimo technologiškumas gali pagreitinti didesnio masto gamybą. Tiesioginis liejimas iš tiglio patenka į paskutinę vietą dėl savo ilgo pasiruošimo liejimo procesui. Medžiagos vaidina svarbų vaidmenį ekonominiams sumetimais. Babito lydinio kaina ir prieinamumas, taip pat bet kokie papildomi rafinavimo reagentai ar dangos paruošimo medžiagos turi įtakos bendram kiekvieno metodo biudžetui. Skaičiuojant kiekvieno metodo investicijų grąžą, reikia atsižvelgti į pradines sąrankos išlaidas, einamąsias veiklos išlaidas, gamybos tempus ir įrangos eksploatavimo laiką [32]. Labai svarbu palyginti šiuos veiksnius su laukiama nauda, pvz., geresne dangos kokybe ir mažesniais priežiūros reikalavimais.

Apibendrinant galima pasakyti, kad kiekvieno babito dengimo metodo ekonominis gyvybingumas yra sudėtinga įvairių veiksnių sąveika. Išsami analizė, įskaitant tiesiogines ir netiesiogines išlaidas, gamybos tempus ir ilgalaikius planus, yra labai svarbi norint priimti pagrįstus sprendimus dėl ekonomiškiausio požiūrio konkrečiai programai ar pramonės sričiai [32].

4.2. Investicijų kaštai

Pradinės įrangos sąnaudos diegiant babito dengimo technologiją yra svarbi ekonominės analizės dalis. Šios išlaidos apima būtinosios įrangos ir infrastruktūros įsigijimą ir įrengimą. Pavyzdžiui, elektrolankinis metodas apima suvirinimo įrangos įsigijimą, įskaitant suvirinimo aparatą, elektrodus, reduktorių ir inertinių dujų balioną. Be to, saugos įranga, vėdinimo sistemos ir visi reikalingi specializuoti įrankiai prisideda prie pradinių išlaidų. Taikant liepsnos metodą, išlaidos apima degiklio, dujų šaltinių ir saugos priemonių įsigijimą. Panašiai, liejant tiesiai iš tiglio, reikia įrengti tinkamą krosnį, tigli ir tvarkymo įrankius. Kiekvienam metodui gali prireikti unikalių elementų, o susijusios išlaidos turi būti kruopščiai dokumentuojamos. Visapusiškai įvertinus šias pradines įrangos

išlaidas, galima susidaryti pagrindinį supratimą apie finansines išlaidas, reikalingas kiekvienam babito dengimo metodui sukurti. Ši informacija yra labai svarbi platesnės ekonominės analizės dalis, padedanti nustatyti kiekvieno metodo bendrą įgyvendinamumą ir investicijų grąžą yra pateikiama 17 lentelėje.

17 lentelė. Įrangos įsigijimo kaštai

Įranga, priemonė, įrankis	Kaštai tiesioginiam liejimui iš tiglio	Kaštai liejimui naudojant liepsną	Kaštai liejimui naudojant elektrolanką
Krosnis „Uterna“, indukcinė, vertikali	15 000,00 €	15 000,00 €	15 000,00 €
Tiglis, ketaus	100,00 €	100,00 €	100,00 €
Rafinavimo sąmtelis, nerūd. pl.	60,00 €	60,00 €	60,00 €
Pylimo kaušelis, nerūd. pl.	15,00 €	15,00 €	15,00 €
Strypelio liejimo forma, Angl. plieno	12,00 €	12,00 €	12,00 €
Tiesioginio liejimo stendas, Angl. plieno	28,00 €	-	-
Liejimo liepsna / elektrolanku stendas, Angl. plieno	-	8,00 €	8,00 €
Darbo įrankiai (šepečiai, laikikliai, indai)	50,00 €	50,00 €	50,00 €
Suvirinimo degiklis „G2“	-	40,00 €	-
Šlanga degikliui, 6mm skersmens	-	20,00 €	-
Propano balionas, 50l	-	30,00 €	-
Degonies balionas, 50l	-	80,00 €	-
Argono balionas, 50l	-	-	80,00 €
Suvirinimo aparatas su priedais „Fronius TransPocket 2500 TIG“	-	-	4780,00 €
Reduktorius, Most, EN ISO 2503	-	-	70,00 €
Šlangos	-	30,00 €	-
Suvirinimo skydelis	-	-	100,00 €
Suvirininimui skirti antgaliai, filtrai	-	-	100,00 €
Darbastalis, kėdė	500,00 €	500,00 €	500,00 €
Vėdinimo sistema	6 000,00 €	6 000,00 €	6 000,00 €
Kiti pagalbiniai įrankiai, priemonės	300,00 €	300,00 €	300,00 €
Montavimo darbai	10 000,00 €	10 000,00 €	10 000,00 €
Viso:	32 065,00 €	32 245,00 €	37 175,00 €

Pradinės investicijos kiekvienam babito liejimo metodui yra svarbios bendrojo ekonominio vertinimo aplinkybėms. Šiame kontekste pradinės investicijos, liejant iš tiglio ir specialiai pritaikytos įrangos liepsnos liejimo procesams, sudaro apytiksliai 32 000 eurų. Kita vertus, liejimo metodas, naudojant 141 suvirinimo metodą, patiria šiek tiek didesnes pradines sąnaudas, iš viso 37 000 eurų.

