

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Valentinas VARNAUSKAS

**ATSPARIŲ DILIMUI
APVIRINTŲ PAVIRŠIŲ
FORMAVIMAS IR TYRIMAS**

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai, mechanikos inžinerija (09T)

Vilnius, 2008

Disertacija rengta 2004–2008 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Darbo mokslinis vadovas

prof. habil. dr. Algirdas Vaclovas Valiulis (Vilniaus Gedimino technikos universitetas,
technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T).

<http://leidykla.vgtu.lt>

VG TU leidyklos TECHNIKA 1568-M mokslo literatūros knyga

ISBN 978-9955-28-380-5

© Varnauskas, V. 2008

© VG TU leidykla TECHNIKA, 2008

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Valentinas VARNAUSKAS

**CREATION OF HARDFACED
SURFACES AND INVESTIGATION
OF ITS WEAR RESISTANCE**

Doctoral Dissertation

Technological Sciences, Mechanical Engineering (09T)

Vilnius, 2008

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjamas glaistytųjų elektrodų rankiniam elektrolankiniam apvirinimui kūrimas ir taikymas. Pagrindinis tyrimo objektas yra glaistytieji elektrodai ir šiais elektrodais prilydytas metalas. Pagrindinis disertacijos tikslas yra sukurti naujus elektrodų glaistus, gauti gerų mechaninių savybių metalą, kuriuo apvirinti sluoksniai būtų atsparūs abrazyviniam dilimui. Sukurtų apvirinimo elektrodų taikymo sritis yra žemės dirbimo, kalnakasybos mašinų, rūdų smulkinimo įrenginių darbinės dalys. Disertacijoje siekiama optimizuoti legiruojančiųjų elementų koncentraciją lydinyje, ir taip gauti ekonomiškai legiruotą prilydytą metalą.

Lietuvoje gaminami suvirinimo elektrodai. Viena iš gaminamos produkcijos rūšių yra įvairios paskirties apvirinimo elektrodai. Pasaulyje yra daug suvirinimo medžiagų gamintojų, kurie gamina analogišką produkciją, tačiau šie elektrodai brangūs. Siekiant konkuruoti elektrodų rinkoje, būtina plėsti gaminamos produkcijos asortimentą, pateikti naujus gaminius, kurie savo kokybe ir kaina galėtų patenkinti įvairiausių vartotojų poreikius.

Darbe sprendžiami du pagrindiniai uždaviniai: glaistytųjų elektrodų glaistų kūrimas ir šiais elektrodais apvirintų sluoksnių savybių tyrimas. Pirmasis uždavinys suformuluotas, atsižvelgiant į legiruojančiųjų elementų perėjimo iš elektrodo į prilydomą metalą dėsningumą tyrimą. Antrasis siejasi su apvirintų sluoksnių lydinių struktūros ir abrazyvinio dilimo tyrimu.

Disertaciją sudaro įvadas, 3 skyriai ir rezultatų apibendrinimas.

Įvade nagrinėjamas problemos aktualumas, formuluojamas darbo tikslas ir uždaviniai, aprašomas mokslinis darbo naujumas, pristatomi autoriaus pranešimai ir publikacijos, disertacijos struktūra.

Pirmasis skyrius skirtas literatūros apžvalgai. Jame apžvelgti darbai, kuriuose nagrinėjami plieno paviršiaus stiprinimo metodai, lankinio apvirinimo būdai, rankinio elektrolankinio apvirinimo glaistytaisiais elektrodais ypatumai, apvirinto sluoksnio struktūra ir savybės, eksperimentiniai dilimo tyrimo metodai, elektrodinių apvirinimo medžiagų kūrimo principai. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir konkretizuojami disertacijos uždaviniai.

Antrajame skyriuje, metodinėje dalyje, pateikta tyrimų metodika. Aprašyta bandymų metodų esmė, taikymas, eksperimentų atlikimas bei rezultatų apdorojimo metodai.

Trečiajame skyriuje, eksperimentinėje dalyje, aprašyta eksperimentų atlikimo eiga, gauti rezultatai ir jų aptarimas.

Disertacijos tema perskaityta 18 pranešimų Lietuvos bei kitų šalių konferencijose ir paskelbti 16 straipsnių. Taip pat paruošta viena publikacija, pateikta recenzuojamam periodiniam leidiniui.

Abstract

This thesis presents research in the area of creation of coated electrodes for hard surfacing. The principal subject of research is coated electrodes and metals deposited by means of them. The main objective of the thesis is to develop new electrode coatings, to obtain the metal having the proper mechanical properties which enable to produce the surface layers with acquire strength and resistance to abrasive wear. The application area of newly developed welding electrodes is surfacing of working parts of agricultural, mining and road-building machines. The thesis also deals with optimization of alloying elements transfer from electrode to liquid pool with a view to obtain economically alloyed deposited metal.

Welding electrodes are being produced in Lithuania, multi-purpose hard-facing electrodes being among them. All over the world a lot of welding materials manufacturers produce the analogous production, but their products are expensive. A challenge to the competition in the electrodes market is to expand the production range, to offer new products whose quality and price could satisfy customer's demands.

The dissertation analyzes the regularities of alloying elements transfer in developed electrodes from electrode coating to deposited metal and the influence of alloying elements on the properties of coated layers. Two principal tasks are solved: development of coated electrodes coatings and investigation of hard-faced surfaces. The first task is formulated with respect to the investigation of alloying elements transfer regularities from an electrode to deposited metal. The second task concerns the investigation of abrasive wear of the hard-faced alloy structure.

Thesis contains introduction, 3 chapters and the general conclusions.

In the introduction relevance of the problem is considered, the research objective and tasks are stated, novelty is described and the author's reports, publications and set-up of the thesis are presented.

The first chapter is a survey of literature. It reviews the papers dealing with the methods of steel surface strengthening and arc-welding, the manual arc-welding by coated electrodes, the structure and properties of a welded layer, the experimental methods of wear investigation and the principles of development of electrode welding materials. At the end of the chapter conclusions are drawn and the thesis tasks are clarified.

The second chapter is a methodical section presenting the research methodology. The essence of experiments, their application, the experiments and the methods of their treatment are presented there.

The third chapter is an experimental section revealing the whole process of experiments and the obtained results followed by discussion on them.

Author has presented 18 reports on the thesis subject in the scientific conferences in Lithuania and other countries. 16 papers have been published. One paper is handed to the referenced periodical publications.

Žymėjimai

Simboliai

W	suminis nudilimo tūris (mm^3);
w	dilimo intensyvumas ($\text{mm}^3/[\text{N}\cdot\text{mm}]$);
I_{suv}	suvirinimo srovės stipris (A);
v_{suv}	suvirinimo greitis;
$[Me]_v$	cheminio elemento kiekis vieloje (%);
$[Me]_{gl}$	cheminio elemento kiekis glaiste (%);
K_{gm}	glaisto masės koeficientas (%);
m_v	vielos masė (g);
m_{gl}	glaisto masė (g);
d	elektrodo vardinis skersmuo, t. y. vielos strypo skersmuo (mm);
D	elektrodo skersmuo su glaistu, t. y. išorinis skersmuo (mm);
M	metalinių medžiagų kiekis glaiste (%);
C_0, Cr_0, Ti_0	atitinkamo cheminio elemento kiekis elektrode (%);
C_1, Cr_1, Ti_1	atitinkamo cheminio elemento kiekis prilydytame metale (%);
ε	santykinis atsparumas dilimui.

Santrumpos

GMK	glaisto masės koeficientas;
BI	glaisto baziškumo indeksas.

Turinys

Reziumė	iv
Abstract	v
Žymėjimai	vii
Įvadas	1
Problemos formulavimas	1
Darbo aktualumas	2
Tyrimų objektas	2
Darbo tikslas	3
Darbo uždaviniai	3
Mokslinis darbo naujumas	3
Tyrimų metodika	4
Praktinė vertė	4
Ginamieji teiginiai	4
Darbo rezultatų aprobavimas	5
Disertacijos struktūra	6
1. Abrazyvinio dilimo esmė ir jo mažinimo metodai	7
1.1. Trinties ir dilimo problema	7
1.1.1. Detalių dilimo rūšys	8
1.1.2. Medžiagų struktūros įtaka dilimui	9
1.1.3. Atsparumas dilimui	9
1.2. Eksperimentinių dilimo tyrimų apžvalga	10
1.3. Detalių paviršių stiprinimo metodai	13
1.4. Elektrodinių apvirinimo medžiagų kūrimo principai	14
1.4.1. Apvirinimo medžiagų cheminės sudėties ir struktūros parinkimas priklausomai nuo dilimo rūšies	14

1.4.2. Dilimui atsparių apvirinamų sluoksnių kūrimas.....	15
1.4.3. Suvirinimo šlako paskirtis	16
1.4.3.1. Šlako (fliuso) vaidmuo suvirinant	16
1.4.3.2. Šlakų fizikinės ir cheminės savybės	18
1.4.3.3. Šlakų junginių susidarymas ir disociacija	20
1.4.4. Metalų oksidacija	21
1.4.4.1. Oksidacija dujomis	22
1.4.4.2. Oksidacija šlakais	23
1.4.5. Metalų dezoksidacija.....	24
1.4.6. Siūlės metalo legiravimo būdai apvirinant glaistytaisias elektrodais	25
1.4.7. Glaistytieji elektrodai su padidintu legiruojančiųjų elementų kiekiu glaiste	27
1.5. Apibendrinimas. Uždavinių formulavimas	28
2. Elektrodo glaisto sudarymo ir eksperimentinių tyrimų metodika.....	29
2.1. Elektrodo glaisto sudarymas.....	29
2.2. Optinės emisijos spektrometrija.. ..	31
2.3. Rentgeno spindulių difrakcijos eksperimentas.. ..	32
2.4. Mikroskopijos tyrimai.. ..	32
2.5. Abrazyvinio dilimo bandymas.. ..	32
2.6. Elektrodų technologinių savybių vertinimas.. ..	33
2.7. Antrojo skyriaus išvados.. ..	34
3. Rezultatų analizė.....	35
3.1. Šlako sistemos sudėtinių dalių parinkimas	35
3.2. Elektrodų gamybai reikalingų medžiagų parinkimas	36
3.3. Analitinis legiruojančiųjų elementų perėjimo iš elektrodo į prilydomą metalą preliminarinių priklausomybių nustatymas	38
3.4. Elektrodų gamybos parametrų nustatymas.....	42
3.5. Elektrodų glaisto sudarymas	43
3.6. Analitinis prilydyto metalo cheminės sudėties skaičiavimas	46
3.7. Eksperimentinis prilydyto metalo cheminės sudėties nustatymas.....	48
3.8. Legiruojančiųjų elementų perėjimo iš elektrodo į prilydomą metalą ir jų įtakos kitų elementų įsisavinimui dėsnų analizė	52
3.9. Šlakų ir apvirintų sluoksnių metalo rentgeno spindulių difrakcijos bandymų rezultatai.....	54
3.9.1. Šlakų rentgeno spinduliuotės difrakcinė kokybinė fazinė analizė	54
3.9.2. Sluoksnių, apvirintų kuriamais glaistytaisias elektrodais difrakcinė fazinė analizė	55
3.10. Apvirintų sluoksnių optinės ir elektroninės mikroskopijos tyrimų rezultatai ir jų analizė.....	58

3.11. Abrazyvinio dilimo bandymų pagal ASTM G65 metodą rezultatų analizė	66
3.12. Sukurtų elektrodų virinimo technologinių savybių vertinimas	72
3.13. Sukurtų apvirinimo elektrodų panaudojimo galimybės.....	72
3.14. Trečiojo skyriaus išvados	73
Rezultatų apibendrinimas ir išvados.....	75
Literatūros sąrašas	77
Autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas	88
Priedai.....	91
A priedas. Elektrodo glaisto sudarymo algoritmas, bei skaičiavimų programos lango vaizdas.....	93
B priedas. Sukurtų apvirinimo elektrodų aprašymai gamyklos elektrodų kataloge	95
C priedas. Sukurtiems apvirinimo elektrodams suteikti atitiktikties sertifikatai	98

Ivadas

Problemos formulavimas

Įrankių detalių ir technologinės įrangos gamybai naudojamos įvairios medžiagos, t. y. plienai, specialių savybių lydiniai, kompozitai, mineralų keramika ir kt. Jos turi pasižymėti atsparumu kaitrai, atsparumu korozijai įvairiose agresyviose terpėse, atsparumu įvairių rūšių dilimui, daugeliu atvejų ir įvairioms išorinio poveikio kombinacijoms.

Labai svarbu taupyti konstrukcines medžiagas ir tinkamai panaudoti visus medžiagų savybių resursus. Tai pasiekama parenkant tinkamiausią lydinio cheminę sudėtį, terminio bei mechaninio apdirbimo režimus, paviršinių sluoksnių stiprinimą.

Yra žinoma daug įvairių paviršių stiprinimo būdų ir sukurta daug įvairių suvirinimo medžiagų, skirtų paviršių apvirinimui. Detalėms, kurios eksploatuojamos abrazyvinio ir smūginio-abrazyvinio poveikio aplinkoje, siekiant padidinti atsparumą dilimui konkrečiomis darbinio apkrovimo sąlygomis, reikalinga optimali struktūrinė-fazinė apvirinto metalo sudėtis, kuri sąlygojama ir prilydyto metalo chemine sudėtimi.

Viena iš šiuolaikinės įrankių ir mašinų detalių gamybos ir restauravimo sričių yra konstrukcinio plieno detalių apvirinimas reikiamų savybių lydinio sluoksniu, taip suteikiant įrankių ir detalių paviršiams reikiamas savybes.

Disertacijoje nagrinėjami kuriamų elektrodų glaistų legiruojančiųjų elementų

perėjimo iš elektrodo glaisto į prilydomą metalą dėsniumai, tiriama legiruojančiųjų elementų įtaka apvirintų sluoksnių savybėms.

Darbo aktualumas

Šiandieninė konkurencinė gamybinė aplinka reikalauja iš technikos gamintojų vis didėjančios mašinų galios bei našumo, nemažinant reikalavimų patikimumui mašinų elementams bei mašinoms apskritai. Taupant išlaidas mašinų medžiagoms, mašinų gamybai naudojamos vis kokybiškesnės, labiau legiruotos medžiagos, naudojamos įvairiausios dangos. Tai leidžia sumažinti mašinų masę, tačiau mašinų elementų darbų paviršiams tenka vis didesnės lyginamosios apkrovos. Mašinų darbo elementų darbo sąlygų įvairovė yra didelė – nuo aukštų kontaktinių apkrovų (riedėjimo guoliuose, skirstymo veleno kumštelių paviršiuose) ir didelių abrazyvinės masės slydimo greičių (ciklonuose, svaitytuvuose, siurbliuose).

Tai įtakoja mašinų trinties porų patikimumą. Todėl trinties porų darbo paviršių patikimumas didinamas apvirinant, užpurškiant, galvaninėmis ir kitomis dangomis bei technologijos metodais, parenkant trinties paviršių konstrukcijas bei medžiagas pagal veikiančius (vyraujančius) veiksnius.

Viena intensyviausių dilimo rūšių yra abrazyvinis dilimas. Žemės dirbimo mašinų darbinių dalių nudilimas siekia iki 50 proc. jų masės, o linijinis nudilimas gali siekti 50...70 mm. Didžiausiems nudilimams kompensuoti vienas dažnai naudojamų sustiprinimo / naujinimo būdų yra rankinis elektrolankinis apvirinimas glaistytais elektrodais.

Tyrimų objektas

Disertacinio darbo tyrimų objektai:

- kuriami eksperimentiniai apvirinimo elektrodai;
- šiais elektrodais apvirinti gaminių paviršiai.

Darbo tikslas

Panaudojant Lietuvoje turimas žaliavas, sukurti tinkamus detalių paviršių, dirbančių abrazyvinio ir smūginio-abrazyvinio poveikio sąlygomis, apvirinimui elektrodus. Šiam tikslui pasiekti būtina ištirti prilydyto metalo legiravimo dėsningumus apvirinant geležies lydinis glaistytaisiais elektrodais.

Žinant legiruojančiųjų elementų įtaką lydinio mechaninėms savybėms, reikia

surasti tinkamiausią elektrodų glaisto komponentų sudėtį bei jų santykį, nes elektrodo glaistas turi ne tik legiruoti išlydytą metalą, bet ir sudaryti apsauginį šlakų sluoksnį, užtikrinantį stabilų suvirinimo lanko žadinimą ir degimą, tinkamą suvirinimo vonelės apsaugą nuo aplinkos poveikio, nepriekaištingą suvirinimo rumbelės formavimą ir gerą šlako luobelės atsiskyrimą.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti darbe spręsti šie uždaviniai:

1. Išnagrinėti elektrodinių apvirinimo medžiagų kūrimo principai.
2. Pasiūlyta nauja elektrodų glaisto sudarymo metodika.
3. Sukurti ir pagaminti eksperimentiniai apvirinimo elektrodai, kuriais apvirinti sluoksniai įgyja atsparumo abrazyviniam dilimui savybes.
4. Nustatyti legiruojančiųjų elementų perėjimo iš elektrodo į prilydomą metalą dėsniumai.
5. Nustatyta pagrindinių legiruojančiųjų elementų įtaką abrazyviniam dilimui.
6. Ištirtos naujais elektrodais apvirintų sluoksnių struktūros.
7. Išnagrinėtosos naujų apvirinimo elektrodų panaudojimo galimybės.

Mokslinis darbo naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie mokslui nauji rezultatai:

- pasiūlyta nauja metodika apvirinimo elektrodų glaistų sudarymui;
- ištirti legiruojančiųjų cheminių elementų perėjimo iš elektrodo glaisto į prilydomą metalą ir šlaką dėsniumai, esant naujai pasiūlytai glaisto komponentų sudėčiai;
- ištirta lydinio legiruojančiųjų elementų koncentracijos įtaka apvirintų sluoksnių abrazyviniam dilimui;
- ištirta sukurtais glaistytaisiais elektrodais apvirintų sluoksnių struktūros ir jų dilimo tarpusavio priklausomybė.

Tyrimų metodika

Disertaciniame darbe taikomi analitiniai ir eksperimentiniai tyrimo metodai.

Sudarytoms glaistų kompozicijoms analitiškai apskaičiuota prilydyto metalo cheminė sudėtis, kuri būtų gaunama apvirinus metalo paviršių kuriamais elektrodais.

Eksperimentams buvo pagaminti apvirinimo elektrodai ir jų tyrimams panaudoti optinės emisijos spektrometrijos, abrazyvinio dilimo bandymų (pagal ASTM G65), rentgeno spindulių difrakcijos, nuskaitančiosios elektroninės mikroskopijos, optinės mikroskopijos metodai.

Praktinė vertė

Tyrimais nustatytas tinkamiausias legiruojančiųjų elementų kiekis elektrodų glaiste, kuriam esant šiais elektrodais apvirinti sluoksniai įgauna geriausias atsparumo abrazyviniam dilimui savybes.

Tyrimų rezultatai ir pasiūlyta elektrodų glaistų sudarymo metodika leido sukurti ir sertifikuoti įvairios glaistų sudėties elektrodus, tinkamus apvirinti paviršius pageidaujamų cheminių ir mechaninių savybių lydiniu.

Ginamieji teiginiai

1. Nustatyti legiruojančiųjų elementų (anglies, silicio, mangano, chromo, titano, boro) perėjimo iš elektrodo į prilydomą metalą dėsningumai, apvirinant rankiniu elektrolankiniu būdu glaistytaisiais elektrodais.
2. Legiruojančiųjų elementų įtakos apvirintų sluoksnių dilimo atsparumui mechanizmas.
3. Legiruojančiųjų cheminių elementų perėjimo iš elektrodo glaisto į prilydomą metalą priklausomybės nuo jų kiekio glaiste santykio.
4. Apvirintų sukurtais glaistytaisiais elektrodais sluoksnių struktūros ir jų dilimo tarpusavio priklausomybės.

Darbo rezultatų apibavimas

Darbo rezultatai buvo paskelbti aštuoniolikoje mokslinių konferencijų Lietuvoje bei užsienyje.

Disertacijos tematika atspausdinta 16 mokslinių straipsnių:

- vienas – straipsnių rinkinyje, įtraukame į ISI WOS duomenų bazę [1A];
- du – straipsnių rinkiniuose LMT patvirtintose DB [2A, 3A];
- vienas – konferencijos medžiagoje ISI Proceeding [10A];
- vienas – konferencijos medžiagoje LMT patvirtintose DB [12A];
- penki – kituose recenzuojamuose leidiniuose [4A, 5A, 6A, 7A, 8A];
- du – recenzuojamose užsienio tarptautinių konferencijų medžiagose [9A, 13A];
- vienas – recenzuojamoje Lietuvos tarptautinės konferencijos medžiagoje [14A];
- trys – nerecenzuojamoje Lietuvos konferencijų medžiagoje [11A, 15A, 16A];
- paruošta viena publikacija, pateikta recenzuojamam periodiniam leidiniui [17A].

Visų straipsnių bendraautoriams priklauso po lygią tame straipsnyje paskelbtų tyrimų rezultatų dalį.

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti šiose mokslinėse konferencijose:

- Keturiuose Jaunųjų mokslininkų konferencijose „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“ („Mokslas – Lietuvos ateitis“), 2004 m., 2005 m., 2006 m. ir 2007 m., Vilniuje;
- Trijose Tarptautinėse konferencijose „Mechatronic Systems and Materials“, 2005 m., Vilniuje; 2006 m., Krokuvoje; 2007 m., Kaune;
- Trijose Tarptautinėse konferencijose „Mechanika“ 2003 m., 2005 m. ir 2006 m., Kaune;
- Dviejose tarptautinėse vasaros mokyklose–konferencijose „Advanced materials and technologies“, 2003 m. ir 2005 m., Palangoje;
- Tarptautinėje IIW konferencijoje „WELDING & MATERIALS. Technical, economic and ecological aspects“, 2007 m., Dubrovnikė;
- Tarptautinėje konferencijoje, skirtoje LŽŪU Žemės ūkio inžinerijos fakulteto 60-mečiui, 2006 m., Kaune;
- Tarptautinėje konferencijoje „BALTTTRIB“, 2007 m., Kaune;
- Respublikinėje konferencijoje „Medžiagų inžinerija“, 2003 m., Kaune;

- Respublikinėje konferencijoje „Mechatroninės sistemos ir medžiagos“, 2003 m, Vilniuje;
- Tarptautinėje konferencijoje „Welding & powder metallurgy“, 2005 m., Jurmaloje.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, 3 skyriai ir rezultatų apibendrinimas.

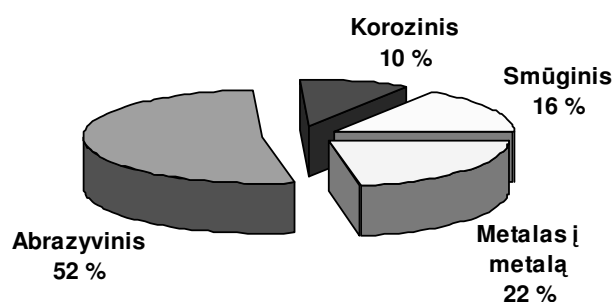
Pirmajame skyriuje pateikti atliktos literatūros analizės rezultatai, antrajame aprašyta tyrimų metodika, trečiajame skyriuje aprašyta eksperimentų atlikimo eiga, gauti rezultatai bei jų aptarimas.

Darbo apimtis yra 100 puslapių (neskaičiuojant priedų), tekste panaudota 31 numeruota formulė, 36 paveikslai ir 24 lentelės. Taip pat yra 3 priedai. Rašant disertaciją buvo panaudoti 109 literatūros šaltiniai.

Abrazyvinio dilimo esmė ir jo mažinimo būdai

1.1. Trinties ir dilimo problema

Trinties ir dilimo sudaromi nuostoliai pramonės įrenginiuose siekia 4–5 % bendrojo nacionalinio (visuminio) produkto, trinties nuostoliams kompensuoti sunaudojama 30–40 % sukuriamos energijos, 80–90 % gedimų įvyksta nudilus mašinų elementų paviršias [1]. Nors dažniausiai gedimai įvyksta dėl mažų nudilimų (iki 0,2 mm), žemės ūkio, kalnakasybos mašinų elementai nudyla dešimtis milimetrų, ir nudilimas gali siekti 42 % jų masės [2]. Metalų nuostolių dėl įvairių dilimo rūšių pasiskirstymo diagrama pateikta 1.1 paveiksle [3].



1.1 pav. Nuostolių dėl įvairių dilimo rūšių sunkiojoje pramonėje pasiskirstymo diagrama

Dilimo intensyvumui įtaką turi ir abrazyvo savybės (rūšis, kietis, dalelių forma), ir mašinos elemento medžiagos savybės (sudėtis, struktūra, kietis, karbidų kiekis bei jų dydis).

Vienus mašinų elementus abrazyvas veikia mažu greičiu, bet dideliu kontaktiniu slėgiu (uolienų smulkinimo mechanizmų žiaunos, dirvos dirbimo mašinų kaltai ir noragai, žemės kasimo statybos mašinų kaušai bei dantys), kitus elementus abrazyvas veikia dideliais greičiais (smėliasvaidžių mentės, siurblių rotorai bei darbo ratai). Spartus šių dalių dilimas priverčia dažnai mašinas remontuoti. Mašinos naudojimo kainą didina ir jų prastovos, ir išlaidos atsarginėms dalims. Todėl atsparumo dilimui didinimas svarbus [4, 5].

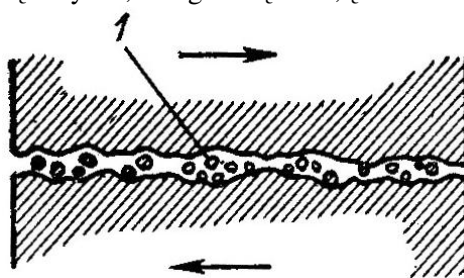
1.1.1. Detalių dilimo rūšys

Dilimas yra sudėtingas kietojo kūno paviršinių sluoksnių irimo procesas, mechaniškai veikiant jį kitam kūnui ar terpei. Jei mechaninį poveikį sukelia trinties jėga, tai dilimas vyksta trinties metu.

Skiriama vandenilinis, abrazyvinis, abrazyvinis-smūginis, nuovarginis, oksidacinis, kavitacinis ir erozinis dilimas. Dilimas gali vykti ir dėl plastinių deformacijų, dėl dispergavimo, o taip pat dėl naujai susidariusių struktūrų ištrupėjimo. Prie dilimo rūšių galima priskirti ir koroziją.

Naujai kuriami glaistytieji elektrodai skirti gaminiams, kurie eksploatuojami abrazyvinio ar abrazyvinio-smūginio darbo sąlygomis, todėl tolesnė literatūros analizė susijusi su šiais dilimo atvejais.

Abrazyvinis dilimas yra detalės (1.2 pav.) paviršiaus irimas dėl jo sąveikos su kietomis dalelėmis, esant santykiniam greičiui. Abrazyvinė medžiaga yra mineralas, kurio grūdėliai, būdami pakankamo kiekio, turi galimybę pjauti-rėžti. Abrazyviniam dilimui turi įtakos abrazyvinės dalelės prigimtis, terpės agresyvumas, paviršių savybės, smūginė sąveika, įkaitinimas ir kiti veiksniai.



1.2 pav. Abrazyvinio dilimo schema:
1 – kietos medžiagos dalelės (abrazyvinės dalelės)

Abrazyvinis-smūginis dilimas – atskira abrazyvinio dilimo rūšis. Jam būdingas duobučių susidarymas paviršiuje nuo smūgių dėl lokalinės plastinės metalo deformacijos.

Dilimą dėl plastinių deformacijų sukelia detalės matmenų ir geometrinės formos kitimas dėl plastinių jos deformacijų mikrotūriuose.

Dilimas dėl naujai susidariusių struktūrų ištrupėjimo. Fizikinių ir cheminių pokyčių metu susidaro struktūros, dėl kurių kinta paviršių sąveika ir irimo pobūdis.

Erozinis dilimas – didelio greičio dujų ar garo srauto trintis ir smūgiai į paviršių [7, 8].

1.1.2. Medžiagų struktūros įtaka dilimui

Metallų lydinų atsparumas dilimui labai priklauso nuo jų struktūros, cheminės sudėties ir terminio apdirbimo būdo. Lydinio atsparumas dilimui paprastai būna didesnis, kai jis yra smulkiagrūdės struktūros, kai jame yra kietų sudedamųjų dalių, kurios priima pagrindinę apkrovą, kai metale yra tarpų (pavyzdžiui, karbidų).

Nustatant lydinų struktūros įtaką jų atsparumui, reikia įvertinti, kad, trinant metalui, ploname paviršiniame jo sluoksnyje susidaro naujos fazės ir struktūros. Ypač dideli pokyčiai vyksta tuomet, kai susidaro oksidų ir kitokios plėvelės, kurios saugo metalo paviršių nuo tiesioginio kontakto su kitu metalu. Esant oksidaciniam dilimui, atsparumas priklauso nuo antrinių struktūrų susidarymo esant trinčiai, intensyvumo ir jų ypatybių.

Kadangi dilimas susijęs su plastinėmis deformacijomis, tad kuo medžiaga kietesnė ir stipresnė, tuo galima tikėtis ir didesnio atsparumo dilimui. Tačiau to paties kietumo ir vienodos takumo ribos medžiagos dilimui gali būti atsparios nevienodai. Tai priklauso nuo jų mikrotūrių arba net atskirų struktūrinių dalių savybių. Mikrotūriuose susidaro gniuždymo iš įvairių pusių zonos, todėl gali plastiškai deformuotis net tokios trapios sudėtinės dalys, kaip karbidai ar martensitas. Skirtinga antrinė struktūra susidaro ir paviršinėse plėvelėse, kurios atsiranda dylant. Todėl pagal pavienės mechanines charakteristikas spręsti apie atsparumą dilimui negalima.

Kietųjų sluoksnių $Fe-C-Cr-B$, $Fe-C-Cr-Mo$ abrazyvinį dilimą (kvarciniu smėliu) labiausiai lemia karbidus ir boridus sudarančių elementų kiekis. Nudilimą mažina didėjantis sluoksnių anglingumas ir kietis. Sluoksnių kiečiui pasiekus 55...57 HRC nudilimas sumažėja, ir kiečiui toliau didėjant nudilimas išlieka pastovus [9–29].

1.1.3. Atsparumas dilimui

Atsparumas dilimui – kai trinties jėgų veikiamos medžiagos geba priešintis palaipsniui paviršinio sluoksnių ardymui atskiriant nuo jo medžiagos daleles.

Energetiniu požiūriu trintis yra disipatinis (sklaidos) procesas, ypatingas tuo, kad beveik visas darbas jai nugalėti paverčiamas šiluma. Trintis yra vidinė ir

išorinė. Dilimui yra svarbiausia išorinė trintis. Tai mechaninė besiliečiančių kietų medžiagų sąveika, pasireiškianti tuo, kad vienai medžiagai trukdoma judėti kitos paviršiumi.

Trinties jėga nepriklauso nuo besiliečiančių paviršių geometrijos ir yra proporcinga šių paviršių suspaudimo jėgai (apkrovai). Proporcingumo koeficientas vadinamas trinties koeficientu. Jis priklauso nuo besitrinančių medžiagų prigimties, tačiau gali labai kisti esant skirtingoms trinties sąlygoms (greičiui, apkrovai, aplinkai, paviršių kokybei).

Pagal molekulinę-mechaninę trinties teoriją paviršių sąveika atsiranda formuojantis faktiniams kontaktų paviršiams (tarp paviršių nelygumų viršūnėlių) ir dėl tampriųjų bei plastinių deformacijų ir adhezijos, tarp jų susidarant jungtims. Trinties jėga nusakoma kaip suma dviejų dedamųjų – pasipriešinimo medžiagų jungčių suardymui ir pasipriešinimo persislinkimui silpnesnės medžiagos mikrotūrių, kai į ją įsiskverbia kietesnės medžiagos nelygumai.

Medžiagų dilimui svarbią reikšmę turi besiliečiančių sluoksnių tamprioji ir plastinė deformacija. Dėl plastinio deformavimo pagausėja metalo kristalinės sandaros netobulumų, kurie suaktyvina paviršinius sluoksnius ir skatina besiliečiančių plotelių sukibimą. Slenkant paviršiams, sukibusios viršūnėlės perplėšiamos mažiau sukietėjusiuose posluoksniuose, taigi atplėšiant iš vieno paviršiaus, dažnai silpnesniojo, metalo mikrotūrius. Minkštesniojo metalo paviršinių nelygumų viršūnėlės taip pat gali nuglemžti kietesniojo paviršiaus išsikišusios dalelės. Dilimą gali skatinti ir kiti trinties metu vykstantys sudėtingi procesai, pavyzdžiui, cheminiai [3, 7, 8, 30–35].

Dėl išdilimo mašinų detalės tampa netinkamos darbui dažniau negu dėl nuovargio.

1.2. Eksperimentinių dilimo tyrimų apžvalga

Norint apskaičiuoti ir prognozuoti dylančio gaminio patikimumą, parinkti sujungimams reikalingas medžiagas, jų matmenis ir konstrukciją, reikia žinoti svarbiausius medžiagų dilimo dėsningumus. Svarbiausi šie rodikliai:

- tiesinis išdilimas – dylančio paviršiaus matmenų pokytis, išmatuotas statmenai trinties paviršiui;
- dilimo greitis – išdilimo dydžio ir dilimo trukmės santykis;
- dilimo intensyvumas – išdilimo dydžio ir tos vietos trinties kelio santykis.

Išdilimo laipsnį dažnai rodo linijinių matmenų pasikeitimas, tačiau gali rodyti ir masės arba tūrio sumažėjimas.

Realus dilimas yra labai sudėtinga kombinacija, kurią ne visada galima įvertinti bandymais. Bet bandymai duoda realius nudilimų dydžius.

Paprasčiausi metodai yra dylančių detalių matavimas paprastomis priemonėmis, o sudėtingiausi tie, kuriais tiriami branduoliniai fizikiniai procesai.

Pasirenkant matavimo metodą, atsižvelgiama į tyrimų tikslą, reikalingą matavimų tikslumą, galimybę išmatuoti mažus dilimo dydžius, laiką, reikalingą dilimui išmatuoti, taip pat į laiko ir lėšų sąnaudas [7, 8, 35].

Metodai dilimui matuoti skirstomi į diferencialinius ir integralinius. Diferencialiniais metodais nustatoma, kaip pasiskirstęs dilimas erdvėje ir laike, t. y. dilimas išmatuojamas atskiruose trinties paviršiaus taškuose, ir nustatoma, kiek ilgainiui jis pakinta. Integraliniais metodais matuojamos vidutinės suminės viso trinties paviršiaus dilimo charakteristikos tam tikru momentu.

Pagreitinti bandymai naudojant Ogoe mašiną. 1.3 paveiksle pateikiami bandinių forma ir matmenys bandymams minėto tipo mašina. Šis metodas dažniausiai naudojamas dilimo bandymams, kur vyraujantis yra adhezinis dilimas. Bandomas plokščias bandinys, prispaustas prie besisukančio disko išorinio paviršiaus. Dilimas nustatomas skaičiuojant sudilusios medžiagos tūrį. Bandant Ogoe tipo mašina, dėl dilimo ilgėja besiliečiančių paviršių kontakto linija (b). Atitinkamas apkrovos didinimas atliekamas pasitelkus ekscentrinį mechanizmą proporcingai trinties kelio (l) didėjimui, tai užtikrina bandymui pastovaus kontaktinio slėgio, nepriklausančio nuo trinties kelio, sąlygas [35].

Suminis sudilimo tūris W apskaičiuojamas pagal formulę

$$W = B \cdot b / (12 \cdot r) \quad \text{mm}^3, \quad (1.1)$$

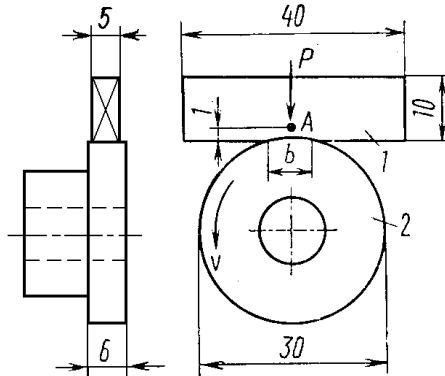
čia B – bandinio plotis, mm; r – besisukančio disko spindulys, mm; b – besiliečiančių paviršių kontakto linija.

Intensyvumas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$w = W / (p \cdot s \cdot l) \quad \text{mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{mm}), \quad (1.2)$$

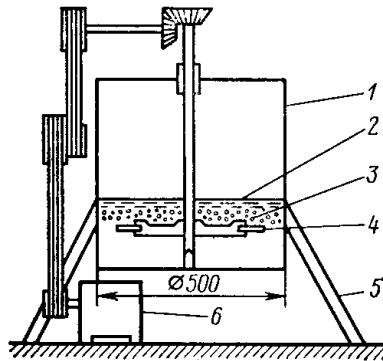
čia p – kontaktinis slėgis, N/mm^2 ; s – kontakto plotas, mm^2 ; l – trinties kelias, mm.

Metalo atsparumas dilimui labai priklauso nuo jo kietumo: esant žemam kietumui, gaunamos didelės dilimo reikšmės netgi esant mažai apkrovai. Esant aukštam kietumui, apkrovos padidėjimas beveik nepadidina dilimo. Pradiniame bandymų etape gaunamas didelis išdilimo prieaugis, kurio laipsnis priklauso nuo kietumo ir apkrovos, toliau bandymas vyksta vidutinio dilimo sąlygomis, kas susiję su besitrinančių paviršių mechaniniu sustiprinimu ir oksidinės plėvelės susidarymu ant paviršių dėl šilumos išsiskyrimo.



1.3 pav. Dilimo bandymo bandinio eskizas:
1 – bandinys; 2 – besisukantis diskas

Dilimo bandymai abrazyvinėje aplinkoje. 1.4 paveiksle pateikta šio bandymo mašinos schema. Bandymo metu bandinys juda abrazyvinėje aplinkoje. Drėgnas bandymo metodas parinktas dėl jo bandymų rezultatų panaudojimo grunto transportavimo vamzdynų, betono maišyklių ir kitų mašinų, dirbančių drėgname grunte, detalių dilimo vertinimui. Bandymų rezultatai rodo, kad didėjant metalo kiečiui didėja ir jo atsparumas dilimui, o esant vienodam kiečiui dilimas iš dalies priklauso nuo metalo struktūros: metalas su beinitine struktūra dyla mažiau nei martensitinės struktūros metalas, o neketas austenitinis korozijai atsparus plienas pagal atsparumo dilimui rodiklius pranoksta ir beinitinį, ir martensitinį plieną [35].



1.4 pav. Bandymų dilimui abrazyvinėje aplinkoje įrenginio schema:
1 – korpusas; 2 – vandens lygis; 3 – abrazyvinės aplinkos sluoksnis; 4 – bandinys; 5 – atrama; 6 – elektros variklis

Kitos įvairių abrazyvinio dilimo bandymų įrenginių schemas skiriasi viena nuo kitos abrazyvo įtvirtinimo pobūdžiu (įtvirtintas, pusiau įtvirtintas, neįtvirtintas), etalono naudojimu ar nenaudojimu, abrazyvinės aplinkos pobūdžiu

(drėgna ar sausa aplinka, abrazyvinių dalelių dydis, smūginių apkrovų sukėlimas bandymo metu) ir dalelių judėjimo kinematika bei kt.

Tačiau nė vienas iš abrazyvinio dilimo metodų nėra universalus. Priklausomai nuo abrazyvinio dilimo pobūdžio kaskart reikia parinkti, o kartais ir sukurti tinkamiausią metodą ir įrenginius, kuriais būtų galima tiksliausiai modeliuoti realias detalės ar įrenginio abrazyvinio dilimo sąlygas [8, 35, 88].

Mikrometravimo metodas pagrįstas tuo, kad mikrometru, indikatoriumi arba kitais prietaisais išmatuojama neišdilusi ir jau išdilusi detalė. Šio metodo trūkumas tas, kad negalima išmatuoti, kaip dyla dirbanti mašina, būtinai reikia išardyti dalį mazgo arba matuojamąją detalę. Be to, labai grioždiški įrenginiai, nors jie ir skirti dilimui matuoti pačioje mašinoje. Svarbiausia tai, kad nėra matavimo bazės, todėl negalima nustatyti, kokio didumo išdilimas, o kartais nudilusio paviršiaus formos.

Paviršiaus aktyvinimo metodu išmatuojama, kiek sumažėjo dylančios detalės radioaktyvumas. Tam tikrame tiriamosios detalės plotelyje sudaromas 0,05...0,4 mm gylio radioaktyvusis tūris, t. y. tas plotelis apšvitinamas neutronais, protonais gama spinduliais. Kiek nudilusi detalė, nustatoma iš taravimo grafiko: palyginama, kiek sumažėjo detalės ir pavyzdžio, aktyvintų vienodomis sąlygomis, radioaktyvumas.

Radioaktyvumas matuojamas aparatūra, kuri registruoja arba spinduliavimo šaltinio impulsų skaičių, arba tam tikros amplitudės impulsų skaičių [8].

1.3. Detalių paviršių stiprinimo metodai

Įvairių pramonės įrenginių bei žemės ūkio mašinų darbingumo palaikymui išleidžiamos didelės lėšos. Tai abrazyvinio dilimo veikiamos uolienų smulkinimo mechanizmų žiaunos, smėliasvaidžių mentės, dirvos dirbimo mašinų kaltai ir noragai, žemės kasimo statybos mašinų kaušai bei dantys, buldozerių bei greiderių peiliai ir kt. darbo dalys. Tad atsparumo dilimui didinimas itin svarbus [4, 5].

Minėtų dalių nudilimas siekia kelias dešimtis milimetrų, todėl šių dalių stiprinimui cheminio-terminio apdirbimo metodai (azotavimas, boravimas) netinkami. Boravimu formuojami 1600...2000 HV kietumo atsparūs abrazyviniam dilimui 0,1...0,3 mm sluoksniai, kurie dilimo su smūgiais sąlygomis yra trapūs. Todėl cementavimas, sustiprinantis 0,5...1,0 mm gylio sluoksnį, yra pranašesnis. Visi žemės dirbimo mašinų gamintojai stiprinimui naudoja grūdininą, taip pat ir grūdininą kaitinant aukšto dažnio srovėmis.

Atsparių dilimui medžiagų sukurta daug, tačiau daugeliu atvejų siekta didžiausio kietumo. Tai ne visada pasiteisina. Neretai legiruojančių elementų kiekis didesnis nei 50 %, tai juos labai brangina. Į sluoksnius įvedama anglis,

azotas, boras sluoksniuose sudaro karbidų, boridų, nitridų intarpus. Atsparumą dilimui labiausiai lemia karbidinės fazės tipas bei kiekis. Dažniausia stiprinanti fazė: Fe_3C , Cr_7C_3 , W_2C , WC , TiC , B_4C , Mo_2C ir kt., taip pat karboboridai bei nitridai. Labiausiai paplitusių karbidų bei boridų kiečiai: $Fe_3C - 10,5 \text{ GPa}$, $Cr_3C_2 - 12,5 \text{ GPa}$, $Mo_2C - 16 \text{ GPa}$, $TiC - 32 \text{ GPa}$, $CrB_2 - 18 \text{ GPa}$, $TiB_2 - 33,7 \text{ GPa}$, $B_4C - 55 \text{ GPa}$ [36–47].