4.3. Eksploatacinės išlaidos

Eksploatacinės išlaidos vaidina pagrindinį vaidmenį nustatant skirtingų babito liejimo metodų pagrįstumą ir efektyvumą. Todėl atliktas išsamus įvertinimas, kuris apima įvairius vykdomų operacijų aspektus, tokius kaip energijos suvartojimas, priežiūros išlaidos, darbo sąnaudos, žaliavų ir medžiagų sąnaudos [32]. Eksploatacinių išlaidų duomenys pateikti 18 lentelėje.

18 lentelė. Eksploatacinių ir gamybinių išlaidų suvestinė

Eksploatacinės ir gamybinės medžiagos	Kaštai tiesioginiam liejimui iš tiglio	Kaštai liejimui naudojant liepsną	Kaštai liejimui naudojant elektrolanką
Dangos masė	10 g	10 g	10 g
Proceso laikas	28,07 min	10,24 min	11,25 min
Elektros energijos sunaudojimas (0,22 €/kWh)	$15 \cdot 0,28 \cdot 0,22 = 0,92 \text{ €}$	$7 \cdot 0,10 \cdot 0,22 = 0,15 \text{ €}$	$8 \cdot 0,11 \cdot 0,22 = 0,19 \text{ €}$
Babito B-83 medžiagos sunaudojimas (12,06 €/kg)	$0,74\text{kg} \cdot 12,06 = 8,92 \text{ €}$	$0,55\text{kg} \cdot 12,06 = 6,63 \text{ €}$	$0,64\text{kg} \cdot 12,06 = 7,71 \text{ €}$
Alavo 02/03 (Gost 860/75x) medžiagos sunaudojimas (22,80 €/380g)	$\frac{22,80\text{€}}{380\text{g}} \cdot 3\text{g} = 0,18 \text{ €}$	$\frac{22,80\text{€}}{380\text{g}} \cdot 3\text{g} = 0,18 \text{ €}$	$\frac{22,80\text{€}}{380\text{g}} \cdot 3\text{g} = 0,18 \text{ €}$
Amonio chlorido NH ₄ Cl miltelių sunaudojimas (6,45 €/kg)	$\frac{6,45\text{€}}{1000\text{g}} \cdot 12\text{g} = 0,07 \text{ €}$	$\frac{6,45\text{€}}{1000\text{g}} \cdot 12\text{g} = 0,72 \text{ €}$	$\frac{6,45\text{€}}{1000\text{g}} \cdot 12\text{g} = 0,72 \text{ €}$
Amonio fluorida NH ₄ F miltelių sunaudojimas (39,58 €/kg)	$\frac{39,58\text{€}}{1000\text{g}} \cdot 10\text{g} = 0,39 \text{ €}$	$\frac{39,58\text{€}}{1000\text{g}} \cdot 10\text{g} = 0,39 \text{ €}$	$\frac{39,58\text{€}}{1000\text{g}} \cdot 10\text{g} = 0,39 \text{ €}$
Sočiojo cinko chlorido ZnCl ₂ tirpalo sunaudojimas (5,00 €/kg)	$\frac{5,00\text{€}}{1000\text{g}} \cdot 50\text{g} = 0,25 \text{ €}$	$\frac{5,00\text{€}}{1000\text{g}} \cdot 50\text{g} = 0,25 \text{ €}$	$\frac{5,00\text{€}}{1000\text{g}} \cdot 50\text{g} = 0,25 \text{ €}$
Dehidratuoto amonio chlorido tabletės (5,02€/7g)	$\frac{5,02 \text{ €}}{7 \text{ g}} \cdot 8 \text{ g} = 5,73 \text{ €}$	$\frac{5,02 \text{ €}}{7 \text{ g}} \cdot 8 \text{ g} = 5,73 \text{ €}$	$\frac{5,02 \text{ €}}{7 \text{ g}} \cdot 8 \text{ g} = 5,73 \text{ €}$
Propano dujų sunaudojimas (30,00€/50l)	-	$5,75 \frac{\text{l}}{\text{min}} \cdot \frac{30,00 \text{ €}}{50 \text{ l}} \cdot \frac{0,59\text{min}}{60} = 0,03 \text{ €}$	-
Degunies dujų sunaudojimas (80,00€/50l)	-	$20 \frac{\text{l}}{\text{min}} \cdot \frac{80,00 \text{ €}}{50 \text{ l}} \cdot \frac{0,59\text{min}}{60} = 0,29 \text{ €}$	-
Argono dujų sunaudojimas (80,00€/50l)	-	-	$20 \frac{\text{l}}{\text{min}} \cdot \frac{80,00 \text{ €}}{50 \text{ l}} \cdot \frac{1,60 \text{ min}}{60} = 0,80 \text{ €}$
Suvirinimo elektrodas volframinis WR Ø1,6 mm (1,50 €/vnt.)	-	-	1,50 €