Universaliausias, ekonomiškai ir labiausiai paplitęs mašinų detalių gamybos ir naujinimo būdas yra apvirinimas, kuriuo atstatoma nudilusio elemento forma bei resursas. Apvirinimas atsparumą dilimui padidina 2...10 kartų (efektą nulemia kietasis sluoksnis ir naudojimo sąlygos), palyginus su neapvirintu. Apvirinamas sluoksnis sudaro 2...6 % detalės masės [2, 35].

Apvirinimo medžiagų legiravimo sistemos yra įvairios: $Fe-C-Cr$, $Fe-C-Mn$, $Fe-C-W$, $Fe-C-Cr-Mn$, $Fe-C-Cr-B$, $Fe-C-Cr-Mo$, $Fe-C-Cr-W-V$ ir kt. Anglies ir legiruojančių elementų kiekiai sluoksniuose: $C - 0,3...4,8 \%$; $Cr - 2...30 \%$; $Mn - 0,5...15 \%$; $B - 0,1...6 \%$ [47–63].

1.4. Elektrodinių apvirinimo medžiagų kūrimo principai

1.4.1. Apvirinimo medžiagų cheminės sudėties ir struktūros parinkimas priklausomai nuo dilimo rūšies

Apvirinimo medžiagų su išteklius tausojančiais ekonomiškai legiruotais glaistais, pasižyminčių aukštomis technologinėmis savybėmis ir užtikrinančių aukštą prilydomo metalo kokybę, bei plienų apvirinimo su metastabiliu austenitu technologijų tobulinimas, kūrimas ir įdiegimas buvo ir yra pakankamai aktualus.

Lydinių su austenitine, austenitine-martensitine ir austenitine-karbidine struktūra panaudojimas daugeliu atvejų užtikrina reikiamą atsparumą dėvėjimuisi, aukštą smūginio tūsumo lygį bei viršutinio apvirinto metalo sluoksnio stiprį. $Fe-C-Cr-Mn-Ti$ sistemos lydiniai, papildomai legiruoti molibdeno ir kai kuriais kitais elementais, pagal atsparumo abrazyviniam, smūginiam-abrazyviniam, molekuliniam-mechaniniam ir vandeniliniam dilimui savybes pranoksta daugelį tradiciškai naudojamų $Fe-C-W-Cr-V$ ir $Fe-C-Cr-Ni$ sistemų lydinių [64–69].

Titanas, padidinantis atsparumą dilimui aukšto mangano kiekio metastabiliuose lydiniuose, pakeičia pirminės kristalizacijos struktūrą ir padidina apvirinto sluoksnio pirminės plastinės deformacijos atsparumą. Skaiciavimai ir

eksperimentiniai duomenys rodo, kad titano karbidai, kaip prilydyto metalo sluoksnio atsparumo abrazyviniam dilimui padidinimo priemonė, pagal efektyvumą nenusileidžia vanadžio ir niobio karbidams, kurie paprastai naudojami kaip stiprinančioji fazė, ir tai leidžia tausoti vanadį ir niobį [64–66].

Apvirinant ekonomiškai legiruotais metastabiliais lydiniais mažanglius ir vidutinio anglingumo plienus sulydymo su pagrindiniu metalu zonoje gali atsirasti cheminio nevienalytiškumo zona, susijusi su legiruojančiųjų elementų (chromo, mangano, titano ir kt.) kiekio sumažėjimu ir prisotinimu anglimi, perėjusia iš pagrindinio metalo. Pereinamoji zona gali būti sudaryta iš martensitinio pasluoksnio, esančio šalia sulydymo linijos, ir difuzinio pasluoksnio be martensitinių virsmų, bet turinčio skirtingą cheminę sudėtį. Dėl įtempių, atsirandančių tarp medžiagų su skirtingais temperatūrinio plėtimosi koeficientais, martensitinis pasluoksnis gali tapti įtrūkų atsiradimo židiniu.

Efektyvi priemonė, neleidžianti atsirasti atskilimams ir atitrūkimams, yra anglies kiekio mažinimas austenito, beinito ir martensito sulydymo zonoje, legiruojant prilydytą metalą titanu. Daugiaanglio chrominio prilydomo metalo kompleksinis legiravimas vanadžiu, volframu, molibdenu leidžia išvengti išsisluoksniavimo dėl beinitinio-martensitinio pagrindo susidarymo visuose daugiasluoksnio apvirinimo sluoksniuose.

Apvirintame sluoksnyje sudarant austenitinę-martensitinę matricą, užtikrinamas žymus technologinio stiprio padidėjimas. Dispersiškai kietėjančių apvirinimo lydinų panaudojimas sumažina energijos sąnaudas, apvirinant detales dilimui atspariu lydiniu [65–67, 99, 100].

Pagrindinio metalo persimaišymo laipsnį su apvirinamu sluoksniu lemia pralydymo pobūdis. Pagrindinio metalo dalies padidėjimas apvirintame sluoksnyje mažina elektrodingo metalo legiruojančiųjų elementų poveikio efektyvumą. Didesnis elektrodingo metalo legiruojančiųjų elementų poveikis gaunamas padidinus elektrodingo metalo dalį apvirinamame sluoksnyje, dedant į elektrodų glaistą geležies miltelių, reguliuojant lanko įtampą ir srovės stiprį [66].

1.4.2. Dilimui atsparių apvirinamų sluoksnių kūrimas

Detalių, kurios eksploatuojamos abrazyvinio ir smūginio-abrazyvinio poveikio sąlygomis, apvirinimui yra sukurta gausybė medžiagų, kurios sudaro įvairių struktūrinių klasių prilydomą metalą. Siekiant padidinti atsparumą dilimui konkrečiomis darbinio apkrovimo sąlygomis reikalinga tam tikra struktūrinė-fazinė prilydyto metalo sudėtis, kurią lemia prilydyto metalo cheminė sudėtis ir struktūra.

Prilydyto metalo darbingumas ir optimalios jo struktūrinės sudėties parinkimas abrazyvinio ir smūginio-abrazyvinio poveikio sąlygoms grindžiamas struktūriniu-energetiniu lydinio savybių vertinimu. Metodas pagrįstas susidarančių pirminių karbidų, boridų ir nitridų rūšies ir kiekio, stiprinančiųjų

eutektinės kilmės fazių ir lydinio matricos struktūrinės sudėties nuosekliu skaičiavimu [70–90].

1.4.3. Suvirinimo šlako paskirtis

Kuriant glaistytuosius elektrodus labai didelę svarbą turi elektrodo glaistas, nes jis atlieka daug svarbių funkcijų, nuo kurių dažnai priklauso prilydyto metalo savybės ir apvirinto sluoksnio parametrai.

Metalurgijoje šlakais vadinama nemetalinė danga virš skysto metalo vonelės. Tai įvairių metalų ir metaloidų oksidų lydiniai. Be oksidų, juose būna sulfidų, fluoridų ir kt.

Šlakai yra vienos iš būtiniausių medžiagų, užtikrinančių suvirinimo lydymu procesų eigą. Šlakų funkcijos suvirinimo ir apvirinimo technologiniuose procesuose gali būti labai skirtingos. Bendra tarp jų tai, kad šlakas glaudžiai kontaktuoja su skystu metalu, todėl neišvengiamai vyksta jų sąveika. Šios sąveikos pobūdis priklauso nuo šlako ir metalo sudėties ir iš esmės nulemia gaunamo produkto kokybę. Todėl būtina žinoti, kokios reakcijos gali vykti tarp metalo ir šlako komponentų, kokia jų kryptis esamomis sąlygomis ir koks gali būti galutinis rezultatas. Tokį vertinimą galima gauti atlikus termodinaminius skaičiavimus, kuriais galima teoriškai nustatyti sąveikos reakcijų kryptį ir galutinį sąveikos reakcijų rezultatą neatliekant specialių bandymų [91].

1.4.3.1. Šlako (fliuso) vaidmuo suvirinant

Suvirinimo medžiagos, turinčios šlakus sudarančių medžiagų, vadinamos fliusais. Fliusai naudojami įvairiuose suvirinimo ir apvirinimo būduose. Fliusas yra būtina medžiaga elektrolankinio suvirinimo ir apvirinimo po fliuso sluoksniu, suvirinimo per fliusą, suvirinimo magnetiniu fliusu, taip pat elektrošlakinio suvirinimo ar apvirinimo technologijų užtikrinimui. Šlakas taip pat susidaro lydantis elektrodų glaistui, miltelinės vielos šerdžiai, oksiduojantis suvirinimo vonelės elektrodiniam metalui suvirinant oksiduojančiojoje atmosferoje ir t.t.

Šlako vaidmuo suvirinant ir apvirinant yra labai didelis. Jo sudėtis lemia lanko atmosferą, nuo kurios priklauso lanko degimo stabilumas, atsparumas porų susidarymui siūlėse, kenksmingų dujų, išsiskiriančių suvirinant, tūris ir santykis. Išsilydžiusio šlako sąveika su suvirinimo vonelės metalu daro didelę įtaką siūlės metalo cheminei sudėčiai, nuo kurios savo ruožtu priklauso jo struktūra ir mechaninės savybės, kristalizacinių (karštųjų) įtrūkų ir porų susidarymo atsparumas.

Svarbiausios šlako funkcijos suvirinant ir apvirinant yra šios:

- suvirinimo proceso stabilumo užtikrinimas;
- geras siūlės formavimasis;
- suvirinimo zonos apsauga nuo oro patekimo;

- defektų susidarymo siūlėse išvengimas;
- siūlės metalo cheminės sudėties valdymas;
- siūlės metalo ir virintinės jungties reikalaujamų mechaninių savybių užtikrinimas;
- šlako luobelės lengvo atsiskyrimo nuo metalo paviršiaus užtikrinimas.

Šlakas taip pat privalo turėti geras sanitarines ir higienines savybes, suvirinimo proceso metu kenksmingų medžiagų išsiskyrimas turi būti minimalus. Be šių bendrų funkcijų, esama ir funkcijų, specifinių kiekvienam suvirinimo būdui.

Elektrolankinio suvirinimo proceso stabilumas visų pirma priklauso nuo lanko degimo stabilumo (pastovumo), t. y. nuo pagrindinių elektrinių lanko parametrų – įtampos ir suvirinimo srovės stiprio – tolydumo laike. Suvirinimo lankas – vienas iš elektrinio išlydžio dujose formų, todėl jo degimo stabilumą, esant visoms kitoms sąlygoms vienodoms, lemia lanko atmosferos sudėtis. Lanko šiluma kaitinant šlaką iš jo išsiskiria dujos ir garai, pakeisdami lanko atmosferos sudėtį. Esant šlake šarminių ir žemės šarminių metalų oksidų (skirtingai nei fluoridų ar chloridų) didėja lanko degimo, o tuo pačiu ir suvirinimo proceso stabilumas.

Siūlės formavimas labiausiai priklauso nuo suvirinimo režimo, t. y. nuo lanko ilgio, jo paslankumo ir t. t.

Išorinį siūlės vaizdą iš esmės nulemia metalo pernešimo tolygumas, priklausantis nuo suvirinimo vonelės būsenos. Suvirinimo vonelės metalo „virimas“ dėl anglies degimo ir ištirpusių dujų išsiskyrimo iš metalo gali stipriai pabloginti išorinį siūlės vaizdą. Dezoksidatorių įvedimas į suvirinimo vonelę „nuramina“ ją ir sudaro palankias sąlygas smulkesnių žvynų susidarymui siūlės paviršiuje. Jei metalo kietėjimo temperatūros intervale šlako klampis per didelis, siūlės rumbelė formuojasi atkurdamą sukietėjusio šlako luobelės formą.

Suvirinimo zonos apsaugai nuo išorinės atmosferos reikia, kad šlakas visiškai dengtų suvirinimo vonelės metalo paviršių. Todėl tarpfaziniai įtempimai šlako sąlytyje su metalu turi būti minimalūs, o šlako klampio kitimas kintant temperatūrai turi būti tolygus. Patikimesnę suvirinimo vonelės metalo apsaugą nuo oro patekimo, taip pat geresnę siūlės paviršiaus formavimosi kokybę užtikrina „ilgi“ šlakai su laipsnišku klampio mažėjimu jiems kietėjant. Blogesni rezultatai gaunami esant „trumpiems“ šlakams, charakterizuojamiems ryškiu klampio pasikeitimu kietėjant. Taip pat būtina, kad šlako kietėjimo temperatūra būtų žemesnė už metalo kietėjimo temperatūrą.

Patiems pavojingiausiems suvirinimo siūlės bei apvirinto sluoksnio defektams priskiriamos poros ir kristalizaciniai įtrūkiai. Pagrindinės porų susidarymo siūlėje priežastys gali būti pagrindinio metalo ir vielos užteršimas rūdimis, tepalais, glaisto (fliuso) drėgmė ir kt. Šlako vaidmuo užkertant kelią porų atsiradimui apima:

- suvirinimo vonelės metalo apsaugą nuo oro patekimo;

- dujų ir garų, mažinančių joje vandenilio ir azoto koncentracijas praskiedžiant dujinę fazę, išskyrimą į lanko atmosferą;
- fluoro junginių, sudarančių su vandeniliu netirpius skystame metale fluoro vandenilio junginius, išskyrimą į lanko atmosferą;
- suvirinimo vonelės metalo oksidavimą.

Šlako garavimo intensyvumas suvirinimo proceso metu yra nedidelis, todėl jis negali stipriai sumažinti azoto ir vandenilio parcialinio slėgio suvirinimo zonoje. Efektyviau veikia dujas sudarančių medžiagų įmaišymas į elektrodo glaisto sudėtį.

Suvirinimo vonelės metalo oksidavimas šlaku ar dujine faze mažina vandenilio tirpumą jame, taip sumažindamas porų atsiradimo siūlės metale galimybę.

Tankioms (be porų) siūlėms gauti svarbią reikšmę turi silicio redukavimosi procesas ir silicio patekimas į suvirinimo vonelės metalą iš kitų šaltinių [91–94].

1.4.3.2. Šlakų fizikinės ir cheminės savybės

Šlakų oksidai tarp savęs sudaro cheminius junginius, kietus bei skystus tirpalus ir mechaninius mišinius (eutektiką). Šlakinių sistemų būseną ir sandarą įvairiose temperatūrose galima nustatyti iš būsenos diagramų, sudaromų taip pat kaip ir metalinėms sistemoms.

Suvirinant šlakai atlieka daug svarbių funkcijų: mechaniškai padengia krintantį skysto metalo lašą, saugo skysto metalo vonelę nuo atmosferos ir t. t. Jie veikia metalą fiziškai ir chemiškai: tirpdo arba suriša FeO ir sulfidus į cheminius junginius, gerina suvirinimo šiluminį režimą (kaitinat šlako fazėje vysta endoterminės, aušinant – egzoterminės reakcijos). Šlakas su stabilizuojančiais komponentais stabilizuoja suvirinimo lanką.

Cheminės šlakų charakteristikos

Suvirinant glaistytaisiais elektrodais, metalas padengiamas šlaku. Jo sudėtis priklauso nuo glaisto arba fliuso, taip pat nuo šlake ir metale vykstančios cheminės reakcijos.

Šlako oksidus galima suskirstyti į dvi pagrindines grupes: rūgštinius ir bazinius. Tačiau yra ir tokių šlako mišinių, kurie turi ir rūgštinių, ir bazinių savybių, t. y. gali reaguoti ir su rūgštiniais, ir su baziniais oksidais. Jie sudaro amfoterinių šlakų grupę. Vadinasi, šlakuose būna trijų grupių oksidų: bazinių (FeO , MnO , CaO , MgO , Na_2O , K_2O), rūgštinių (SiO_2 , P_2O_5 , Cr_2O_3 , WO_3 , V_2O_5 , MoO_3) ir amfoterinių (Al_2O_3 , Fe_2O_3).

Dažnai šlake būna šių junginių: silikatų ($(FeO)_2 \cdot SiO_2$, $(MnO)_2 \cdot SiO_2$, $CaO \cdot SiO_2$, SiO_2 ir kt.), fosfatų ($(FeO)_3 \cdot P_2O_5$, $(MnO)_3 \cdot P_2O_5$, $(CaO)_3 \cdot P_2O_5$, $(MgO)_3 \cdot P_2O_5$ ir kt.), aluminatų ($FeO \cdot Al_2O_3$, $CaO \cdot Al_2O_3$, $MgO \cdot Al_2O_3$ ir kt.),

feritų ($CaO \cdot Fe_2O_3$, $CaO \cdot nFe_2O_3$, $(CaO)_m \cdot Fe_2O_3$ ir kt.).

Šlako rūgštingumą arba baziškumą apibūdina jame esančių bazinių ir rūgštinių oksidų santykis. Baziškumas – bazinių oksidų sumos santykis su rūgštiniais.

$$Baziškumas = \frac{\sum bazinių}{\sum rūgštinių}. \quad (1.3)$$

Rūgštingumas – baziškumui atvirkščias dydis:

$$Rūgštingumas = \frac{\sum rūgštinių}{\sum bazinių}. \quad (1.4)$$

Metallurgijoje šlakas vadinamas baziniu, kai jo baziškumas didesnis nei 1,5. Mažesnio baziškumo šlakas vadinamas silpnu rūgštiniu.

Pagrindinės šlako savybės, turinčios daug įtakos metallurginiams suvirinimo procesams, yra šios:

- 1) šiluminės konstantos: suminkštėjimo ir lydymosi temperatūra, oksidų susidarymo šiluma, šiluminė talpa;
- 2) klampis, jo priklausomybė nuo temperatūros ir šlako sudėties;
- 3) skysto šlako specifinis svoris;
- 4) gebėjimas ištirpdyti metalus, sulfidus ir kitus junginius;
- 5) ilgėjimo (linijinio plėtimosi) koeficientas ir kitos kieto šlako savybės, nuo kurių priklauso šlako atsiskyrimas nuo prilydyto metalo;
- 6) šlako baziškumas ir komponentų savybės, nuo kurių priklauso šlako gebėjimas sudaryti junginius ir disocijuoti.

Aušdamas šlakas linkęs peršalti, nes skystas yra labai klampus. Kai klampis didelis, atomams sunkiau persigrupuoti, taigi ir pasiekti pusiausvyros būseną. Įvairių šlakų polinkis peršalti yra skirtingas. Ypač linkę peršalti ir perkaisti silikatai, nes skysti jie yra labai klampūs. Rūgštiniai šlakai, kuriuose yra 50 % SiO_2 , stingdami sudaro stiklišką amorfinę masę. Šie šlakai labai klampūs, todėl aušimo kreivės kritiniai taškai neaiškūs. Baziniai šlakai, kuriuose SiO_2 yra 50 % ir mažiau, skysti yra mažiau klampūs ir aušdami gerai kristalizuojasi.

Šlakai pagal lūžį sudaro keturias grupes:

- 1-osios grupės šlakai stikliški, jų lūžis vienalytis, blizgantis, lygus;
- 2-osios grupės šlakai emališki arba porcelianiški, lūžis matinis, yra šiek tiek kristalų;
- 3-iosios grupės šlakų lūžis akmeniškasis, smulkiakristalis, stiklo jame mažai;
- 4-osios grupės šlakų lūžis stambiakristalis, susidedantis iš stambių, aiškiai matomų kristalų.

Iš sustingusio šlako lūžio galima spręsti apie skysto šlako klampį. Pavyzdžiui, jei lūžis stikliškas, skysti šlakai yra labai klampūs. Jų klampis mažėja

pereinant iš stikliškos į stambiakristalę būseną.

Iš šlako spalvos galima apytiksliai spėti apie jo sudėtį: rusva arba juoda šlako spalva rodo, kad jame daug geležies oksidų, šviesiai žalia – silicio oksidų, žydra – mangano oksidų, balta – kalcio oksidų.

Suvirinimui svarbi šlakų savybė yra jų gebėjimas sukibti su metalu. Šlakai lengvai atsiskiria nuo siūlės tada, kai yra silpnai su ja sukibę. Šlakų ir metalo sukibimas priklauso nuo šlakų dezoksidacijos laipsnio. Prastai dezoksiduoti šlakai sudaro su metalu tarpinį sluoksnį, tvirtai juodu sukabinantį. Vadinasi, tik gerai dezoksiduotas šlakas gerai atsiskiria nuo metalo.

Labai svarbus dalykas – šlakų klampis: kuo mažesnis klampis, tuo judresnis, chemiškai ir fiziškai aktyvesnis šlakas (aktyviau vyksta cheminės reakcijos ir fizikiniai tirpimo procesai). Taigi kuo mažesnis šlako klampis, tuo geresnės jo dezoksidacinės savybės.

Jei šlakas pernelyg skystas, jis nuteka nuo siūlės ir apnuogina jos paviršių, t. y. susilpnėja jo apsauginis veikimas. Šis reiškinys svarbus tuomet, kai suvirinamos lubinės ir vertikaliosios siūlės. Kad būtų chemiškai aktyvus ir gerai apsaugotų siūlę, šlakas turi būti atitinkamo klampio. Horizontalioms siūlėms reikia naudoti nelabai klampus šlakus, o vertikalioms ir lubinėms – labai klampus; be to, pageidautina, kad šlakai kuo greičiau sukietėtų. Baziniai šlakai vadinami trumpaisiais, nes aušdami darosi klampūs siaurame temperatūrų intervale. Rūgštiniai šlakai vadinami ilgaisiais, nes skysti yra nelabai klampūs. Apie šlakų klampio kitimą sprendžiame iš kietumo diagramų. Jos sudaromos panašiai kaip binarinės arba trigubos būsenos diagramos, tik vietoj kritinių taškų atidedamas atitinkamos temperatūros šlakų klampis [91–98].

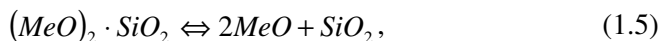
1.4.3.3. Šlakų junginių susidarymas ir disociacija

Pažymėtini keturi šlakų junginių susidarymo ir disociacijos atvejai:

1. Oksidų junginiai lydantis šlakui nesikeičia ir nedisocijuoja, t. y. vienas iš dviejų oksidų sudaro cheminį junginį, o kito likutis laisvas.

2. Išsilydęs šlakas sudaro laisvųjų oksidų tirpalą. Jame nėra kompleksinių cheminių junginių: jie atsiranda tik šlakui kietėjant. Kitaip tariant, visi šlaką sudarantys junginiai disocijuoja ir sudaro laisvuosius oksidus.

3. Šlakui lydantis, cheminiai junginiai disocijuoja, bet ne iki galo, t. y. vyksta grįžtamoji reakcija:

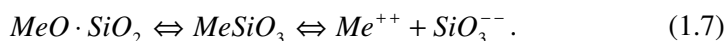


kurios pusiausvyros konstanta

$$K_c = \frac{(MeO)^2 \cdot (SiO_2)}{(MeO)_2 SiO_2}. \quad (1.6)$$

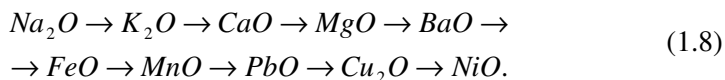
Pusiausvyros konstanta ir disociacija didėja kylant temperatūrai, taigi šlake didėja laisvųjų oksidų koncentracija.

4. Šlakus, kaip ir druskų lydinius, galima įsivaizduoti daugiau ar mažiau disocijavusius į jonus. Silikatas $MeO \cdot SiO_2$ disocijuoja į jonus Me^{++} ir SiO_3^{--} pagal lygtį



Šią teoriją patvirtina tai, kad išlydytas šlakas yra laidus elektrai; be to, jame vyksta elektrolizė, ir ant katodo išsiskiria grynas metalas.

Sudarant šlakų sistemą svarbu žinoti, kurie oksidai – rūgštiniai ar baziniai – lengviau sudaro junginius. Oksidų tarpusavio cheminį giminingumą apibūdina maksimalus reakcijos darbas, t. y. laisvosios energijos kitimas: kuo intensyviau keičiasi laisvoji energija (laisvosios energijos mažėjimo kryptimi), tuo aktyviau jie reaguoja. Atsižvelgiant į oksidų cheminį giminingumą rūgštiniam oksidui SiO_2 , bazinius oksidus galima išdėstyti pagal giminingumo SiO_2 mažėjimą:



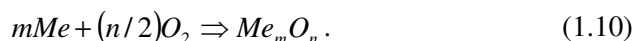
Vadinasi, jeigu į šlaką, kuriame yra FeO , įvesime oksidų, esančių šioje eilėje prieš FeO , tai šie oksidai išstums FeO iš silikatų ir padidins jo koncentraciją šlake. Cheminis giminingumas taip pat priklauso nuo oksido koncentracijos ir temperatūros, be to, cheminės reakcijos paprastai nevyksta iki galo, t. y. tol, kol vienas iš reagentų išnyksta, bet iki tam tikros ribos, kurią nusako pusiausvyros sąlygos: kuo didesnė laisvojo oksido koncentracija šlake, tuo intensyviau susidaro junginiai. Taigi ne tik stiprūs baziniai oksidai gali išstumti silpnus, bet ir atvirkščiai, jeigu pastarųjų koncentracija yra pakankama. Kuo didesnė silpno bazinio oksido koncentracija, tuo daugiau jis išstums stipresnių oksidų. Pagal cheminį giminingumą baziniams oksidams rūgštinius oksidus galima išdėstyti cheminio giminingumo mažėjimo tvarka šitaip:



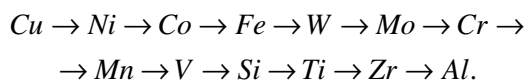
Vadinasi, norint, kad į metalą nepakliūtų FeO , kuris gali būti išstumtas iš šlako, į elektrodo glaistą būtina įdėti dezoksidatorių, galinčių paveikti FeO .

1.4.4. Metalų oksidacija

Lydant metalus ir lydinius, suvirinimo vonelės reakcijos zonoje vysta tokie procesai. Suvirinant plienus, lanke oksiduojasi geležis ir kiti elementai:



Kuo aktyviau oksiduojasi legiruojantysis elementas suvirinimo vonelėje, tuo mažiau jį įsisavina siūlės metalas. Todėl norint nustatyti kiekvieno elemento elgseną suvirinimo vonelėje, būtina žinoti jų cheminį giminingumą deguoniui. Esant kitoms sąlygoms vienodoms (koncentracijai, temperatūrai, šlako ir dujinės fazės sudėčiai), pagal šio giminingumo didėjimo eilę dažniausiai pliene esančius elementus galima surikiuoti taip (esant temperatūrai iki 1600 °C):



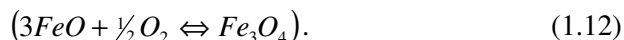
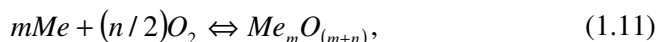
Suvirinimo metu elementus, esančius į kairę nuo geležies, beveik visiškai įsisavina suvirinimo vonelė. Tačiau, įmaišius minėtus elementus į elektrodų glaistą, galimi jų nuostoliai jiems oksiduojantis maišymo ar kaitinimo metu. Suvirinimo metu jie redukuojasi iš oksidų.

Volframo ir molibdeno, esančių prie geležies dešinėje, irgi pakankamai daug patenka į suvirinimo vonelę. Visi kiti elementai smarkiai oksiduojasi, ir tuo aktyviau, kuo toliau į dešinę yra nuo geležies. Todėl, esant oksiduojančioms sąlygoms, gana sudėtinga legiruoti suvirinimo vonelę tokiais ypatingai aktyviais elementais kaip titanas ir aliuminis. Lengvai besioksiduojančius elementus suvirinimo vonelė įsisavina tik stipriai sumažinus oksidacines sąlygas.

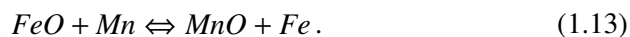
Esant kitoms sąlygoms vienodoms, įvestas į suvirinimo vonelę labiau giminingas deguoniui elementas saugos nuo aktyvaus oksidavimosi kitus, mažiau aktyvius, elementus. Pavyzdžiui, didesniai titano perėjimui į siūlės metalą į suvirinimo zoną tikslinga įvesti cirkonio arba aliuminio.

Greičiau oksiduojasi tie elementai, kurių didesnis cheminis giminingumas deguoniui. Kiti elementai beveik nesioksiduoja arba oksiduojasi labai lėtai. Lanko stulpelė galimos ir dezoksidacijos reakcijos, bet jų tikimybė maža.

Atmosferos ir šlako fazių skiriamajame paviršiuje oksidacija gali pereiti iš nevisiškos į visišką, t. y. žemesnieji oksidai gali virsti aukštesniaisiais, todėl šlake padaugėja deguonies:



Suvirinimo vonelėje gali vykti dezoksidacija. Kai pliene yra elementų, chemiškai giminingesnių deguoniui už geležį, vyksta pakeitimo reakcijos, ir išskiriama gryna geležis:



1.4.4.1. Oksidacija dujomis

Išlydytas metalas yra supamas dujų, kai suvirinimui naudojamos

specialiosios dujos (argonas, helis, azotas, vandenilis, anglies dioksidas) arba disocijuojasi glaisto ar fliuso sudėtinės dalys. Taip pat jos metalą gaubia, kai suvirinama dujomis, t. y. kai kuras deguonyje dega.

Dujos pagal oksidacines savybes skirstomos į tris grupes:

- 1) H , He , N . Šiose dujose gali būti šimtosios dalys deguonies;
- 2) vandenilio, vandens garų, anglies monoksido, anglies dioksido, azoto mišiniai;
- 3) anglies dioksidas.

Šių dujų oksidacines savybes nustatome, lygindami jose esančio deguonies parcialinį slėgį su dioksidų disociacijos tamprumu. Apskaičiuota, kad deguonies parcialinis slėgis 3000 K temperatūroje yra: 1-osios grupės dujų – 0,00003 at, 2-osios grupės – 0,000027 at, 3-osios grupės – 0,21 at.

Matome, kad 1-osios ir 2-osios grupės dujos yra silpni oksidatoriai, o 3-osios grupės dujų oksidacinės savybės tokios pačios kaip ir atmosferos. 1-osios ir 2-osios grupės oksidacinės savybės yra geresnės, nes suvirinant deguonis įsiurbiamas iš aplinkos. Tačiau šių grupių dujos yra apsauginės: jų oksidacinės savybės daug kartų prastesnės už atmosferos [92–95].

1.4.4.2. Oksidacija šlakais

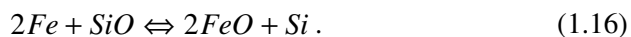
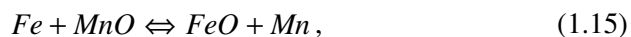
Norint apsaugoti metalą nuo atmosferos ir apdoroti metalurgiškai, suvirinama po šlaku, susidarančiu lydantis fliusui ar elektrodo glaistui. Šlakas tam tikromis sąlygomis gali oksiduoti metalą. Metalas oksiduojasi dėl dviejų priežasčių:

- 1) elementai pasiskirsto tarp šlako ir metalo. Pagal pasiskirstymo dėsni santykis tarp medžiagų dviejuose nesusimaišančiuose skysčiuose pastovioje temperatūroje yra pastovus dydis. Kadangi geležies oksidas (FeO) tirpsta ir metale, tai pagal pasiskirstymo dėsni

$$L = \frac{FeO}{(FeO)}. \quad (1.14)$$

Iš lygties matyti, kad pastovioje temperatūroje, didėjant FeO kiekiui šlake, metalas oksiduojasi;

- 2) suvirinimo temperatūroje tarp geležies ir kitų metalų oksidų, esančių šlake, vyksta tokios reakcijos:



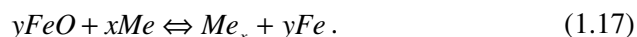
Šių reakcijų pusiausvyros sąlygos pastovioje temperatūroje pirmiausia priklauso nuo elementų, FeO koncentracijos metale ir šlako sudėties. Kai pliene

mažai Mn , Si ir O_2 , o šlake MnO ir SiO_2 daug, Mn ir Si dezoksiduojasi, taigi plienas prisisotina deguonies. Šis procesas intensyvėja, kylant temperatūrai, nes metale didėja pusiausviroji Si , Mn ir O_2 koncentracija [92–98, 101–109].

1.4.5. Metalų dezoksidacija

Dezoksidacijos tikslas – iš metalo ar lydinio pašalinti deguonį. Yra du dezoksidacijos etapai:

- 1) dezoksiduoja geležies oksidas, jungiantis oksido deguoniui su dezoksidatoriumi, t. y. susidarant naujam oksidui, turinčiam mažesnę disociacijos tamprumą;
- 2) blogai tirpstantys arba visai netirpstantys skystame metale oksidai pašalinami, kai jie išskyla į jo paviršių. Kad dezoksidatorius būtų efektyvesnis, reikia parinkti tokius elementus, kurie chemiškai giminingesni deguoniui ir todėl prisijungia daug deguonies. Geležies oksido ir dezoksidatoriaus sąveikos bendrąją lygtį galima užrašyti šitaip:



Plieno grynumas priklauso ne tik nuo FeO dezoksidacijos, bet ir nuo dezoksidacijos produktų pašalinimo iš jo. Vadinasi, metalų dezoksidacija taip pat priklauso nuo jos reakcijos produktų.

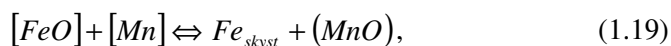
Dezoksidaciją galima reguliuoti ir keičiant temperatūrą.

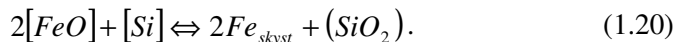
Didelę reikšmę dezoksidacijai turi šlakų fizikinės ir cheminės savybės, nes šlakas turi absorbuoti iš skystos vonelės kylančius oksidus, taip pat jis gali tiekti dezoksiduojančias medžiagas. Taigi, norint nustatyti optimalią dezoksidaciją, reikia įvertinti labai daug veiksnių.

Elementų dezoksidacines savybes galima nustatyti grafiškai. Grafikais išreiškiama tų elementų oksidų disociacijos tamprumo priklausomybė nuo jų koncentracijos skystame metale [92–94].

Daugelio elementų cheminis giminingumas deguoniui yra didesnis už geležies cheminį giminingumą jam, todėl šie elementai gali būti dezoksidatoriai. Kai kurių cheminių junginių lydymosi temperatūra yra aukšta: Al_2O_3 – 2020 °C, TiO – 1850 °C, SiO_2 – 1713 °C, MnO – 1785 °C, Cr_2O_3 – 2280 °C. Suvirinimo vonelėje šie oksidai yra kieti, todėl gana sunku juos pašalinti iš metalo.

Anglių plienų dezoksidacijai didelę reikšmę turi tokios reakcijos:





Šiuose plienuose nemažai C , Si ir Mn , todėl, esant tam tikram Si ir Mn santykiui, vyksta reakcija tarp MnO ir SiO_2 , ir susidaro silikatai, kurių lydymosi temperatūra žemesnė negu plieno. Skystais silikatais išvalomi iš metalo nemetaliniai intarpai, o šlakas juos sugeria. Nemetalinių intarpų sugeriamumas priklauso nuo šlako klampio ir gebėjimo sudaryti junginius. Kuo mažesnis šlako klampis, tuo geriau jis absorbuoja nemetalinius interpus. Dažnai dezoksidacijos produktai yra rūgštiniai oksidai, pavyzdžiui, SiO_2 , TiO_2 , arba amfoteriniai – Al_2O_3 . Jie geriau absorbuojasi baziniuose šlakuose ir sudaro kompleksinius junginius:



Nuo plienų dezoksiduojančiųjų elementų priklauso, kokios dezoksidacinės medžiagos susidaro: kietos, skystos ar dujinės. Jos veikia siūlės metalo kokybę.

1.4.6. Siūlės metalo legiravimo būdai apvirinant glaistytaisiais elektrodais

Legiravimo būdas per suvirinimo vielą – vienas iš patikimiausių prilydyto metalo legiravimo būdų, kuriuo gaunami stabilūs rezultatai apvirinant legiruotus plienus. Šiuo atveju legiruojantieji elementai (priedai) gali būti elektrodo strypelio metalo sudėtyje arba įdedami metalo miltelių pavidalu į vamzdelinio skerspjūvio vielos (miltelinės vielos) vidų. Pastarasis būdas plačiai paplitęs mechanizuotame apvirinime, taip pat ir po fluso sluoksniu.

Legiravimas per elektrodo strypelį – pakankamai paprastas ir efektyvus būdas. Deja, ne visada gali pavykti parinkti reikiamos sudėties vielą, todėl plačiai naudojami kiti legiravimo būdai.

Legiravimo būdą per pagrindinio metalo išlydymą galima naudoti apvirinant specialiuosius plienus ir lydinius tais atvejais, kai apvirinimo režimais galima užtikrinti gilų apvirinamo metalo pralydymą, pavyzdžiui, apvirinant trumpu lanku, ypač plonus lakštus.

Legiravimas per elektrodų glaistą būdingas apvirinant glaistytaisiais elektrodais. Apvirinant lankiniu būdu ir naudojant mažaanglę vielą, šiuo būdu galima gauti legiruotųjų plienų suvirinimo siūlę arba atsparius dilimui ar įrankinius lydinius (specialūs apvirinimo elektrodai).

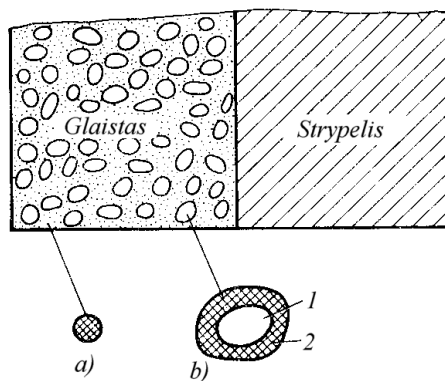
Kaip legiruojantys priedai daugiausiai naudojami įvairūs milteliniai metalurginiai pusgaminiai. Tokie milteliai įdedami su kitais komponentais į elektrodų glaisto mišinį maišymo metu.

Daugeliu atvejų papildomos metalinės medžiagos suvirinimo vonelės egzistavimo periodu turi tolygiai pasiskirstyti tūryje. Kartais šis procesas

prasideda lašuose ir tęsiasi suvirinimo vonelėje. Jei tie priedai yra dezoksidatoriai, tai vienodas pasiskirstymas suvirinimo vonelėje, kad būtų užtikrintas dezoksidavimo procesas, nėra būtinas. Jie gali atlikti ir prevencinius veiksmus, surišdami deguonį dar elektrodinio metalo lašuose.

Metaliniais milteliais, įmaišomiems į elektrodų glaistą, keliami ypatingi reikalavimai jų grūdelių matmenims. Pavyzdžiui, jei įmaišomi metaliniai milteliai skirti atlikti dezoksidavimo funkciją, tai reikia didinti tokio priedo sąveikos su deguonimi paviršių. Tai pasiekama naudojant dispersiškesnius metalų miltelius. Jei metalų milteliai atlieka legiruojančio komponento funkciją, tai siekiant sumažinti jo nuostolius oksidavimesi, tikslinga naudoti didesnės granulometrinės sudėties miltelius.

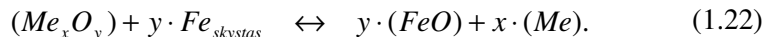
Tačiau perdėtas miltelių grūdelių matmenų didinimas gali apsunkinti elektrodų gamybą, pabloginti jų technologines charakteristikas. Perdėtas dezoksidatorių dalelių mažinimas gali labai pakenkti jų pagrindinei funkcijai, nes tokie dispersiški milteliai oksiduojasi dar elektrodų gamybos metu (1.5 pav.). Todėl glaistytųjų elektrodų gamybos technologiniame procese atsižvelgiama į minėtus veiksnius, nustatant miltelinių komponentų granulometrinės sudėties reikalavimus.



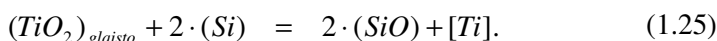
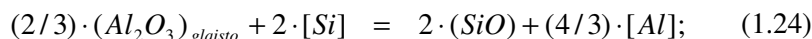
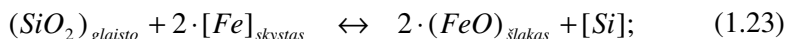
1.5 pav. Įvairių matmenų glaisto dalelių oksidavimosi laipsnis jų sąveikoje su aktyviais oksidatoriais:

a – smulkios granulės; b – stambios granulės; 1 – neoksiduota dalelės (granulės) dalis; 2 – paviršinis dalelės oksiduotas sluoksnis

Legiravimo būdas per šlaką sudarančius glaisto komponentus nesunkiai panaudojamas elementams, turintiems mažesnę giminingumą deguoniui, kaip geležis (varis, nikelis, volframas, molibdenas), ir ribotai panaudojamas tokiems aktyviems elementams, kaip chromas, manganas, silicis ir kiti, kurie oksiduojasi pagal reakciją.



Galimi ir (2.23), (2.24) ir (2.25) reakcijų tipai.



Išnagrinėtas legiravimo būdas turi esminį trūkumą, nes vyksta neišvengiamas suvirinimo vonelės elementų oksidavimas ir jos išotinis minėtų reakcijų produktais.

Šis legiravimo būdas plačiai paplitęs mechanizuotame apvirinime po lydžiaisiais flusais, kur kiti legiravimo būdai gali būti taikomi ribotai [92–94].

1.4.7. Glaistytieji elektrodai su padidintu legiruojančiųjų elementų kiekiu glaiste

Aukštą elektrodų, skirtų gausiai legiruotiems plienams suvirinti ir apvirinti, savikainą visų pirma lemia būtinybė naudoti elektrodinius strypus iš brangių elektrodinių vielų. Medžiagų šių elektrodų gamybai išlaidų analizė rodo, kad išlaidos elektrodiniams strypams gali sudaryti iki 85 % bendros išlaidų sumos. Todėl pigesnių, ekonomiškai legiruotų vielų panaudojimas siūlės (arba prilydomą) metalą legiruojant per glaistą leidžia gerokai sumažinti gaminamų elektrodų savikainą. Taip pat elektrodai, pagaminti naudojant „atpigintus“ mažiau legiruoto plieno strypus, turi kompleksą privalumų:

- mažesnė mažai legiruoto strypo elektros varža leidžia gaminti ilgesnius elektrodus, eikvoti mažiau laiko keičiant elektrodus, sumažinti elektrodų degenų skaičių suvirinant ir apvirinant;
- sunkesnis, lyginant su baziniu variantu, elektrodas su metaliniais komponentais glaiste leidžia žymiai (apie 1,4–1,5 karto) padidinti suvirinimo ir apvirinimo našumą;
- galimybė naudoti aukštesnę suvirinimo ar apvirinimo srovę užtikrina didelį pralaidumo gylį, ypač virinant šaknines siūles;
- galimybė virinti forsuotais režimais (suvirinimo ar apvirinimo srovės stiprio I_{suv} ir suvirinimo ar apvirinimo greičio v_{suv} reikšmių padidinimas) pagerina suvirinamų (apvirinamų) konstrukcijų deformacinį atsparumą.

Šie elektrodai gali būti panaudojami įvairiose pramonės šakose.

Akivaizdu, kad elektrodų su padidintu legiruojančiųjų elementų kiekiu glaiste naudojimas apvirinant bei suvirinant gausiai legiruotus plienus yra ekonomiškai tikslingas ir daugeliu atvejų, lyginant su tradiciniais elektrodais, leidžia pasiekti ne tik ekonominį, bet ir ženklų technologinį efektą [95].