Ekspluatacinės ir gamybinės medžiagos	Kaštai tiesioginiam liejimui iš tiglio	Kaštai liejimui naudojant liepsną	Kaštai liejimui naudojant elektrolanką
Darbuotojo darbo valandos (15,00 €/val.)	$15,00\text{€} \cdot 0,28$ = 4,20 €	$15,00\text{€} \cdot 0,1$ = 1,50 €	$15,00\text{€} \cdot 0,11$ = 1,65 €
Viso:	20,66 €	14,08 €	15,97 €

Apibendrinant galima pasakyti, kad gamybos normų analizė atskleidžia didelius gamybos sąnaudų skirtumus ir panašumus naudojant tris metodus. Tiesioginio liejimo kaina yra didžiausia – 20,66 euro, o liepsnos metodas yra pats ekonomiškiausias, jo gamybos kaina yra 14,08 euro. Elektrolankinis metodas yra ties viduriu – 15,97 euro. Nors tiesioginio liejimo proceso laikas yra daug ilgesnis, beveik tris kartus didesnis nei kitų metodų, atmetus šį veiksnį, bendros gamybos sąnaudos yra palyginamos. Todėl renkant šiuos metodus reikėtų atsižvelgti ne tik į gamybos greitį, bet ir į kitus veiksnius, tokius kaip proceso efektyvumas ir laiko apribojimai.

Galima teigti, kad visapusiška eksploatacinių išlaidų analizė apima detalų energijos vartojimo efektyvumo, priežiūros poreikių, darbo poreikių ir su žaliavomis susijusių sąnaudų išnagrinėjimą [32]. Ši daugialypė perspektyva leidžia gerai suprasti finansines pasekmes, susijusias su nuolatiniu kiekvieno babito liejimo metodo veikimu.

4.4. Įrangos ilgaamžiškumas

Vertinant skirtingus babito dengimo būdus, labai svarbu atsižvelgti į įrangos eksploatavimo trukmę. Šiuose procesuose naudojama įranga, įskaitant krosnis, tiglius ir dujų įrangą, laikui bėgant susidėvi. Paprastai indukcinės krosnys, jei jos tinkamai prižiūrimos, gali tarnauti gana ilgai. Tačiau tiglius, ypač tuos, kurie yra veikiami aukštos temperatūros ir išlydyto babito, dėl gedimo gali tekti dažnai keisti. Dujų įrangą ir susijusią liejimo ir ar suvirinimo įrangą taip pat turi ribotą eksploatavimo laiką, kurį įtakoja tokie veiksniai kaip naudojimo dažnumas ir tinkama priežiūra.

Taikant rankinius metodus, kai naudojama žmogaus valdoma įranga, eksploatavimo trukmė gali priklausyti nuo operatoriaus patirties ir kruopštumo prižiūrint įrangą. Automatizuotos ar dalinai automatizuotos įrangos eksploatavimo trukmė gali būti nuspėjama, tačiau reguliarios patikros ir prevencinė priežiūra išlieka būtini. Bendra eksploatavimo trukmė turėtų apimti visus komponentus, susijusius su babito dengimo procesu, o nuodugni kaštų ir naudos analizė turėtų palyginti pradines investicijas ir numatomą įrangos ilgaamžiškumą. Hipotetiškai tiesioginio liejimo metodas gali turėti ilgesnį tarnavimo laiką, palyginti su kitais metodais dėl supaprastintos įrangos sąrankos. Šis metodas apima mažiau komponentų todėl laikui bėgant mažiau nusidėvi. Sumažėjus tiesioginio liejimo procese naudojamos įrangos sudėtingumui, gali būti mažiau gedimo vietų ir mažesnė komponentų gedimo tikimybė. Tačiau svarbu pažymėti, kad bet kurio metodo naudojimo trukmė priklauso nuo įvairių veiksnių, įskaitant naudojimo dažnumą, techninės priežiūros praktiką ir operatoriaus įgūdžius. Nors tiesioginio liejimo metodas gali turėti pranašumą dėl paprastumo ir potencialiai ilgesnės įrangos naudojimo trukmės, vertinant skirtingus metodus taip pat reikėtų atsižvelgti į bendrą babito dangos efektyvumą ir kokybę.

4.5. Metodų investicijų grąža

Apskaičiuojant babito dengimo metodų investicijų grąžą reikia įvertinti finansinę naudą, palyginti su patirtomis pradinėmis ir veiklos išlaidomis. Taikant tris mūsų metodus – tiesioginį liejimą, liejimą liepsna ir liejimą elektrolanku – grąžą galima nustatyti lyginant kiekvieno metodo naudą su susijusiomis išlaidomis. Tai apima investicines išlaidas, eksploatavimo išlaidas ir gamybos išlaidas vienam dangos vienetui. Investicijų grąžos formulė išreiškiama kaip grynasis pelnas padalintas iš investicijų kainos ir padauginta iš 100 (9 formulė). Grynasis pelnas apskaičiuojamas iš pajamų, gautų naudojant babito dangą, atėmus visas išlaidas (įskaitant veiklos ir gamybos išlaidas). Investicijų sąnaudos apima pradines sąrankos išlaidas ir einamąsias veiklos išlaidas [32].

$$\text{Investicijų grąža} = \frac{\text{Grynasis pelnas}}{\text{Investicijos}} \cdot 100; \quad (9)$$

Iš esmės investicijų grąžos skaičiavimas suteikia kiekybinį kiekvieno babito dengimo metodo efektyvumo ir pelningumo matą. Tai leidžia įvertinti investicijų finansinį pagrįstumą ir pasirinkti, kuris metodas laikui bėgant duoda didžiausią grąžą. Tokie veiksniai, kaip gamybos tempai, medžiagų sąnaudos ir įrangos eksploatavimo trukmė, vaidina lemiamą vaidmenį nustatant bendrą kiekvieno metodo investicijų grąžą [32]. Šiame projekte investicijų grąžos vertinimui pasirinktas 10% pelningumas, o produkcijos mastui per metus pasirinkta 100 kilogramų išlietos dangos (19 lentelė).

19 lentelė. Investicinės grąžos skaičiavimas

	Tiesioginiam liejimui iš tiglo, €	Liejimui naudojant liepsną, €	Liejimui naudojant elektrolanką, €
Vertinimo laikotarpis	12 mėn.	12 mėn.	12 mėn.
Gamybos mastas (poreikis)	100 kg	100 kg	100 kg
Gamybos trukmė produkcijai pagal poreikį	6,4 mėn.	2,3 mėn.	2,5 mėn.
Savikaina pagal gamybos poreikį	$\frac{20,66\text{€}}{0,01} \cdot 100$ = 206 600,00	$\frac{14,08\text{€}}{0,01} \cdot 100$ = 140 800,00	$\frac{15,97\text{€}}{0,01} \cdot 100$ = 159 700,00
Grynasis pelnas nuo gamybos poreikio, 10% pelningumas	$206600 \cdot 0,1$ = 20 660,00	$140800 \cdot 0,1$ = 14 800,00	$159700 \cdot 0,1$ = 15 970,00
Investicijų grąža nuo gamybos poreikio	$\frac{20660}{32065} \cdot 100 = 64\%$	$\frac{14800}{32245} \cdot 100 = 45\%$	$\frac{15970}{37175} \cdot 100 = 42\%$
Gamybos pajėgumas per metus, 1440 val.	187,50 kg	521,73 kg	480,00 kg
Savikaina pagal pajėgumą	$\frac{20,66\text{€}}{0,01} \cdot 187,5$ = 387 375,00	$\frac{14,08\text{€}}{0,01} \cdot 521,73$ = 734 595,84	$\frac{15,97\text{€}}{0,01} \cdot 480,00$ = 766 560,00
Pajamos per mėnesį nuo gamybos poreikio	$\frac{206600\text{€}}{6,4} = 3228$	$\frac{140800\text{€}}{2,3} = 61217$	$\frac{159700\text{€}}{2,5} = 63880$

	Tiesioginiam liejimui iš tiglio, €	Liejimui naudojant liepsną, €	Liejimui naudojant elektrolanką, €
Grynasis pelnas per einamuosius metus, 10% pelningumas	$387375 \cdot 0,1$ $= 38\,737,50$	$734595,84 \cdot 0,1$ $= 73\,459,58$	$766560 \cdot 0,1$ $= 76\,656,00$
Investicijų grąža nuo bendro pajėgumo	$\frac{38737}{32065} \cdot 100 = 120\%$	$\frac{73459}{32245} \cdot 100 = 227\%$	$\frac{76656}{37175} \cdot 100 = 206\%$

Nors tiesioginio liejimo metodas pasižymi didžiausia investicijų grąža nuo gamybos masto, svarbu atsižvelgti į kompromisus, susijusius su ilgesniu proceso laiku ir didesnėmis veiklos išlaidomis. Pailgėjęs gamybos laikas turi įtakos ne tik bendroms sąnaudoms, bet ir rinkos konkurencingumui. Pirkėjai ir gamintojai, dažnai linkę į ekonomiškumą, gali pasirinkti greitesnius ir pigesnius liepsnos ir elektrolankinį metodus, ypač kai šie metodai siūlo panašias investicines grąžas ir veiklos išlaidas. Be to, elektrolankinis metodas, pasižymėjęs savo puikia kokybe, tampa patraukliu pasirinkimu, leidžiančiu išlaikyti pusiausvyrą tarp ekonomiškumo ir gaminio tobulumo.