1.5. Apibendrinimas. Uždavinių formulavimas

1. Žemės dirbimo, kalnakasybos, malūnų, kelių mašinų ir kitų įrenginių spartaus darbo resurso mažėjimo priežastis – intensyvus abrazyvinis dilimas.

2. Įrenginių darbo resurso atstatymui ar ilgesniam pradinio darbo resurso kūrimui efektyviausia priemonė yra abrazyvinės trinties veikiamų mašinų elementų apvirinimas atspariu abrazyviniam dilimui sluoksniu.

3. Rinkoje yra platus elektrodų, skirtų dilimui atsparių paviršių sudarymui, pasirinkimas, tačiau šie elektrodai labai brangūs. Rinkos analizė rodo, kad yra didelė pigesnių apvirinimo elektrodų paklausa.

4. Siekiant užpildyti šią nišą būtina mokslinių tyrimų pagrindu, panaudojant kiek galima daugiau vietinių žaliavų, sukurti gerų technologinių savybių pigesnius glaistytuosius elektrodus, skirtus aukšto abrazyvinio atsparumo paviršinių sluoksnių sudarymui.

5. Išnagrinėjus visus dilimui matuoti metodus, matyti, kad nė vienas iš jų nėra universalus, todėl neįmanoma mechaniškai perkelti literatūros šaltinių dilimo vertinimo duomenų ir juos palyginti su naujai sukurtų medžiagų atsparumo dilimui galimybėmis, nežiūrint mechanizmo konstrukcijos, geometrinės formos, matmenų ir detalių judėjimo kinematikos. Kaskart reikia parinkti, o kartais ir sukurti tinkamiausią metodą, matavimo aparatūrą ir įrenginius. Abrazyvinis dilimas yra pagrindinė dilimo rūšis, dėl kurio poveikio gaunami didžiausi energijos ir metalo nuostoliai.

6. Elektrodų su padidintų legiruojančiųjų elementų kiekiu glaiste panaudojimas apvirinant specialių savybių lydinio yra ekonomiškai tikslingas, nes leidžia sumažinti elektrodo savikainą ir gauti ženklų technologinį efektą.

Elektrodo glaisto sudarymo ir eksperimentinių tyrimų metodika

2.1. Elektrodo glaisto sudarymas

Legiruojančių cheminių elementų yra ir metaliniame elektrodo strypelyje, ir elektrodo glaiste.

Suminis kiekvieno cheminio elemento kiekis elektrode apskaičiuojamas:

$$[Me] = a[Me]_a + b[Me]_b, \% \quad (2.1)$$

čia a – vielos dalis elektrode; $[Me]_a$ – cheminio elemento kiekis vieloje, %; b – glaisto dalis elektrode; $[Me]_b$ – cheminio elemento kiekis glaiste, %.

Glaisto ir vielos santykis elektrode nusakomas glaisto masės koeficientu:

$$K_{gm} = \frac{m_{gl}}{m_v} \cdot 100, \% \quad (2.2)$$

čia m_{gl} – glaisto masė, g; m_v – vielos masė, g.

Legiruojančių elementų perėjimo koeficientas priklauso nuo legiruojančio elemento fizikinių ir cheminių savybių, elementų išdegimo, skysto metalo ištaškymo, kitų technologinių veiksnių. Praktikoje naudojamos eksperimentais gautomis orientacinėmis vidutinėmis elementų perėjimo koeficientų reikšmėmis. Šiomis reikšmėmis galima naudotis tik tada, kai eksperimentinių ir technologinių

siūlių metalo legiravimo sąlygos tokios pačios, nesikeičia ir glaisto baziškumo indeksas.

Elektrodų glaisto sudarymo algoritmas pateiktas A1 priede. Skaičiavimai atliekami panaudojant *Microsoft Excel* skaičiuoklę, kurios lango pavyzdys pateiktas A2 priede. Į skaičiuoklę suvedamos legiruojančiųjų glaisto komponentų ir vielos cheminės sudėtys.

Sudarant elektrodų glaistus, visų pirma turi būti žinoma kuriamo elektrodo paskirtis. Pasinaudojus literatūroje aprašytais atliktų bandymų rezultatais, išnagrinėjama reikalinga prilydyto metalo cheminė sudėtis, kuri tinkamiausia kuriamo elektrodo paskirčiai, išnagrinėjama tinkamiausia legiravimo sistema ir legiravimo būdas numatytai cheminei sudėčiai pasiekti.

Toliau, turint tikslą sukurti numatytos paskirties elektrodą, pasirenkama jau žinoma ar sudaroma nauja šlako sistema. Disertacinio darbo tikslas – panaudoti Lietuvoje turimas žaliavas.

Nustatomi elektrodų gamybos technologiniai parametrai:

- reikalingas šlaką sudarančių medžiagų mišinio kiekis;
- reikalingas skysto stiklo kiekis, glaisto medžiagų surišimui,
- parenkami įprasti ar sudaromi nauji elektrodų džiovinimo režimai ir kt.

Jei reikia, nustatomi legiruojančiųjų elementų perėjimo iš elektrodo į prilydomą metalą dėsningumai.

Nustatomos elektrodais prilydyto metalo savybės.

Optimizuojama prilydyto metalo cheminė sudėtis.

Jei reikia, pakoreguojamos sukurtų elektrodų virinimo technologinės savybės.

Elektrodo sudedamųjų dalių schema pateikta 2.1 paveiksle.

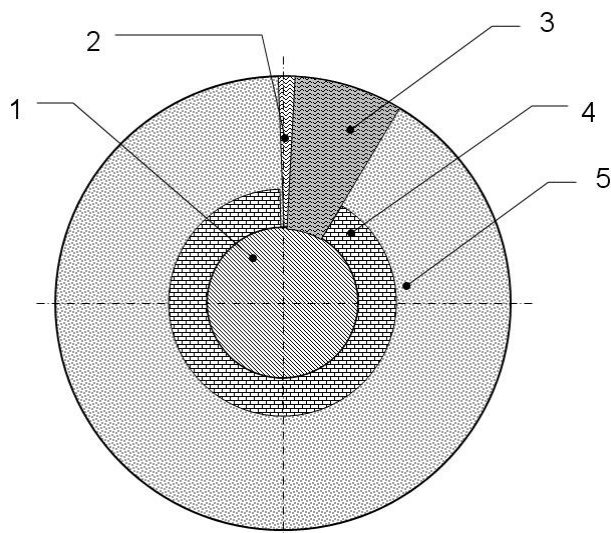
Elektrodo glaistą sudaro organinės medžiagos (2), skysto stiklo sausas likutis (3), šlaką sudarančių medžiagų mišinys (4) ir dezoksiduojančiųjų bei legiruojančiųjų prilydomą metalą medžiagų mišinys (5).

Organinės medžiagos sudaro pastovią miltelinių glaisto komponentų (2+4+5) masės dalį (t. y. 1 %) visiems eksperimentiniams elektrodams.

Skysto stiklo sausas likutis sudaro pastovią visų glaisto komponentų (2+3+4+5) masės dalį (t. y. 7 %) visiems gamintiems eksperimentiniams elektrodams.

Šlaką sudarančių medžiagų mišinio (4) kiekis visiems gaminamiems eksperimentiniams elektrodams yra pastovus vielos (1) kiekio atžvilgiu ($m_{\text{šlak}} / m_{\text{viela}} = \text{const}$).

Legiruojančiųjų cheminių elementų procentinis kiekis esantis vieloje ir glaiste yra vienodas visiems gaminamiems eksperimentiniams elektrodams, išskyrus vieną elementą, kurio įtaką kitų elementų įsisavinimui ir apvirinto sluoksnio savybėms siekiama nustatyti.



2.1 pav. Elektrodo sudedamųjų dalių schema:

1 – elektrodo metalinė šerdis (viela); 2 – organinės medžiagos (celiuliozė); 3 – skysto stiklo sausas likutis; 4 – šlaką sudarančių medžiagų mišinys; 5 – dezoksiduojančiųjų bei legiruojančiųjų prilydomą metalą medžiagų mišinys

2.2. Optinės emisijos spektrometrija

Gryno prilydyto metalo ir apvirintų sluoksnių cheminė sudėtis nustatyta UAB „Anykščių varis“ spektriniu analizatoriumi Belec compact lab. (Belec Spektrometrie Opto-Elektronik GmbH).

Optiniai emisiniai spektrometrai per keletą sekundžių įgalina nustatyti iki 70 cheminių elementų kiekį metaluose.

Stacionariame spektrometre sumontuotas stovas ant kurio stalelio uždedamas tiriamasis bandinys. Bandinys turi turėti gerai nušlifuotą plokščią paviršiaus ruožą, kuris turi pilnai už dengti stalelyje esančią kiaurymę, kad iškrovos metu į prapučiamą argonu kamerą nepatektų oro.

2.3. Rentgeno spindulių difrakcijos eksperimentas

Rentgeno spinduliuotės difrakcinė analizė atlikta bendros paskirties rentgeno difraktometru DPOH-YM1. Rentgeno spinduliuotės $\text{CuK}_{\alpha 1, \alpha 2}$ spektrui išskirti naudotas grafito monochromatorius (difrakcijos plokštuma $d_{(002)} = 0,3352 \text{ nm}$), kuris panaikina foną, atsirandantį dėl nekoherentinės rentgeno spinduliuotės sklaidos plyšiuose ir bandinio laikiklyje, bei panaikina fluorescencinę spinduliuotę. Tai ypač svarbu tiriant CuK_{α} spinduliuote geležies junginius. Difrakcinės kreivės buvo užrašomos, detektoriumi judant $1^\circ/\text{s}$ greičiu, intensyvumą matuojant kas $0,02^\circ$. Karbidinių fazių identifikavimui panaudota PDF-2 duomenų bazė.

Įprastinis difrakcijos spektras susideda iš kreivės, kurioje pavaizduotas atsispindėjusių spindulių intensyvumo priklausomybė nuo detektoriaus kampo.

2.4. Mikroskopijos tyrimai

Apvirintų sluoksnių mikrostruktūros tyrimai atlikti:

1) nuskaitančiosios elektroninės mikroskopijos metodu. Taikytas elektroninis mikroskopas JSM 5600, kurio skiriamoji geba $3,5 \text{ nm}$, greitinančioji įtampa 30 kV ;

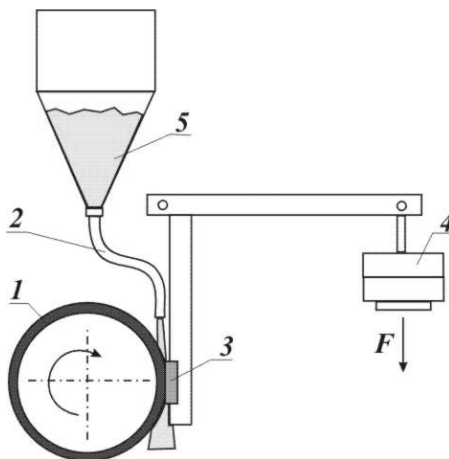
2) optinės mikroskopijos metodu. Tyrimai atlikti optiniu mikroskopu „Olympus“ su videokamera Sony DXC-151 AP ir NIH Image 1.61 kompiuterine programa.

Mikrošlifai pagaminti iš panaudotų dilimo bandinių.

2.5. Abrazyvinio dilimo bandymas

Plačiai naudojamas abrazyvinio dilimo vertinimo metodų reglamentuojamas standartu ASTM G65. Šiuo standartu reglamentuojamos mašinos principinė schema pateikta 2.2 paveiksle. Pagal šį standartą darbo rato medžiaga parenkama adekvati modeliujamai trinties porai (duotu atveju 58–62 HS kietio guma), apkrova F keičiama nuo 45 iki 130 N , darbo ratas sukamas 200 min^{-1} ($v = 2,4 \text{ m/s}$). Dilimas intensyvinamas $250\text{--}300 \text{ g/min}$ debitu į trinties paviršių tiekiant $200\text{--}425 \text{ }\mu\text{m}$ frakcijos kvarcinį smėlį.

Naudoti darbo režimai: apkrova 130 N , tyrimo trukmė 20 min , dilimo kelias 2890 m . Abrazyvas – $0,2\text{--}0,425 \text{ mm}$ frakcijos AB „Anykščių kvarcas“ kvarcinis smėlis. Atsparumo dilimui etalonu (vienetu) panaudotas grūdintas boru mikrolegiruotas plienas 38MnB5 (C $0,39 \%$, Si $0,17 \%$, Mn $1,26 \%$, Cr $0,19 \%$, B $0,002 \%$), 52 HRC. Nudilimas tyrime $0,1796 \text{ g}$.



2.2 pav. Abrazyvinio dilimo bandymo (pagal ASTM G65) įrenginio principinė schema: 1 –guma dengtas ratas; 2 – abrazyvo tiekimo kanalas; 3 –bandinys; 4 – apkrova; 5 – kvarcinis smėlis

Atsparumo dilimui koeficientas ε (santykiniais vienetais) apskaičiuojamas kaip plieno I_{38MnB5} ir apvirinto sluoksnio $I_{COATING}$ santykis:

$$\varepsilon = I_{38MnB5} / I_{COATING} \cdot \quad (2.3)$$

Nudilimas nustatytas sveriant analitinėmis svarstyklėmis SCALTEC SBC 32 (0,1 mg tikslumu).

Mėginių kietis matuotas kietmačiu TK-2M (HRC skalė).

2.6. Elektrodo technologinių savybių vertinimas

Elektrodų virinimo technologinių savybių vertinimui naudojami standartiniai glaistytųjų elektrodų virinimo technologinių savybių vertinimo bandymai, kurio metu patikrinama: lanko užsidegimas, lanko degimo stabilumas, elektrodo metalinio strypelio ir glaisto lydymosi tolygumas, metalo ištaškymas, siūlės rumbelės formavimasis, šlako luobelės išvaizda, šlako luobelės atsiskyrimas, siūlės išvaizda, įvirinimas; porų susidarymas.

Bandymai atliekami naudojant kintamosios ir (arba) nuolatinės srovės maitinimo šaltinius.

Tyrimų metu nustatoma, ar elektrodų virinimo technologinės savybės atitinka glaistytiesiems elektrodams keliamus reikalavimus.

2.7. Antrojo skyriaus išvados

1. Pasiūlyta nauja elektrodų glaistų sudarymo metodika. Naudojantis šia metodika, galima sudaryti įvairius elektrodų glaistus, kuriais apvirinti sluoksniai įgytų pageidaujamas savybes.
2. Naujai kuriamais elektrodais apvirintų sluoksnių atsparumo dilimui savybės tiriamos naudojant ASTM G65 metodiką.
3. Prilydyto metalo cheminės analizės tyrimais, rentgeno spindulių difrakcijos, mikroskopijos tyrimais ir apvirintų sluoksnių dilimo bandymais nustatomos priklausomybės tarp metalo cheminės sudėties, struktūros ir atsparumo dilimui.
4. Elektrodų virinimo technologinių savybių nustatymui naudojami standartiniai glaistytųjų elektrodų virinimo technologinių savybių vertinimo bandymai.

Rezultatų analizė

Šiame skyriuje aprašyta eksperimentų atlikimo eiga, gauti rezultatai ir jų aptarimas

Skyriaus medžiaga publikuota autoriaus straipsniuose [1A–17A].

3.1. Šlako sistemos sudėtinių dalių parinkimas

Kurti pigų, gerų technologinių virinimo savybių elektrodą, siekiama panaudojant kuo daugiau vietinių žaliavų. Darbe buvo nustatoma, kokias Lietuvoje esančias žaliavas galima panaudoti suvirinimo elektrodų glaistų gamybai. Lietuvoje Anykščių apylinkėse yra gausu aukštos kokybės kvarcinio smėlio, kuris yra tinkamas suvirinimo elektrodų glaistų gamybai. Taip pat suvirinimo elektrodų gamybai galima panaudoti ir šiaurės Lietuvoje iškasamą klintį arba dolomitą. Daugiau gamtinių žaliavų, kurias būtų galima panaudoti suvirinimo elektrodų glaistų gamybai, Lietuvoje nėra.

Tačiau šių žaliavų neužtenka. Siekiant pagaminti geros kokybės elektrodų glaistą, būtinos ir kitos, įvežtinės žaliavos (pvz., rutilas, žėrutis, kaolinas, fluoritas, ferolydiniai ir kt.).

Apvirinimo elektrodams glaistų kokybei nekeliami labai aukšti reikalavimai, pavyzdžiui, kad būtų pasiektas labai žemas vandenilio kiekis prilydytame metale ir pan. Svarbu, kad jis atliktų svarbiausias savo funkcijas – palengvintų lanko uždegimą ir jį stabilizuotų, sudarytų dujinę apsaugą, padengtų prilydomą metalą

šlako luobele. Įvairiose erdvinėse padėtyse apvirinimas sunkiai įgyvendinamas, kadangi apvirinant pernešama į išlydyto metalo vonelę didelis kiekis metalo ir nugalėti gravitacijos jėgą dujų srauto jėga ir elektromagnetiniu efektu pakankamai sudėtinga. Kad glaistas būtų pigus, jis turi būti paprastas. Todėl darbe literatūros šaltinių analizės ir preliminarinių bandymų buvo parinkta $TiO_2 - SiO_2 - CaO$ šlako sistema. Šiai šlako sistemai sudaryti naudotos vietinės ir įvežtinės žaliavos.

3.2. Elektrodo gamybai reikalingų medžiagų parinkimas

Iš Lietuvoje esančių žaliavų buvo pasirinktas kvarcinis smėlis ir klintis. Šių ir kitų šlaką sudarančių, legiruojančių bei kitas funkcijas atliekančių žaliavų paskirtis pateikta 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Pagrindinės glaisto komponentų funkcijos glaiste

Glaisto komponentas	Paskirtis, funkcija
Feroboras	legiravimas
Ferochromas	dezoksidavimas, legiravimas
Feromanganas	dezoksidavimas, legiravimas
Ferosilicis	dezoksidavimas, legiravimas
Ferotitanas	dezoksidavimas
Geležies milteliai	našumo padidinimas, lanko stabilizavimas, kitų lydinų cheminės sudėties koregavimas
Grafitas	legiravimas, dujinės apsaugos sudarymas, dezoksidavimas, lanko stabilizavimas
Metalinio chromo milteliai	legiravimas
Klintis	šlako sudarymas, dujinės apsaugos sudarymas, lanko stabilizavimas
Kvarcinis smėlis	šlako sudarymas
Rutilas	šlako sudarymas

Glaistą sudarančių medžiagų cheminės sudėtys pateiktos 3.2 ir 3.3 lentelėse.

Elektrodai sukurti naudojant mažanglio plieno vielą. Elektrodo gamybai vielos cheminė sudėtis pateikta 3.4 lentelėje.

Silikatinės žaliavos, kuri naudojama skysto stiklo – šlako komponentų rišančiajai medžiagai – gamybai, cheminė sudėtis pateikta 3.5 lentelėje. Kalio-natrio skystas stiklas parinktas todėl, kad kalis dėl žemesnio jonizacijos

potencialo yra geriau elektros lanką stabilizuojantis cheminis elementas už natrij. Gryno kalio stiklas yra ir žymiai brangesnis natrio, todėl parinktas kombinuotas skystas stiklas, kuriame kalio ir natrio oksidų santykis yra 75:25 (%).

Glaisto medžiagų granulimetrinės sudėtys pateiktos 3.6 lentelėje. Tai taip pat svarbus technologinis parametras. Nuo dalelių dydžio priklauso jų išsilydymo laipsnis bei greitis. Yra gaminamos įvairios granulimetrinės sudėties žaliavos elektrodų glaistų gamybai. Bet keičiant vienos sudėties žaliavą kita, būtina įvertinti elektrodo technologinių savybių, metalo legiravimo bei dezoksidavimo galimus pasikeitimus.