4.6. Babito liejimo technologijų ekonominio palyginimo apibendrinimas

Apibendrinant, investicinės grąžos analizė suteikia vertingų įžvalgų apie babito dangos gamybos metodų pelningumą ir efektyvumą per 12 mėnesių laikotarpį. Gamybos užsakymas buvo nustatytas 100 kg dangos, o rezultatai rodo, kad tiesioginio liejimo metodui atlikti reikia maždaug 6,4 mėnesio, o liepsnos metodui ir lankiniam liejimui užtrunka atitinkamai maždaug 2,3 ir 2,5 mėnesio. Pagaminto užsakymo investicinė grąža sudaro 64 % tiesioginio liejimo, 45 % liepsnos ir 42 % lanko. Tačiau įvertinus gamybos pajėgumus per metus, tiesioginio liejimo būdu galima pagaminti 187,0 kg dangos, liepsnos metodu – 521,73 kg, o lankiniu būdu – 480 kg. Įvertinus šią grąžą pagal gamybos pajėgumus paaiškėjo, kad naudojant tiesioginį liejimą pasiekama 120 %, liepsnos metodu – 227 %, o lanko metodu – 206 %. Šios išvados pabrėžia skirtingus kompromisus tarp gamybos laiko, gamybos pajėgumų ir investicijų grąžos kiekvienam babito dengimo metodui.

Šių babito dengimo metodų analizė atskleidžia, kad pradinės investicijos, nors ir palyginti nedidelės, palyginti su galimu pelnu, vaidina lemiamą vaidmenį nustatant investicijų grąžą. Net ir atliekant ilgesnį procesą, pvz., tiesioginį liejimą, didelė investicijų grąža rodo, kad investicijos gali būti susigrąžintos ir pelnas garantuotas po pirmųjų nepertraukiamo liejimo metų. Kiekvieno metodo gamybos galimybės dar labiau rodo, kad priklausant užsakymo dydžio (pvz., 100 kg), vis tiek galima pasiekti didelę investicijų grąžą. Tai reiškia, kad laikui bėgant pradinės investicinės išlaidos bus susigrąžintos, o vėlesni metai duos pastovų ir didėjančią pelną. Rezultatai pabrėžia, kad svarbu priimti pagrįstus sprendimus, pagrįstus visapusišku gamybos procesų supratimu, jų efektyvumu ir finansine grąža, kurią jie gali pasiūlyti. Po ekonominės analizės akivaizdu, kad iš trijų eksperimentinių metodų ekonomiškiausias liejimo metodas yra elektrolankinis metodas. Šis metodas ne tik išsiskiria kaip vienas greičiausių procesų, bet ir užtikrina aukščiausios kokybės dangas, o tai sumažina potencialių pretenzijų, dėl ne kokybiško gaminio, kiekį ir užtikrina gerą įvaizdį rinkoje.

Išvados

1. Atlikus literatūros analizę, galima teigti, kad babito dangos, atlaikančios iki 1000 kgf/cm²s dinamines apkrovas bei pasižyminčios 60 m/s trinties atsparumu, tampa ne tik techniškai patikimu, bet ir strategiškai svarbiu sprendimu, prisidedančiu prie ilgalaikio ir efektyvaus įrangos naudojimo, ypač ten, kur itin svarbu išlaikyti nepertraukiamą mašinų veiklą.
2. Išanalizavus babito liejimo technologijas, galima konstatuoti, kad tradiciniai liejimo metodai, tokie kaip tiesioginis dangos liejimas ar išcentrinis liejimas, išlieka ekonomiškai perspektyvūs sprendimai daugeliui pramonės sektorių, o eksperimente pasirinkti trys metodai atskleidė, kad galima naudoti ir mažiau žinomus kitai paskirčiai pritaikytus liejimo metodus. Metodų stebėjimas ir analizė atskleidė pranašumus ir trūkumus per gamybos efektyvumo prizmę, kur vienu iš svarbiausių kriterijų įvardijamas dangų kūrimo greitis. Tyrimai parodė, kad liejimas atvira liepsna trunka 10,24 min., elektrolankinis metodas – 11,25 min., o tiesioginio dangos liejimo trukmė lygi 28,07 min.
3. Analizuojant cheminę sudėtį buvo nustatyta, kad geriausiu laikomo elektrolankinio metodo suformuotoje dangoje cheminiai elementai beveik nepakitę nuo pradinės žaliavos nominalaus kiekio, o kitų metodų dangose aiškiai atsispindėjo jų sumažėjimas. Dangos stiprumo skirtumai galimai atsirado dėl sumažėjusio vario, kurio elektrolankinio metodo danga turėjo 5,57 %, atviros liepsnos metodo – 3,69 %, o tiesioginio liejimo – 3,73 % Cu. Be to, elektrolankinio metodo struktūra pasižymėjo smulkiagrūde struktūra su Cu₆Sn₅ (vario ir alavo) intermetaliniais žvaigždės formos junginiais, kurie pagerino dangos mechanines savybes. Analizuojant kitus du metodus, buvo nustatyta, kad tiesioginio liejimo metu atsiranda dideli SnSb (alavo ir stibio) plokšteliniai intermetaliniai junginiai, kurie suformuoja stambiagrūdę struktūrą, sąlygojančią prastesnes dangos mechanines savybes, o dangos, gautos liejant atvira liepsna pasižymėjo sąlyginai dideliu porėtumu ir daugybinėmis tuštumomis.
4. Atlikti stipruminiai eksperimentiniai bandymai atskleidė elektrolankinio padengimo metodo aiškius pranašumus tempimo bandymų metu, nes danga pasižymėjo vidutine 83 MPa stiprumo riba, tuo tarpu liejimo metodu atvira liepsna gauta 70 MPa, o tiesioginio liejimo – 59 MPa stiprumo riba. Dangų kietumo matavimų vidurkliai atitinkamai buvo gauti 37 HB, 30,3 HB ir 31,1 HB. Atlikti eksperimentiniai bandymai su skverbikliais bei radiografinis tyrimas parodė, kad dangos, gautos liejant atvira liepsna porėtumas sudarė 8,15%, naudojant tiesioginį liejimą 12,75%, tuo tarpu elektrolankinio padengimo metu poros ir tuštos dangoje nesusiformavo.
5. Atlikti ekonominiai skaičiavimai parodė, ryškius trijų metodų skirtumus, nors pradinės investicijos yra labai panašios ir sudaro vidutiniškai 33 tūkstančius eurų. Skirtumai išryškėjo analizuojant technologijų našumą. Metodai, naudojantys atvirą liepsną ir elektrolanką, yra 2 ir daugiau kartų efektyvesni už tiesioginį dangos liejimo metodą. Skaičiavimai parodė, kad naudojant atviros liepsnos metodą, liejimo pajėgumai yra 521,7 kg dangos per metus, elektrolankinį metodą – 480 kg dangos per metus, o tiesioginį metodą – tik 187,5 kg dangos per metus. Investicinė grąža 100 kg dangos naudojant tiesioginio liejimo metodą siekia 64%, atsipirkimo laikas 6,4 mėn., atviros liepsnos liejimo metodą atitinkamai 45% ir 2,3 mėn. o elektrolankinį metodą – 42% ir 2,5 mėn.