3.2 lentelė. *Dezoksiduojančių ir legiruojančių glaisto komponentų cheminė sudėtis, %*

Glaisto komponentas	Cheminis elementas						
	C	Si	Mn	Al	Cr	Ti	B
Feroboras	0,38	0,71	–	0,22	–	–	18,9
Ferochromas	7,72	0,85	–	–	64,4	–	–
Feromanganas	6,9	0,35	77,6	–	–	–	–
Ferosilicis	–	45,0	0,6	2,0	0,5	–	–
Ferotitanas	–	2,3	–	7,5	–	33,1	–
Geležies milteliai							
Grafitas	94,1	–	–	–	–	–	–
Metalinis chromas	–	–	–	–	99,8	–	–

3.3 lentelė. *Šlakų sudarančių glaisto komponentų cheminė sudėtis, %*

Glaisto komponentas	Cheminis junginys					
	CaCO ₃	MgCO ₃	SiO ₂	TiO ₂	ZrO ₂	Fe ₂ O ₃ Al ₂ O ₃
Klintis	89,3	5,2	2,3	–	–	2,9
Kvarcinis smėlis	–	–	99,3	0,1	–	0,4
Rutilas	–	–	1,5	95,4	0,9	1,6

3.4 lentelė. *Bandomųjų elektrodų gamybai naudotos vielos cheminė sudėtis, %*

Elektrodo kodas	Cheminis elementas					
	C	Si	Mn	Cr	Ti	B
671–673	0,10	0,00	0,43	0,06	0,00	0,00
674–677	0,09	0,00	0,44	0,08	0,00	0,00
680–688	0,09	0,00	0,45	0,07	0,00	0,00

3.5 lentelė. Silikatinės žaliavos cheminė sudėtis, %

Silikatinės žaliavos rūšis	Cheminis junginys					
	K ₂ O	Na ₂ O	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃ Al ₂ O ₃	SO ₃
Kalio-natrio	23,14	7,71	68,40	0,12	0,43	0,17

3.6 lentelė. Glaisto komponentų granulimetrinės sudėtys, %

Glaisto komponentas	Dalelių dydis, mm				
	>0,400	0,200-0,400	0,100-0,200	0,050-0,100	<0,050
Feroboras	0	1,3	50,8	41,9	6,0
Anglingasis ferochromas	0	3,5	51,9	26,5	18,1
Anglingasis feromanganas	0	8,3	59,8	28,7	3,2
Ferosilicis	0	12,1	48,8	31,3	7,8
Ferotitanas	0	3,5	56,8	22,4	17,3
Geležies milteliai	0	1,1	40,6	52,1	6,2
Grafitas	0	3,1	49,1	32,2	15,6
Metalinio chromo milteliai	0	5,2	24,3	38,4	32,1
Klintis	0	6,3	43,0	38,6	12,1
Kvarcinis smėlis	0	8,2	12,3	20,7	58,8
Rutilas	0	2,5	91,3	6,2	0
Celiuliozė	2,3	28,1	46,8	19,1	3,7

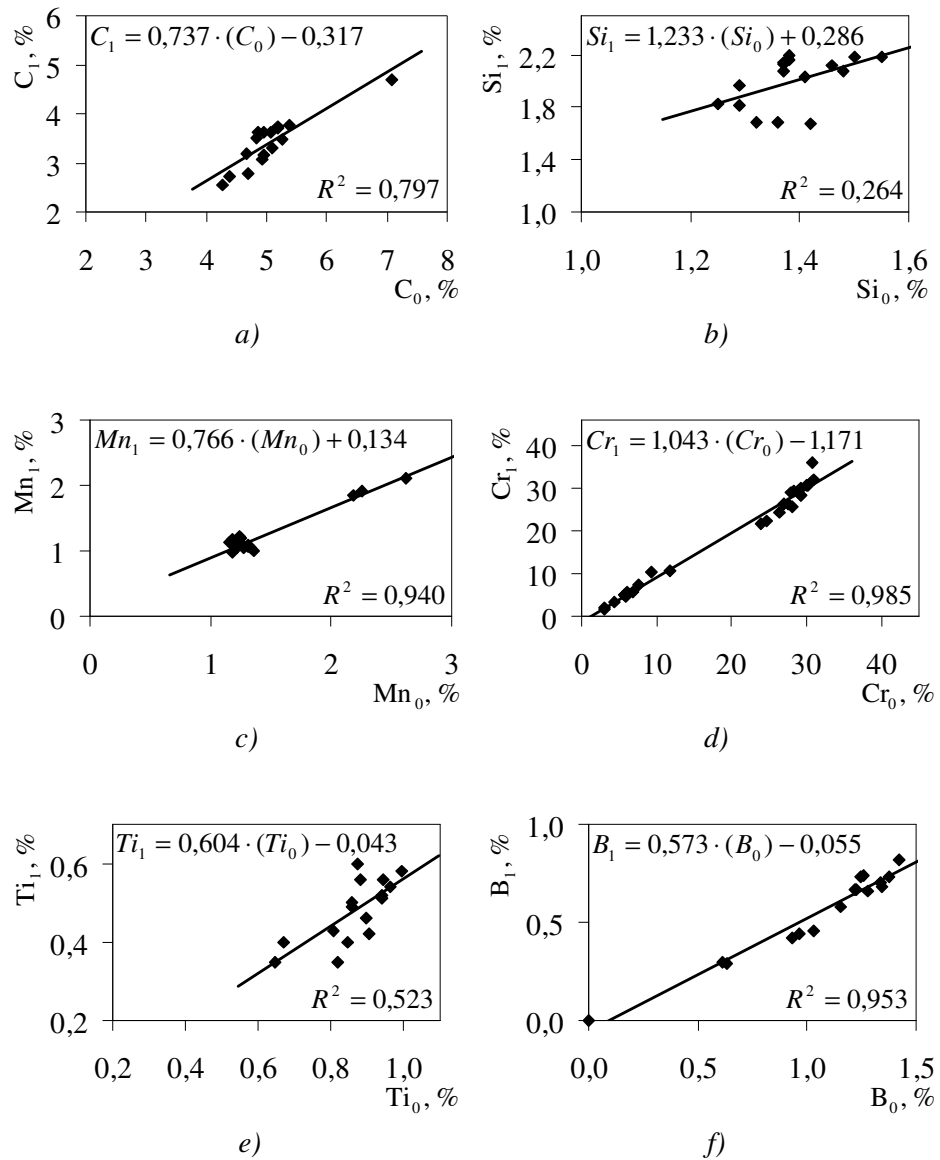
3.3. Analitinis legiruojančiųjų elementų perėjimo iš elektrodo į prilydomą metalą preliminarinių priklausomybių nustatymas

Pasinaudojus gamyboje sukauptais duomenimis (3.7 lentelė), yra gautos preliminarios legiruojančiųjų elementų perėjimo iš elektrodo į prilydomą metalą priklausomybės (3.1 paveikslas). Cheminio elemento kiekis elektrode – tai suminis elemento kiekis, esantis ir metaliniame elektrodo strypelyje (vieloje), ir glaiste.

3.7 lentelė. Duomenys preliminarinių legiruojančiųjų elementų perėjimo iš elektrodo į prilydomą metalą priklausomybių sudarymui, %

Cheminis elementas											
C ₀	C ₁	Si ₀	Si ₁	Mn ₀	Mn ₁	Cr ₀	Cr ₁	Ti ₀	Ti ₁	B ₀	B ₁
7,08	4,69	1,42	1,67	2,62	2,11	3,03	1,80	0,94	0,56	0,00	0,00
5,10	3,31	1,32	1,68	2,19	1,85	4,39	3,38	0,65	0,35	0,62	0,30
5,27	3,48	1,36	1,69	2,25	1,92	6,75	5,63	0,67	0,40	0,64	0,29
4,26	2,56	1,25	1,83	1,16	1,13	3,08	1,96	0,82	0,35	0,94	0,42
4,39	2,72	1,29	1,97	1,18	1,17	6,07	5,58	0,85	0,40	0,97	0,44
4,69	2,78	1,38	2,16	1,24	1,21	7,61	7,25	0,90	0,42	1,03	0,46
4,66	3,19	1,29	1,81	1,18	0,97	5,86	4,69	0,81	0,43	1,15	0,58
4,94	3,06	1,37	2,13	1,22	1,09	5,72	4,94	0,86	0,49	1,22	0,67
4,95	3,16	1,37	2,08	1,22	1,05	5,72	4,95	0,86	0,50	1,22	0,67
4,87	3,61	1,38	2,20	1,25	1,10	9,27	10,4	0,88	0,56	1,26	0,74
4,83	3,50	1,41	2,03	1,27	1,05	11,7	10,7	0,90	0,46	1,28	0,66
4,96	3,61	1,37	2,14	1,25	1,19	30,8	36,0	0,87	0,60	1,25	0,73
5,19	3,73	1,48	2,08	1,31	1,08	27,1	26,4	0,94	0,52	1,34	0,68
5,08	3,61	1,46	2,12	1,31	1,06	28,0	29,1	0,94	0,51	1,34	0,70
5,20	3,70	1,50	2,18	1,33	1,05	23,9	21,8	0,96	0,54	1,38	0,73
5,38	3,78	1,55	2,18	1,36	1,01	24,7	22,5	1,00	0,58	1,42	0,82
–	–	–	–	–	–	26,4	24,5	–	–	–	–
–	–	–	–	–	–	27,5	26,3	–	–	–	–
–	–	–	–	–	–	29,2	28,4	–	–	–	–
–	–	–	–	–	–	29,2	28,3	–	–	–	–
–	–	–	–	–	–	28,3	29,3	–	–	–	–
–	–	–	–	–	–	28,8	29,4	–	–	–	–
–	–	–	–	–	–	28,1	25,8	–	–	–	–
–	–	–	–	–	–	30,2	30,7	–	–	–	–
–	–	–	–	–	–	29,3	30,0	–	–	–	–
–	–	–	–	–	–	30,0	30,8	–	–	–	–
–	–	–	–	–	–	31,0	32,1	–	–	–	–
Indeksai prie elemento pavadinimo: 0 – elektrode, 1 – prilydytame metalė											

Pasinaudojus *Microsoft Excel* skaičiuokle, sudaromos tiesinės regresijos lygtys, kuriose *x* – elemento kiekis elektrode, %, *y* – elemento kiekis prilydytame metalė, %.



3.1 pav. Legiruojančiųjų elementų pernešimo iš elektrodo į prilydytą metalą priklausomybės:

a – anglies, b – silicio, c – mangano, d – chromo, e – titano, f – boro;
indeksai prie elemento pavadinimo: 0 – elektrode, 1 – prilydytame metale

Naudojantis gautomis lygtimis, galima gana tiksliai prognozuoti mangano, boro ir chromo kiekį prilydytame metale, nes jų kiekis prilydytame metale tiesiai proporcingas šių elementų kiekiui elektrode ir jų perėjimas iš elektrodo į prilydytą metalą mažai priklauso nuo kitų sąlygų.

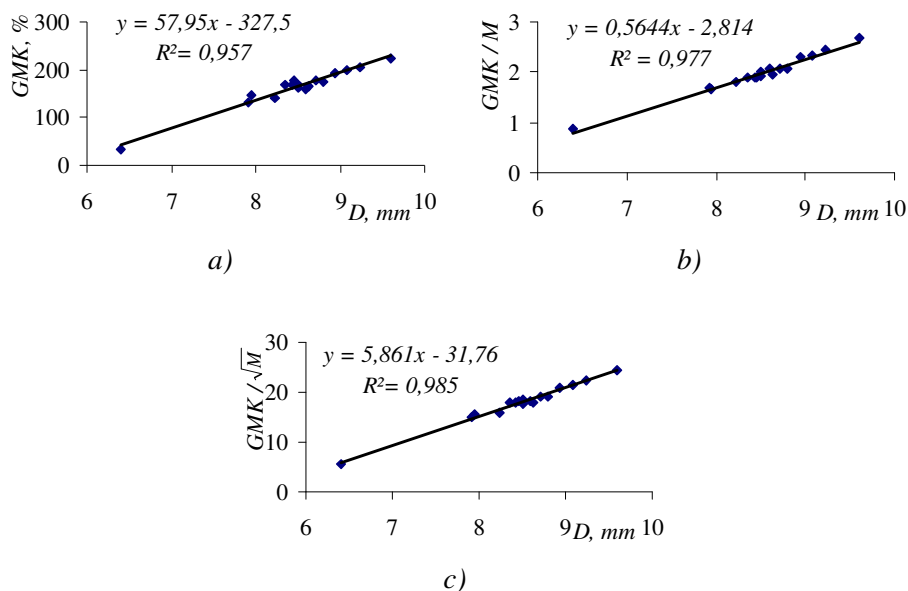
Anglies kiekį prilydytame metale galima prognozuoti tik apytiksliai, o silicio bei titano – sunkiai įmanoma.

Pasinaudojus gamyboje sukauptais duomenimis (3.8 lentelė), yra gautos tarpusavio priklausomybės tarp išorinio elektrodo skersmens, metalo miltelių kiekio glaiste ir glaisto masės koeficiento (3.2 paveikslas).

3.8 lentelė. Duomenys priklausomybių tarp išorinio elektrodo skersmens, metalo miltelių kiekio glaiste ir glaisto masės koeficiento sudarymui

Bandymo Nr.	Išorinis elektrodo skersmuo	Glaisto masės koeficientas	Metalų miltelių kiekis glaiste	Parametras	
				GMK/M	$GMK/\sqrt{M}$
	D, mm	GMK, %	M, %		
1	8,45	178,1	94,0	189	18,4
2	8,50	161,4	84,5	191	17,6
3	8,80	174,8	84,5	207	19,0
4	7,92	130,8	77,0	170	14,9
5	8,23	139,3	77,0	181	15,9
6	8,60	160,2	77,0	208	18,3
7	7,95	147,1	89,0	165	15,6
8	8,35	168,9	89,0	190	17,9
9	8,43	169,5	89,0	190	18,0
10	8,50	169,7	85,0	200	18,4
11	8,72	176,9	85,0	208	19,2
12	9,08	199,1	85,0	234	21,6
13	8,94	191,5	83,0	231	21,0
14	9,23	204,0	83,0	246	22,4
15	9,60	223,6	83,0	269	24,5
16	8,63	166,6	85,0	196	18,1
17	6,40	34,0	39,0	87	5,4

Pasinaudojus *Microsoft Excel* skaičiuokle, sudaromos tiesinės regresijos lygtys, kuriose x – išorinis elektrodo skersmuo, mm, y – glaisto masės koeficientas, % (3.2 pav., *a*), arba parametras, priklausantis nuo glaisto masės koeficiento ir metalo miltelių kiekio glaiste (3.2 pav., *b* ir *c*).



3.2 pav. Priklausomybės tarp išorinio elektrodo skersmens, metalo miltelių kiekio glaiste ir glaisto masės koeficiento

Tiksliausia gauta tiesinė priklausomybė, kuri įvertina metalo miltelių kiekį glaiste, kadangi metalo milteliai yra sunkesni už šlaką sudarančias medžiagas, o jų kiekis įvairiuose glaistuose yra nevienodas.

Kuriant eksperimentinius elektrodus glaisto masės koeficientas buvo apskaičiuojamas pagal šią formulę:

$$GMK = (5,861 \cdot D - 31,76) \cdot \sqrt{M}, \% \quad (3.1)$$

čia D – išorinis elektrodo skersmuo, mm; M – metalo miltelių kiekis glaiste, %.

3.4. Elektrodo gamybos parametrų nustatymas

Skaiciavimuose priimama, kad skysto stiklo sausas likutis sudaro 45 %. Tai nustatyta atlikus bandymą, kurio metu elektrinėje krosnyje buvo išdžiovintas iš anksto pasvertas skysto stiklo kiekis, sausas likutis pasvertas po išdžiovinimo ir iš masių skirtumo bei pradinės masės santykio apskaičiuotas šis dydis.

Masės sumaišymui skysto stiklo naudota 16,7 % skaičiuojant nuo sauso mišinio kiekio. Naudojant šį skysto stiklo kiekį, pasirinktos šlako sistemos

glaistas yra pilnai surišamas, masė yra pakankamai plastiška, elektrodų gamybos įrangos prietaisų parodymai (presavimo slėgis) rodo, kad tai atitinka įprastus elektrodų gamybos proceso režimus, pagaminti elektrodai yra lygūs, be išorinių glaisto defektų. Naudojant mažesnę skysto stiklo kiekį (mažiau kaip 16 %), elektrodų glaisto masė gaunama pernelyg sausa, presavimo slėgis labai aukštas, elektrodų gamybos presas dirba nestabiliai, su trūkčiojimais, pagamintų elektrodų glaistas nelygus aptrupėjęs. Naudojant didesnę skysto stiklo kiekį (daugiau kaip 17,5 %), elektrodų glaisto masė gaunama pernelyg minkšta, presavimo slėgis labai žemas, elektrodų gamybos presas dirba stabiliai, bet elektrodų glaistas nelygus, su išsipūtimais, lengvai pažeidžiamas transporterio juostų.

Pagaminti elektrodai džiovinami įprastais elektrodų gamyboje naudojamais režimais:

1) išlaikymas po gamybos – 24 valandos 20 °C temperatūroje, kad sutvirtėtų elektrodų glaistas;

2) džiovinimas 300 °C temperatūroje 2 valandas.

3.5. Elektrodų glaisto sudarymas

Pasinaudojus preliminariais, anksčiau ištirtais, elementų pernešimo iš elektrodo į prilydomą metalą dėsningumais (3.1 paveikslas), sudarytos atitinkamos apvirinimo elektrodų glaistų kompozicijos taip, kad apvirintuose sluoksniuose kistų vieno elemento kiekis, o kitų elementų kiekiai išliktų pastovūs. Bandymams ir tyrimams buvo pagaminti 4 mm skersmens elektrodai su $TiO_2 - SiO_2 - CaO$ šlako sistemos ir metalo miltelių glaistu.

Tiriant chromo perėjimo iš elektrodo į prilydomą dėsningumus ir jo įtaką kitų elementų įsisavinimui, elektrodų glaistų kompozicijos sudarytos taip, kad prilydytame metale kistų chromo kiekis nuo 1 iki 40 %, o kitų legiruojančiųjų elementų kiekiai (anglies ~ 3 %, silicio ~ 2 %, mangano ~ 1,1 %, titano ~ 0,5 %, boro ~ 0,6 %) apvirintame sluoksnyje išliktų vienodi (3.13 lentelė). Tai pasiekama keičiant anglingojo ferochromo kiekį elektrodo glaiste, pakeitus ferochromą metalinio chromo milteliais. Kad nesikeistų anglies kiekis, glaisto sudėtis koreguojama keičiant grafito kiekį glaiste. Modeliuojant elektrodų glaistus koreguojamas nebuvo tik silicio kiekis, tikintis, kad Si redukuosis iš silicio oksido (didėjant elektrodo kodo numeriui gaunamas didesnis santykis $[SiO_2]/[Me]$).

Bandymams pagamintų elektrodų glaistų sudėtys pateiktos 3.9 ir 3.10 lentelėse, o išoriniai skersmenys bei elektrodų glaisto masės koeficientai – 3.11 ir 3.12 lentelėse.

3.9 lentelė. *Bandomųjų elektrodų serijos su kintamu chromo kiekiu prilydytame metale glaistų sudėtys, %*

Glaisto komponentas	Elektrodo kodas						
	671	672	673	674	675	676	677
Šlaką sudarančios medžiagos	14	14,2	18	20,5	29,5	39,15	49,4
Celiuliozė	1	1	1	1	1	1	1
Ferotitanas	4	4	4,5	5	5,5	6,3	6,9
Ferosilicis	3	3	3	3	3	3	3
Anglingasis feromanganas	2	2	2	2	2,5	2,5	3
Anglingasis ferochromas	–	63,5	57	52	38,4	23,2	7,6
Metalinio chromo milteliai	58,8	–	–	–	–	–	–
Feroboras	10	10	11	12	13,5	15,6	17,4
Grafitas	7,2	2,3	3,5	4,5	6,6	9,25	11,7

3.10 lentelė. *Bandomųjų elektrodų serijos su kintamu anglies kiekiu prilydytame metale glaistų sudėtys, %*

Glaisto komponentas	Elektrodo kodas								
	680	681	682	683	684	685	686	687	688
Šlaką sudarančios medžiagos	16	15,8	15,5	18	18	18	20,5	26	26
Celiuliozė	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Ferotitanas	4,3	4,2	4,2	4,5	4,5	4,4	4,7	5,3	5,3
Ferosilicis	2,8	2,8	2,8	3	3	3	3,5	4,5	4,8
Anglingasis feromanganas	1,9	1,9	1,9	2	2	2	2,1	2,2	2,2
Anglingasis ferochromas	54,1	53,8	53,6	57	56,5	56,3	39,6	11,4	–
Metalinio chromo milteliai	–	–	–	–	–	–	13	35,8	43,1
Feroboras	10,4	10,4	10,3	11	10,9	10,9	11,5	12,9	12,9
Geležies milteliai	–	2,7	5,3	–	2,4	4,4	4,1	–	4,7
Grafitas	9,5	7,4	5,4	3,5	1,7	–	–	0,9	–

Tiriant anglies perėjimo iš elektrodo į prilydomą dėsningumus ir jos įtaką kitų elementų įsisavinimui, elektrodų glaistų kompozicijos sudarytos taip, kad apvirintuose sluoksniuose anglies kiekis kistų nuo 0,1 iki 4 %, o kitų legiruojančiųjų elementų kiekiai (chromo ~ 22 %, silicio ~ 2 %, mangano ~ 1,1 %, titano ~ 0,5 %, boro ~ 0,6 %) apvirintame sluoksnyje išliktų vienodi (3.14 lentelė). Tai pasiekama keičiant anglingojo grafito bei ferochromo kiekį elektrodo glaiste, keičiant ferochromą metalinio chromo milteliais. Glaisto sudėtis koreguojama į glaistą įdedant geležies miltelių.

Celiuliozės, kaip pluoštinės medžiagos, kuri naudojama suvirinimo elektrodų glaistų technologinių savybių gamybos metu pagerinimui (pagerėja glaisto plastiškumas, geriau surišamos miltelinės medžiagos), kiekis visuose elektrodų glaistuose sudarė 1 %.

Bandymais nustatyta, kad šlaką sudarančių medžiagų kiekis pasirinktos šlako sistemos elektrode turi sudaryti ne mažiau kaip 0,2 g/cm elektrodo ilgio. Esant mažesniai šlaką sudarančių medžiagų kiekiui, išlydyto metalo rumbelė nevisiškai padengiama šlako luobele. Naudoti daugiau šlaką sudarančių medžiagų netikslinga, nes didėja išorinis elektrodo skersmuo. Bandymams gamintų elektrodų šlako kiekis sudarė 0,2–0,216 g/cm.