Literatūros sąrašas

1. RAMADAN, Mohamed and HAFEZ, K.M. Interfacial microstructure and hardness of sn-based Babbitt/c93700 Cu-Pb-Sn bimetallic materials. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 45, p. 5074–5080. DOI 10.1016/j.matpr.2021.01.581.
2. ALCOVER JUNIOR, Paulo Roberto and PUKASIEWICZ, Anderson Geraldo. Evaluation of microstructure, mechanical and tribological properties of a Babbitt alloy deposited by arc and Flame Spray Processes. *Tribology International*. 2019. Vol. 131, p. 148–157. DOI 10.1016/j.triboint.2018.10.027.
3. ZHAO, Jingyu, SUN, Kai, LIANG, Gang, XU, Congcong, ZHAO, Jiahui, XUE, Feng and ZHOU, Jian. Effect of zn additions on the microstructure and mechanical properties of sn-Babbitt alloys fabricated by ARC deposition. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. Vol. 15, p. 6726–6735. DOI 10.1016/j.jmrt.2021.11.097.
4. VELENTURF, Anne P.M., PURNELL, Phil and JENSEN, Paul D. Reducing material criticality through circular business models: Challenges in renewable energy. *One Earth*. 2021. Vol. 4, no. 3, p. 350–352. DOI 10.1016/j.oneear.2021.02.016.
5. SHI, Guangqiang, YU, Xiaodong, MENG, Hui, ZHAO, Feihu, WANG, Junfeng, JIAO, Jianhua and JIANG, Hui. Effect of surface modification on friction characteristics of sliding bearings: A Review. *Tribology International*. 2023. Vol. 177, p. 107937. DOI 10.1016/j.triboint.2022.107937.
6. KOUTSKÝ, J. and VESELÁ, J. Evaluation of white metal adhesion (conventional casting and thermal wire arc spraying) by ultrasonic non-destructive method. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. Vol. 157–158, p. 724–728. DOI 10.1016/j.jmatprotec.2004.07.131.
7. NAEIMIAN, H. and MOFID, M.A. TLP bonding of Ti–6al–4V to al 2024 using thermal spray Babbitt alloy interlayer. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2020. Vol. 30, no. 5, p. 1267–1276. DOI 10.1016/s1003-6326(20)65294-3.
8. GONZÁLEZ-GUTIÉRREZ, A.G., CEDANO VILLAVICENCIO, Karla G. and SEBASTIAN, P.J. An innovative process to improve the end-contacts of metallic polypropylene capacitors by arc spray and PVD. *Surfaces and Interfaces*. 2023. Vol. 38, p. 102766. DOI 10.1016/j.surf.2023.102766.
9. CHEN, Jianmin, YANG, Jie, ZHAO, Xiaoqin, AN, Yulong, HOU, Guoliang, CHEN, Jie and ZHOU, Huidi. Preparation and properties of poly-(p)-oxybenzoyl/aluminum bronze composite coating by atmosphere plasma spraying. *Surface and Coatings Technology*. 2014. Vol. 253, p. 261–267. DOI 10.1016/j.surfcoat.2014.05.052.
10. ZHANG, B., YANG, Z.Y., FU, D.X., LI, X.F. and CHEN, W. Preparation of the wire of ZCHSNSB11-6 used for remanufacturing thermal spraying. *Physics Procedia*. 2013. Vol. 50, p. 231–237. DOI 10.1016/j.phpro.2013.11.037.
11. DORFMAN, Mitchell R. Thermal spray coatings. *Handbook of Environmental Degradation of Materials*. 2018. P. 469–488. DOI 10.1016/b978-0-323-52472-8.00023-x.
12. ZHANG, Xiaoqiang, WU, Sanshuan, LIU, Weijie, CHU, Xin, XIE, Yingchun and ZHANG, Fan. High performance tin-based Babbitt coatings deposited by high-pressure cold spraying. *Surface and Coatings Technology*. 2023. Vol. 473, p. 130048. DOI 10.1016/j.surfcoat.2023.130048.
13. LI, Shichun, OU, Min, ZHU, Caizhang, LIAO, Junhui, LI, Junzhe, XIAO, Quanhai, PENG, Haiyang, ZHOU, Lei and XIAO, Gang. Feasibility of induction heating fused wire continuous deposition forming. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. Vol. 26, p. 7137–7152. DOI 10.1016/j.jmrt.2023.09.019.
14. MOHAN, Sunil and MOHAN, Anita. Wear, friction and prevention of tribo-surfaces by coatings/nanocoatings. *Anti-Abrasive Nanocoatings*. 2015. P. 3–22. DOI 10.1016/b978-0-85709-211-3.00001-7.

15. DONG, Qin, YIN, Zhongwei, LI, Hulin, GAO, Gengyuan, ZHONG, Ning and CHEN, Yonghong. Simulation and experimental verification of fatigue strength evaluation of journal Bearing Bush. *Engineering Failure Analysis*. 2020. Vol. 109, p. 104275. DOI 10.1016/j.engfailanal.2019.104275.
16. HE, Yongyong, ZHAO, Zhongkai, LUO, Tianyu, LU, Xinchun and LUO, Jianbin. Failure analysis of journal bearing used in turboset of a power plant. *Materials & Design (1980-2015)*. 2013. Vol. 52, p. 923–931. DOI 10.1016/j.matdes.2013.06.027.
17. XU, T.Z., ZHANG, S., WANG, Z.Y., ZHANG, C.H., ZHANG, D.X., WANG, M. and WU, C.L. Wear behavior of graphite self-lubricating babbitt alloy composite coating on 20 steel prepared by laser cladding. *Engineering Failure Analysis*. 2022. Vol. 141, p. 106698. DOI 10.1016/j.engfailanal.2022.106698.
18. DONG, Qin, YIN, Zhongwei, LI, Hulin, GAO, Gengyuan and MAO, Yang. Simulation study on filling and solidification of horizontal centrifugal casting babbitt lining of bimetallic bearing. *International Journal of Metalcasting*. 2020. Vol. 15, no. 1, p. 119–129. DOI 10.1007/s40962-020-00429-y.
19. FITRIYANA, D. F., CAESARENDRA, Wahyu, NUGROHO, S., HARYADI, G. D., HERAWAN, M. A., RIZAL, M. and ISMAIL, R. The effect of compressed air pressure and stand-off distance on the Twin Wire Arc Spray (TWAS) coating for pump impeller from Aisi 304 stainless steel. *Springer Proceedings in Physics*. 2020. P. 119–130. DOI 10.1007/978-981-15-2294-9_11.
20. Vapour deposited coatings and thermal spraying. *Smithells Metals Reference Book*. 2004. DOI 10.1016/b978-075067509-3/50038-5.
21. LAN, Pixiang, NUNEZ, Emerson E. and POLYCARPOU, Andreas A. Advanced polymeric coatings and their applications: Green Tribology. *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*. 2020. P. 345–358. DOI 10.1016/b978-0-12-803581-8.11466-3.
22. ZHANG, Dongya, LI, Zhongwei, GAO, Feng, WEI, Xian and NI, Yuquan. Tribological performance of polymer composite coatings modified with La₂O₃ and mos₂ nanoparticles. *Journal of Tribology*. 2019. Vol. 141, no. 11. DOI 10.1115/1.4044465.
23. ZHUANG, Jiayu and ZHENG, Jiayi. Directional droplet transport behavior on gradient wettability wedge track with extreme wettability contrast. *Chemical Engineering Science*. 2024. Vol. 283, p. 119382. DOI 10.1016/j.ces.2023.119382.
24. DONG, Qin, YIN, Zhongwei, LI, Hulin, ZHANG, Xiaoyun, JIANG, Dan and ZHONG, Ning. Effects of AG micro-addition on structure and mechanical properties of sn-11sb-6cu Babbitt. *Materials Science and Engineering: A*. 2018. Vol. 722, p. 225–230. DOI 10.1016/j.msea.2018.03.034.
25. MAO, Yuqing, YANG, Ping, ZHANG, Wenyan, LI, Ning, NIE, Hao, LIN, Danyang and KE, Liming. Improving tensile-shear properties of friction stir lap welded dissimilar Al/mg joints by eliminating hook defect and controlling interfacial reaction. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2023. Vol. 36, no. 7, p. 257–267. DOI 10.1016/j.cja.2022.11.026.
26. BARAJAS, C., DE VICENTE, J., CAJA, J., MARESCA, P. and GÓMEZ, E. Considerations to the hardness Brinell measurement using optical equipment. *Procedia Manufacturing*. 2017. Vol. 13, p. 550–557. DOI 10.1016/j.promfg.2017.09.089.
27. SINGH, Ramesh. Penetrant testing. *Applied Welding Engineering*. 2020. P. 339–345. DOI 10.1016/b978-0-12-821348-3.00026-4.
28. SAHOO, S.K., NARASIMHA RAO, R., SRINIVAS, Kuchipudi, BURAGOHAIN, M.K. and SRI CHAITANYA, Ch. A novel NDE approach towards evaluating adhesive bonded interfaces. *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 26, p. 1191–1197. DOI 10.1016/j.matpr.2020.02.240.
29. KIM, K.S., KANG, S.Y., KIM, W.S., CHO, H.S., PARK, C.K., LEE, D.Y., KIM, G.A., PARK, S.Y., LIM, H.W., LEE, H.W., PARK, J.E., JEON, D.H., LIM, Y.H., JE, U.K. and WOO, T.H. Improvement of radiographic visibility using an image restoration method based on a simple

- radiographic scattering model for X-ray nondestructive testing. *NDT & E International*. 2018. Vol. 98, p. 117–122. DOI 10.1016/j.ndteint.2018.05.008.
30. ZHANG, Dongya, ZHAO, Feifei, LI, Yan, LI, Pengyang, ZENG, Qunfeng and DONG, Guangneng. Study on tribological properties of multi-layer surface texture on Babbitt alloys surface. *Applied Surface Science*. 2016. Vol. 390, p. 540–549. DOI 10.1016/j.apsusc.2016.08.141.
 31. WITTE, Robert S. and WITTE, John S. *Statistics*. Hoboken, NJ : Wiley, 2019.
 32. BRUNDAGE, Michael P., CHANG, Qing, ZOU, Jing, LI, Yang, ARINEZ, Jorge and XIAO, Guoxian. Energy Economics in the manufacturing industry: A Return on Investment Strategy. *Energy*. 2015. Vol. 93, p. 1426–1435. DOI 10.1016/j.energy.2015.10.038.

Informacijos šaltinių sąrašas

1. LEWIS, SINCLAIR. Babbitt. LEBOOKS EDITORA, 2020.
2. HEINE, Richard W., LOPER, Carl R. and ROSENTHAL, Philip C. *Principles of Metal casting*. New Delhi : McGraw-Hill Education, 2017.
3. F., Vander Voort George. *Metallography: Principles and practice*. Materials Park, OH : ASM International, 2021.
4. CALLISTER, William D. and RETHWISCH, David G. *Materials science and engineering: An introduction*. Milton, QLD : John Wiley and Sons Australia, Ltd, 2021.
5. ADVNER, Sidney H. *Introduction to physical metallurgy*. New Delhi : Tata Mcgraw -Hill, 2008.
6. BEELEY, Peter. *Foundry Technology*. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2001.
7. HURST, Steve. *Metal casting: Appropriate technology in the small foundry*. London : Intermediate Technology Publications, 2000.
8. *Casting design and performance*. Materials Park, OH : ASM International, 2009.

Priedai

1 priedas. Dalyvavimo jaunųjų mokslininkų konferencijoje sertifikatas