3.11 lentelė. Planuojami bandymams gaminamų elektrodų išoriniai skersmenys ir glaisto masės koeficientai (serija su kintamu Cr kiekiu)

Elektrodo kodas	671	672	673	674	675	676	677
Išorinis skersmuo, mm	8,6	8,6	7,9	7,6	7,2	6,8	6,4
Glaisto masės koeficientas,	165	165	129	110	82	62	34

3.12 lentelė. Planuojami bandymams gaminamų elektrodų išoriniai skersmenys ir glaisto masės koeficientai (serija su kintamu C kiekiu)

Elektrodo kodas	680	681	682	683	684	685	686	687	688
Išorinis skersmuo, mm	8,3	8,3	8,3	7,9	7,9	7,9	7,6	7,2	7,2
Glaisto masės koeficientas, %	145	147	149	128	130	131	114	89	89

3.13 lentelė. Planuojama kuriamų elektrodų serijos su kintamu Cr kiekiu prilydyto metalo cheminė sudėtis, %

Elektrodo kodas	Cheminis elementas					
	C	Si	Mn	Cr	Ti	B
671	3,11	1,94	1,10	39,3	0,49	0,67
672	3,11	1,98	1,10	27,3	0,49	0,67
673	3,12	1,80	1,06	22,2	0,51	0,67
674	3,15	1,69	1,03	18,8	0,52	0,68
675	3,09	1,46	1,13	11,7	0,50	0,67
676	3,13	1,24	1,05	6,13	0,46	0,68
677	3,05	1,05	1,09	0,70	0,49	0,64

3.14 lentelė. Planuojama kuriamų elektrodų serijos su kintamu C kiekiu prilydyto metalo cheminė sudėtis, %

Elektrodo kodas	Cheminis elementas					
	C	Si	Mn	Cr	Ti	B
680	5,69	1,78	1,01	22,1	0,51	0,66
681	5,05	1,85	1,02	22,1	0,50	0,67
682	4,17	1,79	1,02	22,1	0,50	0,66
683	3,24	1,80	1,03	22,1	0,50	0,67
644	2,48	1,80	1,03	22,1	0,51	0,67
685	1,76	1,80	1,04	22,1	0,50	0,67
686	1,11	1,79	1,03	22,1	0,50	0,66
687	0,46	1,78	1,02	22,1	0,50	0,67
688	0,10	1,80	1,02	22,0	0,50	0,67

3.6. Analitinis prilydyto metalo cheminės sudėties skaičiavimas

Pagaminus elektrodus, faktiniai jų skersmenys ir glaisto masės koeficientai šiek tiek skyrėsi nuo planuotų (3.15 ir 3.16 lentelės).

GMK (glaisto masės koeficientas) nustatytas eksperimentiškai pagal 2.2 formulę.

3.15 lentelė. *Bandymams pagamintų elektrodų faktiniai išoriniai skersmenys glaisto masės koeficientai (serija su kintamu Cr kiekiu)*

Elektrodo kodas	671	672	673	674	675	676	677
Išorinis skersmuo, mm	8,58	8,40	7,99	7,72	7,30	6,88	6,56
Glaisto masės koeficientas, %	161	167	137	116	89	69	54

3.16 lentelė. *Bandymams pagamintų elektrodų faktiniai išoriniai skersmenys glaisto masės koeficientai (serija su kintamu C kiekiu)*

Elektrodo kodas	680	681	682	683	684	685	686	687	688
Išorinis skersmuo, mm	8,30	8,30	8,20	7,99	7,97	7,78	7,42	7,10	7,10
Glaisto masės koeficientas, %	130	138	139	137	135	125	106	87	84

Pasinaudojus 3.2, 3.4, 3.15 ir 3.16 lentelių duomenimis bei cheminių elementų pernešimo iš elektrodo į prilydomą metalą priklausomybėmis (3.1 paveikslas), buvo analitiškai apskaičiuotos bandomųjų elektrodų prilydyto metalo cheminės sudėtys (3.17 ir 3.18 lentelės).

3.17 lentelė. *Analitiškai apskaičiuota pagamintų elektrodų gryno prilydyto metalo cheminė sudėtis (serija su kintamu Cr kiekiu), %*

Elektrodo kodas	Cheminis elementas					
	C	Si	Mn	Cr	Ti	B
671	3,09	1,52	1,07	39,2	0,48	0,66
672	3,29	1,99	1,08	27,5	0,49	0,67
673	3,35	1,85	1,05	22,9	0,52	0,69
674	3,34	1,73	1,01	19,3	0,54	0,70
675	3,35	1,52	1,14	12,4	0,53	0,71
676	3,39	1,32	1,08	6,12	0,54	0,73
677	3,24	1,14	1,12	0,96	0,51	0,70

3.18 lentelė. *Analitiškai apskaičiuota pagamintų elektrodų gryno prilydyto metalo cheminė sudėtis (serija su kintamu C kiekiu), %*

Elektrodo kodas	Cheminis elementas					
	C	Si	Mn	Cr	Ti	B
680	5,64	1,70	0,99	20,9	0,48	0,63
681	4,89	1,74	1,00	21,3	0,48	0,65
682	4,02	1,74	1,00	21,3	0,48	0,64
683	3,35	1,85	1,05	22,9	0,52	0,69
644	2,54	1,84	1,05	22,5	0,52	0,68
685	1,72	1,78	1,02	21,5	0,48	0,65
686	1,05	1,73	1,02	21,2	0,48	0,64
687	0,45	1,75	1,01	21,7	0,50	0,65
688	0,00	1,75	1,00	21,2	0,48	0,64

3.7. Eksperimentinis prilydyto metalo cheminės sudėties nustatymas

Siekiant gauti kuo grynesnį kuriamais elektrodais prilydytą metalą, kad būtų kuo mažesnė pagrindinio metalo cheminės sudėties įtaka, gryno prilydyto metalo cheminės analizės bandiniai buvo gaunami ant metalinės plokštelės prilydant 5 sluoksnius elektrodinio metalo. Prieš virinant naują sluoksnį plokštelė lėtai ataušinama ore iki aplinkos temperatūros. Viršutinis prilydyto metalo paviršius (darbinis paviršius) nušlifuojamas. Bandymai atlikti BELEC-compact-lab-N spektroanalizatoriumi. Gauti rezultatai pateikiami 3.19 ir 3.20 lentelėse.

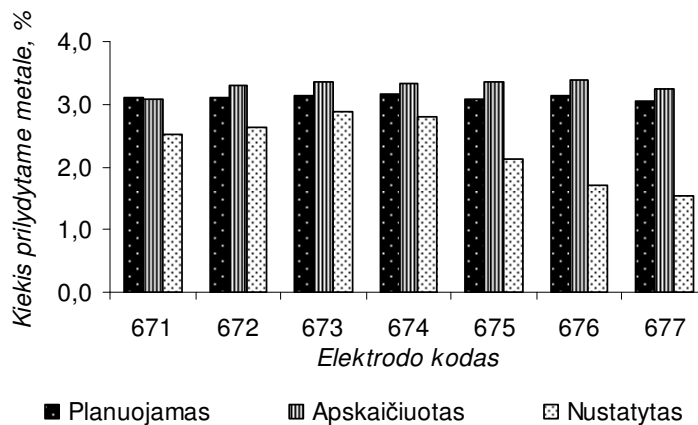
3.19 lentelė. *Bandomaisiais elektrodais prilydyto metalo cheminė sudėtis, apvirinant plokštelę 5 sluoksniais, %*

Elektrodo kodas	Cheminis elementas					
	C	Si	Mn	Cr	Ti	B
671	2,53	2,04	0,85	41,4	0,293	0,703
672	2,64	3,05	1,21	26,0	0,797	0,767
673	2,88	2,47	1,19	23,1	0,790	0,767
674	2,80	2,58	1,18	20,1	0,927	0,763
675	2,13	2,23	1,15	12,3	0,727	0,600
676	1,70	2,16	1,03	6,63	0,733	0,647
677	1,54	1,69	1,00	2,07	0,400	0,537

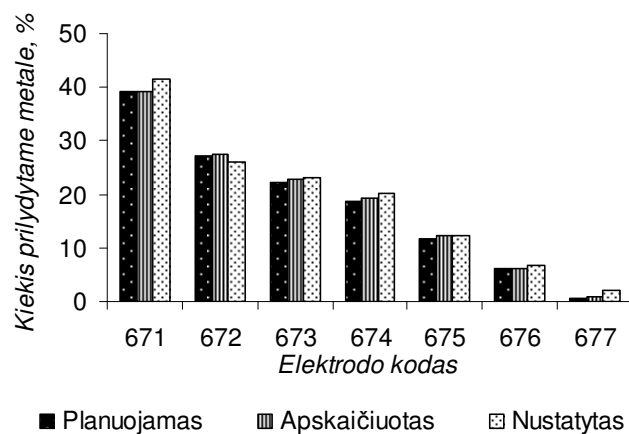
3.20 lentelė. *Bandomaisiais elektrodais prilydyto metalo cheminė sudėtis, apvirinant plokštelę 5 sluoksniais, %*

Elektrodo kodas	Cheminis elementas					
	C	Si	Mn	Cr	Ti	B
680	3,86	2,21	0,95	18,6	1,237	0,838
681	3,92	2,21	0,86	22,9	1,297	0,884
682	3,90	1,70	0,86	21,5	1,174	0,775
683	2,88	2,47	1,19	23,1	0,790	0,767
644	2,86	1,88	1,16	20,3	0,480	0,778
685	1,98	2,17	1,06	20,4	0,253	0,738
686	1,24	2,01	1,00	20,2	0,145	0,753
687	0,63	1,81	1,03	21,8	0,127	0,807
688	0,16	1,62	0,73	21,5	0,064	0,694

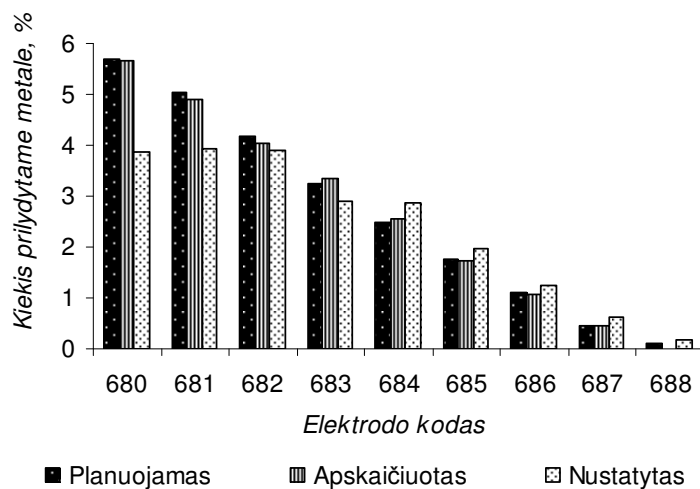
Pasinaudojus 3.13, 3.14 ir 3.17–3.20 lentelių duomenimis, sudaromos atskirų legiruojančiųjų elementų prognozuojamų, analitiškai apskaičiuotų ir eksperimentiškai nustatytų kiekių prilydytame metalo palyginimo diagramos. Jos pateiktos 3.3–3.7 paveiksluose.



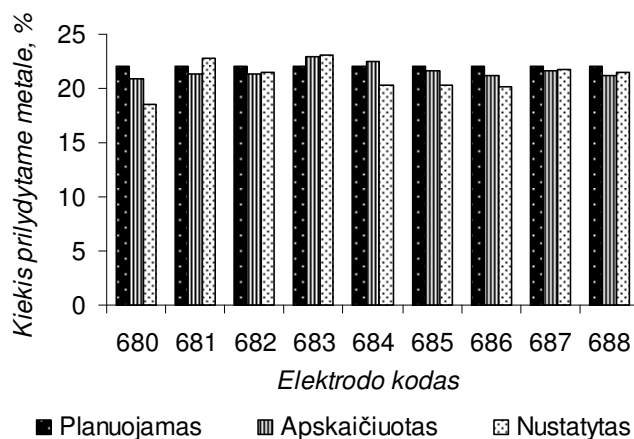
3.3 pav. *Planuojamo sudarant elektrodų glaistus, apskaičiuoto pagaminus elektrodus ir eksperimentiškai nustatyto anglies kiekio prilydytame metalo palyginimas 671–677 serijoje*



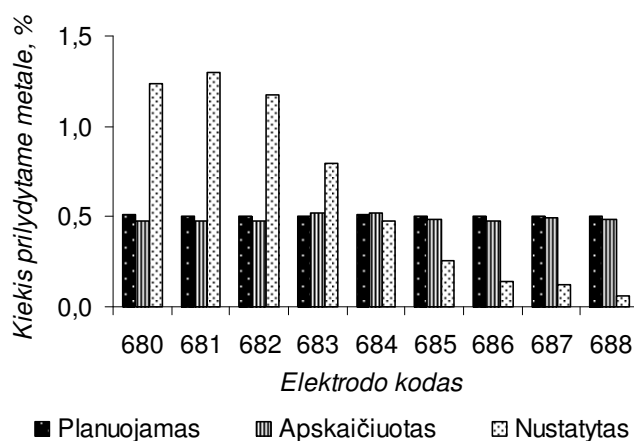
3.4 pav. Planuojamo sudarant elektrodų glaistus, apskaičiuoto pagaminus elektrodus ir eksperimentiškai nustatyto chromo kiekio prilydytame metale palyginimas 671–677 serijoje



3.5 pav. Planuojamo sudarant elektrodų glaistus, apskaičiuoto pagaminus elektrodus ir eksperimentiškai nustatyto anglies kiekio prilydytame metale palyginimas 680–688 serijoje



3.6 pav. Planuojamo sudarant elektrodų glaistus, apskaičiuoto pagaminus elektrodus ir eksperimentiškai nustatyto chromo kiekio prilydytame metale palyginimas 680–688 serijoje



3.7 pav. Planuojamo sudarant elektrodų glaistus, apskaičiuoto pagaminus elektrodus ir eksperimentiškai nustatyto titano kiekio prilydytame metale palyginimas 680–688 serijoje

Iš šių diagramų matome, kad, žinant cheminio elemento kiekį elektrode, galima pakankamai tiksliai galima prognozuoti chromo kiekį prilydytame metale. Chromo kiekis prilydytame metale labiausiai priklauso tik nuo jo kiekio elektrode (glaiste bei strypelyje) ir mažai priklauso nuo kitų elementų kiekio elektrode bei lydinyje.

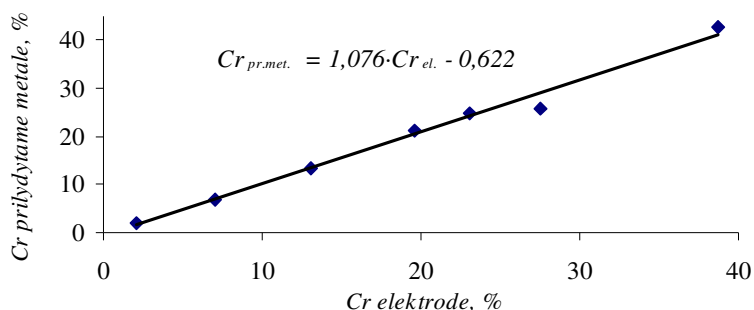
Lengvai galima prognozuoti ir anglies kiekį prilydytame metale. Tačiau šiuo atveju nepakanka žinoti vien tik anglies kiekio elektrode, bet reikia atsižvelgti ir į kitų elementų kiekį lydinyje.

Sudėtingesnis titano kiekio prilydytame metale prognozavimas. Jis priklauso nuo titano kiekio elektrode, kitų elementų (ypatingai anglies) koncentracijos lydinyje, bei glaisto tipo. Esant atitinkamoms sąlygoms titanas atsistato iš elektrodo glaiste esančio rutilo.

3.8. Legiruojančiųjų elementų perėjimo iš elektrodo į prilydomą metalą ir jų įtakos kitų elementų įsisavinimui dėsningumų analizė

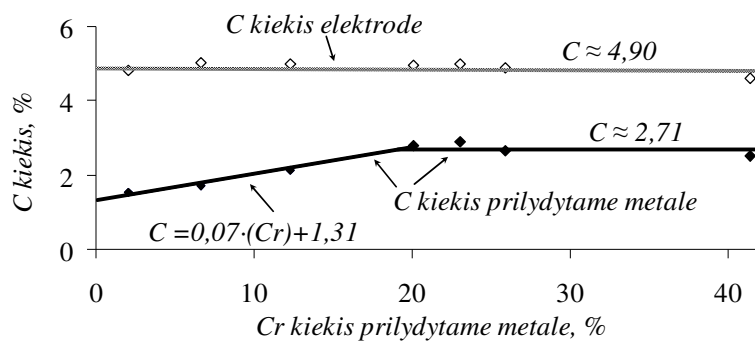
Prilydyto metalo cheminės analizės rezultatai rodo, kad chromo perėjimas iš elektrodo į prilydomą metalą turi tiesinį pobūdį (3.8 paveikslas). Žinant chromo kiekį elektrode galima apskaičiuoti chromo kiekį prilydytame metale pagal formulę

$$Cr_{pr.met.} = 1,076 \cdot Cr_{el.} - 0,622, \%$$
 (3.2)



3.8 pav. Chromo perėjimo iš elektrodo į prilydomą metalą priklausomybė

Gryno prilydyto metalo cheminės analizės rezultatai rodo, kad esant chromo kiekiui lydinyje apie 20 % (3.19 lentelė, 674 bandinys), padidėja visų kitų cheminių elementų įsisavinimas į lydinį. Chromo kiekiui keičiantis nuo 20 % iki 40 %, anglies kiekis praktiškai nekinta – lydinys maksimaliai įsisavina anglį. Mažėjant chromo kiekiui – mažėja elemento, su kuriuo anglis sudaro karbidus, todėl į lydinį nepereina, o išdega, pereina į šlaką. Chromo kiekio įtaka lydinyje anglies įsisavinimui grafiškai pateikta 3.9 paveiksle.



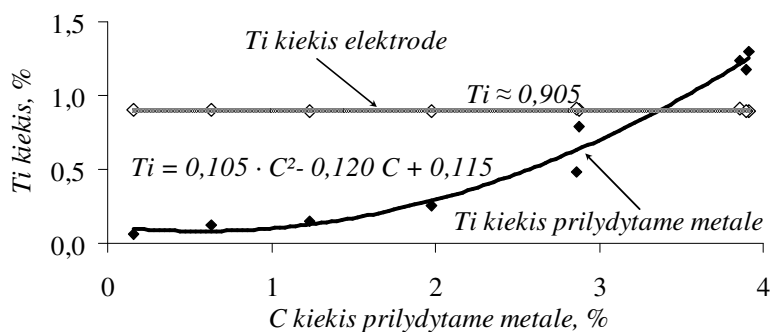
3.9 pav. Chromo kiekio įtaka prilydytame metale anglies įsisavinimui

Pasinaudojus bandymų rezultatais galima apskaičiuoti anglies kiekį prilydytame metale.

$$C_1 = \min \left[0,07 \cdot C_{r_0} + 1,31 ; \frac{C_0}{1,81} \right], \% \quad (3.3)$$

Prilydyto metalo cheminės analizės tyrimų rezultatai (3.19 ir 3.20 lentelės) parodė, kad, esant pakankamai chromo lydinys, anglis taip pat turi tiesinį pobūdį. Esant nepakankamai chromo lydinys, anglies kiekis, kurį įsisavina prilydomas metalas, priklauso nuo chromo kiekio lydinys.

Anglies kiekis lydinys turi didelę įtaką titano įsisavinimui. Rezultatai pateikiami 3.10 paveiksle. Didėjant anglies kiekiui lydinys, ženkliai didėja ir titano kiekis. Titano kiekis prilydytame metale tampa didesnis, nei buvo metalinio titano elektrode. Titanas atsistato iš glaiste esančio titano dioksido – rutilo.



3.10 pav. Anglies kiekio įtaka prilydytame metale titano įsisavinimui

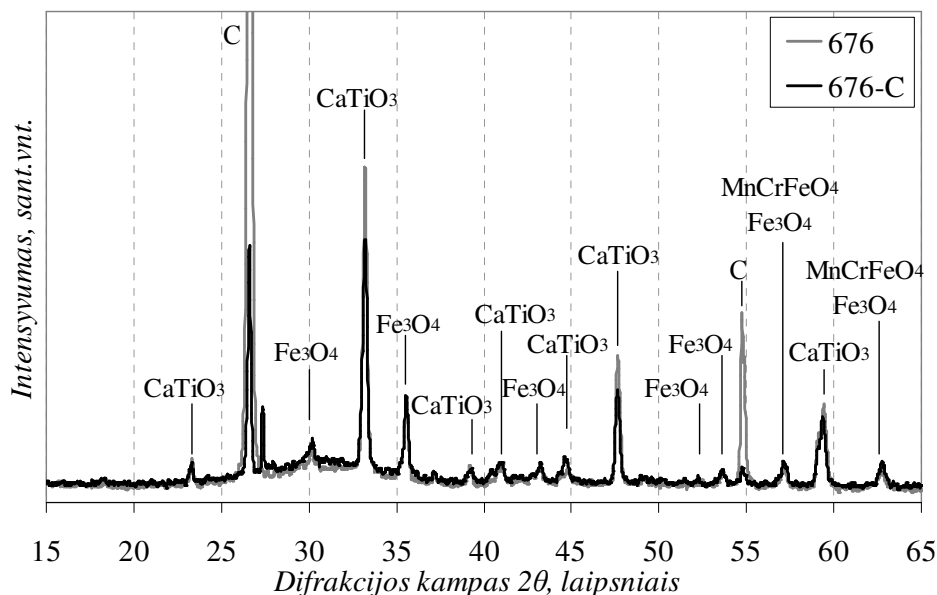
Anglies kiekis lydinys chromo ir kitų elementų įsisavinimui didesnės įtakos neturi (3.20 lentelė).

3.9. Šlakų ir apvirintų sluoksnių metalo rentgeno spindulių difrakcijos bandymų rezultatai

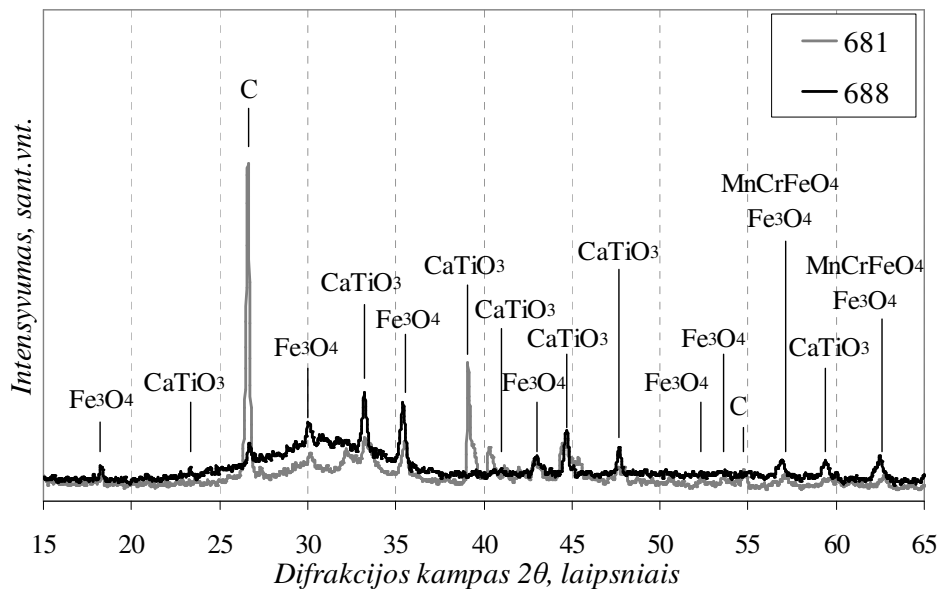
Rentgeno spinduliuotės difrakcinė analizė atlikta bendros paskirties rentgeno difraktometru ДРОН-УМ1. Rentgeno spinduliuotės $\text{CuK}_{\alpha 1, \alpha 2}$ spektrui išskirti naudotas grafito monochromatorius (difrakcijos plokštuma $d_{(002)} = 0,3352 \text{ nm}$), kuris panaikina foną, atsirandantį dėl nekoherentinės rentgeno spinduliuotės sklaidos plyšiuose ir bandinio laikiklyje, bei panaikina fluorescencinę spinduliuotę. Tai ypač svarbu tiriant CuK_{α} spinduliuote geležies junginius. Difrakcinės kreivės buvo užrašomos, detektoriumi judant $1^\circ/\text{s}$ greičiu, intensyvumą matuojant kas $0,02^\circ$. Karbidinių fazių identifikavimui panaudota PDF-2 duomenų bazė.

3.9.1. Šlakų rentgeno spinduliuotės difrakcinė kokybinė fazinė analizė

Bandinių 676 ir 676-C bei 681 ir 688 šlakų difraktogramos parodytos 3.11 ir 3.12 paveiksluose.



3.11 pav. 676 ir 676-C bandinių šlakų rentgeno spinduliuotės difrakcinės kreivės



3.12 pav. 681 ir 688 bandinių šlakų rentgeno spinduliuotės difrakcinės kreivės

Difrakcinės analizės metu buvo nustatyti šie junginiai:

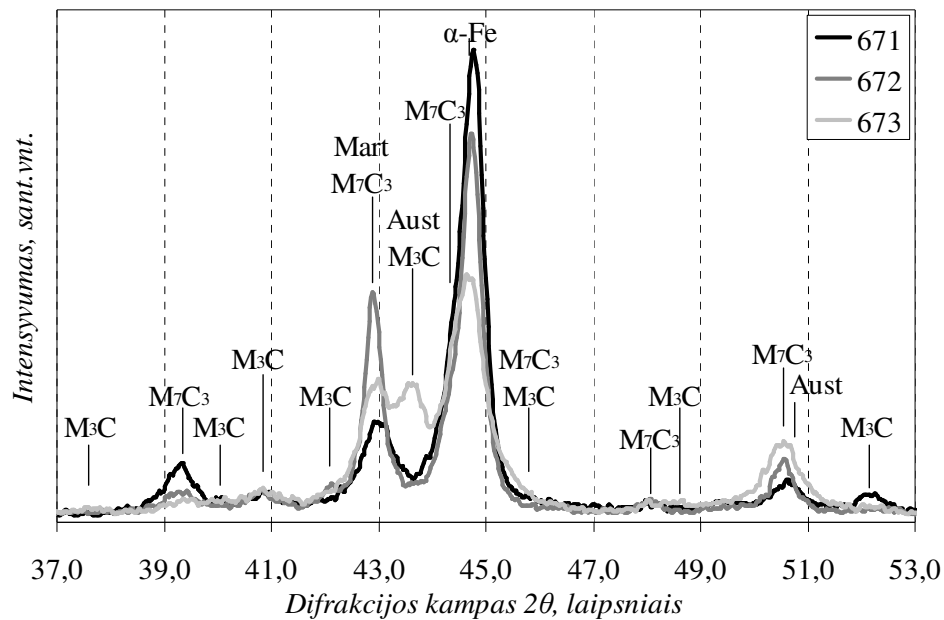
- anglis (C – grafitas) – didžiausias kiekis bandinyje 676;
- perovskitas, kurio cheminė sudėtis (ir kristalografinė gardelė) maždaug – $CaTiO_3$, tačiau kai kurie Ca atomai gali būti pakeist kitais metalų atomais;
- špinelis – Fe_3O_4 , tačiau Fe atomai gali būti pakeist Cr , Mn .

Taip pat visuose bandiniuose yra gana daug amorfinės medžiagos, kurios difrakcinė analizė neidentifikuoja, tačiau pagal turimus duomenis šią medžiagos dalį galima priskirti stiklui.

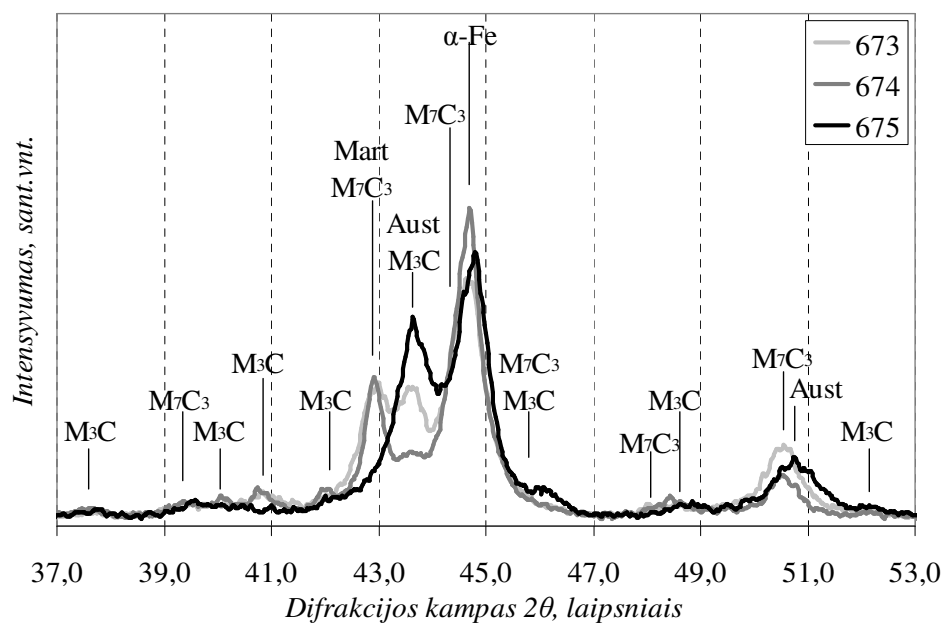
Šlakų rentgeno spinduliuotės difrakcinė kokybinė fazinė analizė parodė, kad perteklinė anglis, kurios neįsisavina lydinys, nesant pakankamai chromo metalo, pereina į šlaką.

3.9.2. Sluoksnių, apvirintų kuriamaiais glaistytaisiais elektrodais, difrakcinė fazinė analizė

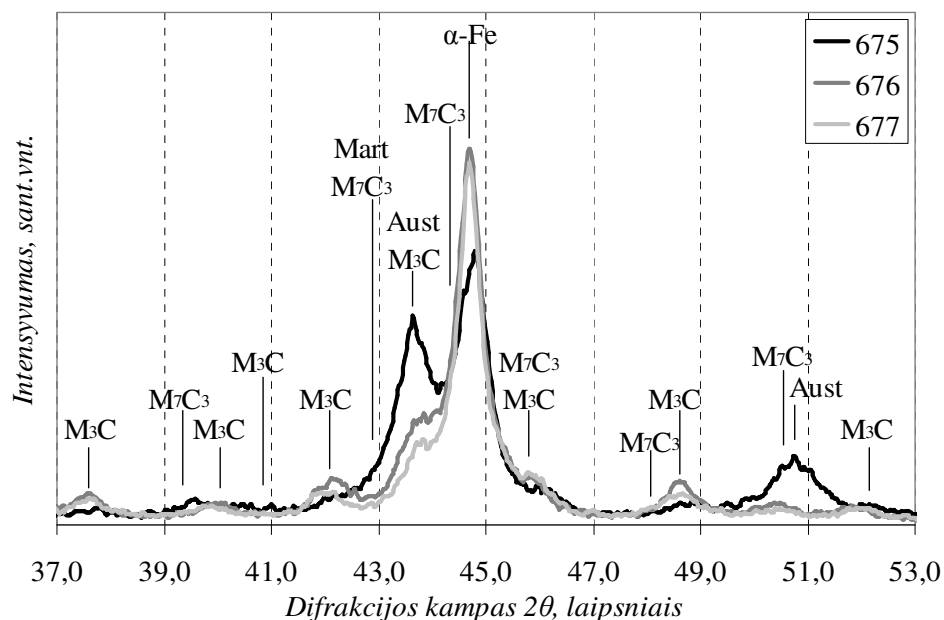
Bandiniai pagaminti iš panaudotų dilimo bandinių, kurių cheminė sudėtis pateikta 3.21 lentelėje. Metalinių dangų, gautų apvirinus kuriamaiais glaistytaisiais elektrodais, difraktogramos pateiktos 3.13–3.15 paveiksluose.



3.13 pav. Sluoksnių, apvirintų 671–673 kodų elektrodais, difrakcinės kreivės



3.14 pav. Sluoksnių, apvirintų 673–675 kodų elektrodais, difrakcinės kreivės



3.15 pav. Sluoksnių, apvirintų 675–677 kodų elektrodais, difrakcinės kreivės

Pagrindinė visų dangų fazė: ferito (α -Fe, difrakcinis maksimumas ties $2\theta \sim 44,7^\circ$) ir cementito M_3C mišinys – perlitas. Ferite gali būti ištirpusio Cr bei kitų legiruojančių elementų.

Be to, dangose 673–677 galima identifikuoti nevienodą kiekį austenito (daugiausia 675 bandinyje) (difrakcinis maksimumas ties $2\theta \sim 43,66^\circ$), kuris gali būti ledeburito sudėtinė dalis, kai legiruotas austenitas išlieka žematemperatūriniame ledeburite. Difrakcinis maksimumas ties $2\theta \sim 43,66^\circ$ gali priklausyti ir cementito tipo karbidui M_3C , kur M – metalo atomas, dažniausiai Fe, bet būna ir Cr bei Mn, o taip pat B atomai iš dalies keičia C. Karbidas M_3C gana gerai identifikuojamas 674 bandinyje, tačiau visiškai atskirti šį karbidą nuo austenito galima tik elektrochemiškai išsėdinant bandinį.

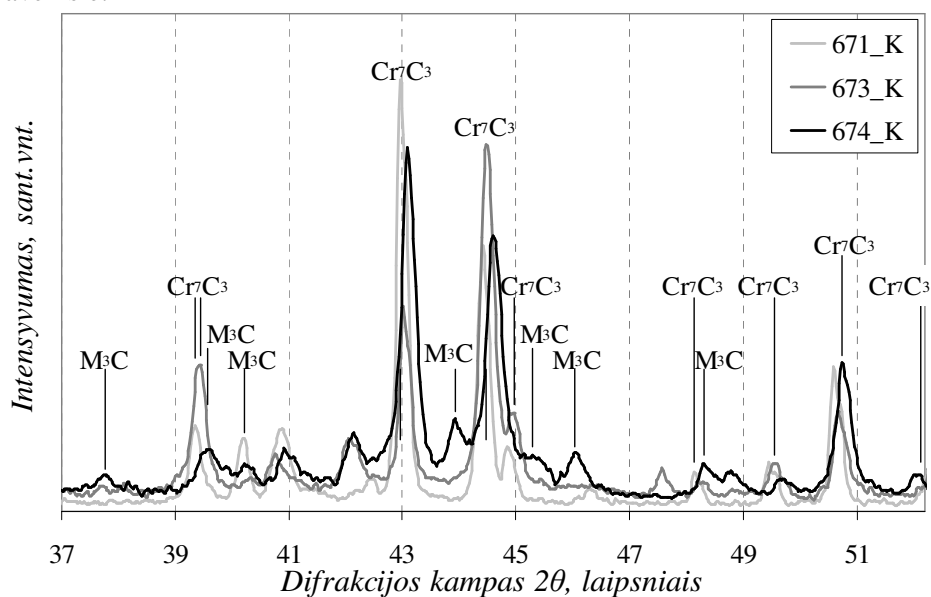
Kita pagrindinė dangų fazė – M_7C_3 tai daug Cr turintis karbidas, kur M – Cr, Fe, Mn ir kt. Didžiausias jo kiekis yra 676 ir 677 dangose.

Gana intensyvus difrakcinis maksimumas ties kampu $2\theta \sim 43,0^\circ$ gali rodyti, kad susidaro martensitas. Tačiau mikrostruktūroje martensito buvimo požymių nenustatyta.

Rentgeno spinduliuotės difrakcinės analizės metodas išsiskiria galimybe kokybiškai ir kiekybiškai nustatyti legiruojančių elementų kitimą karbidinėje fazėje bei karbidinių fazių susidarymo seką. Siekiant tiriamajame mėginyje

padidinti karbidinės fazės koncentraciją, plieno bandinius reikia elektrochemiškai išdinti, selektyviai atskiriant įvairias fazes. Cheminių junginių atskyrimas paremtas skirtingu jų atsparumu agresyviai aplinkai vykstant elektrocheminiams procesams. Heterogeniniuose lydinuose kiekviena fazė aprašoma tik jai būdinga poliarizacijos kreive, o jos tirpimo greitis priklauso nuo elektrolito sudėties, elektrolizės sąlygų, srovės tankio ir t. t.

Elektrochemiškai atskirtų karbidų difrakcinės kreivės parodytos 3.16 paveiksle.



3.16 pav. Elektrochemiškai atskirtų junginių difrakcinės kreivės

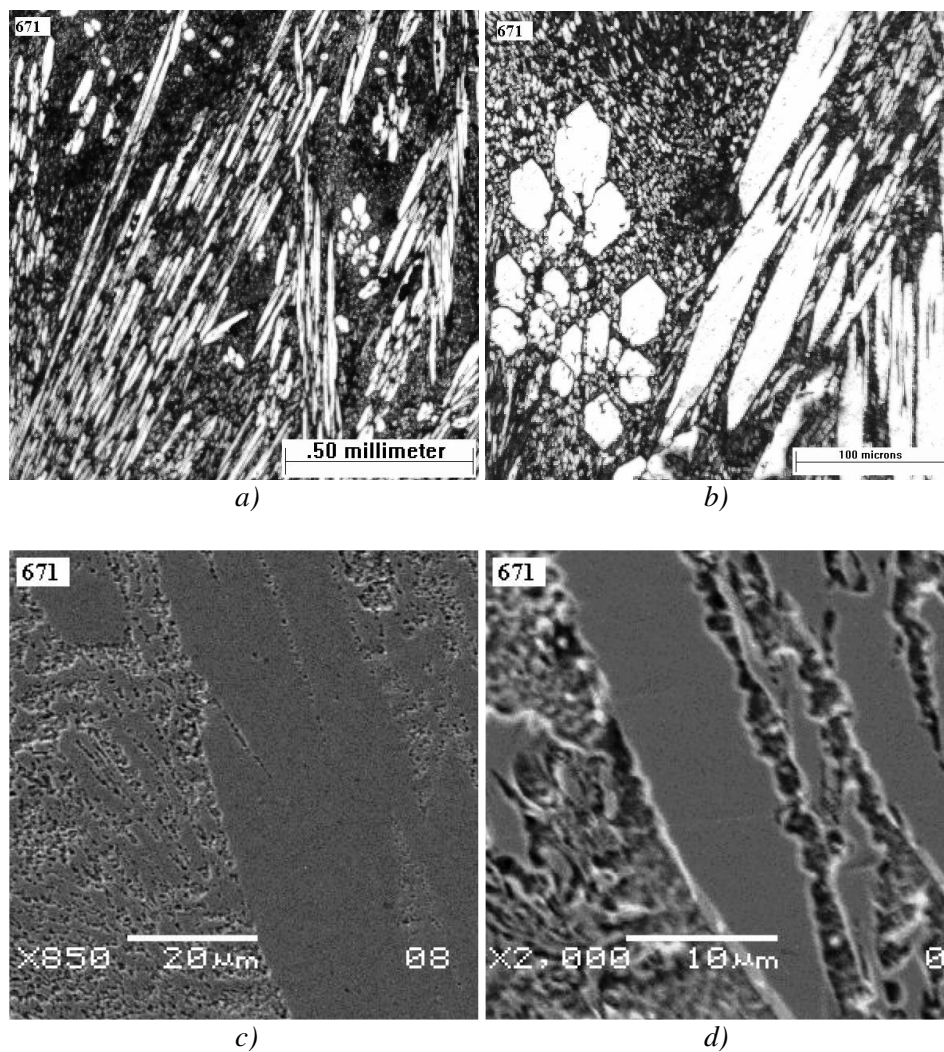
Difraktogramose karbidai gana sunkiai identifikuojami, nes sudaro nestechiometrinius junginius. Tačiau pagal gardelei būdingas difrakcinių maksimumų padėtis galima gerai identifikuoti, kaip ir aukščiau, M_7C_3 karbidą (pagal gardelę – Cr_7C_3).

3.10. Apvirintų sluoksnių optinės ir elektroninės mikroskopijos tyrimų rezultatai ir jų analizė

Apvirintų sluoksnių mikrostruktūros tyrimai atlikti: 1) nuskaitančiosios elektroninės mikroskopijos metodu. Taikytas elektroninis mikroskopas JSM 5600, kurio skiriamoji geba 3,5 nm, greitinančioji įtampa 30 kV.; 2) optinės mikroskopijos metodu. Tyrimai atlikti optiniu mikroskopu „Olympus“ su

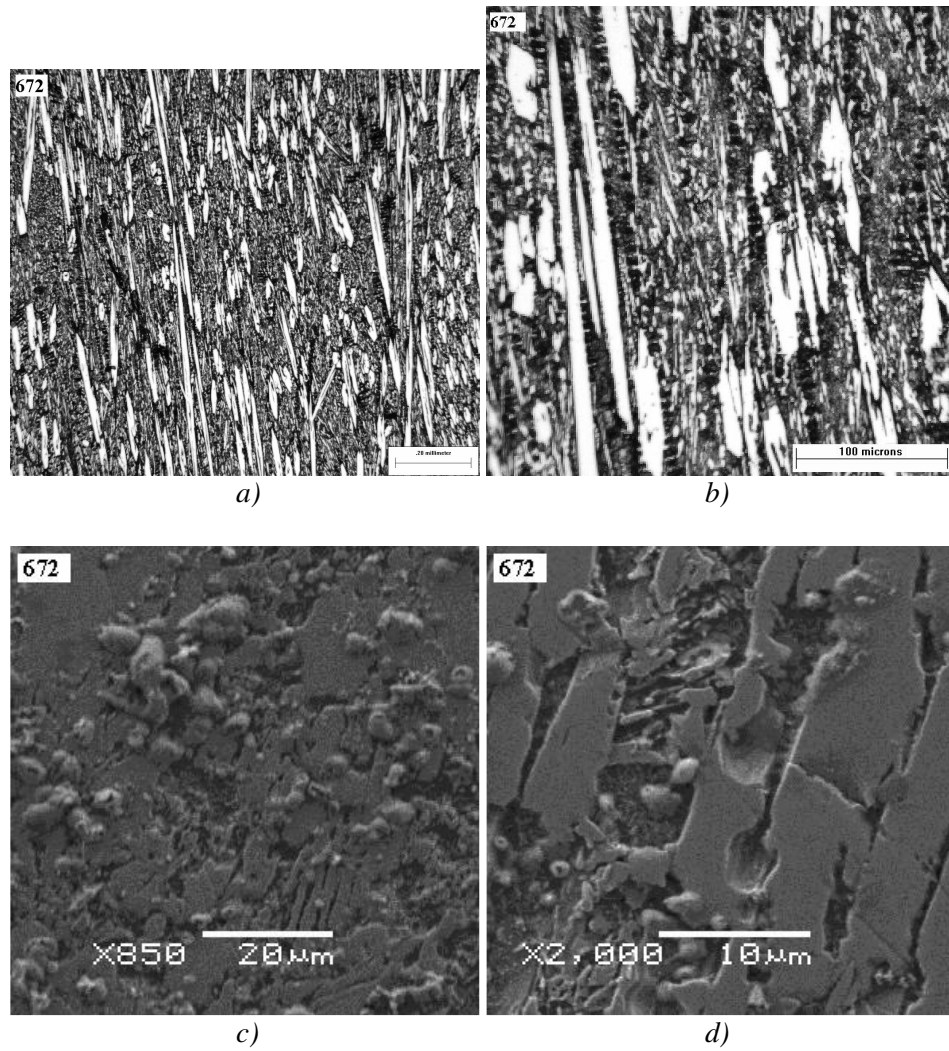
videokamera Sony DXC-151 AP ir NIH Image 1.61 kompiuterine programa.

Mikrošlifai pagaminti iš panaudotų dilimo bandinių, tad jų viršutinio sluoksnio cheminė sudėtis tokia pat, kaip atitinkamo kodo dilimo bandinio cheminė sudėtis (žr. 3.21 lentelę). Nuotraukos pateiktos 3.17–3.23 paveiksluose (*a* – didinimas 50 kartų, *b* – didinimas 200 kartų, *c* – didinimas 850 kartų, *d* – didinimas 2000 kartų; *a* ir *b* gauti optine mikroskopija, *c* ir *d* gauti nuskaitančiąja elektrone mikroskopija).



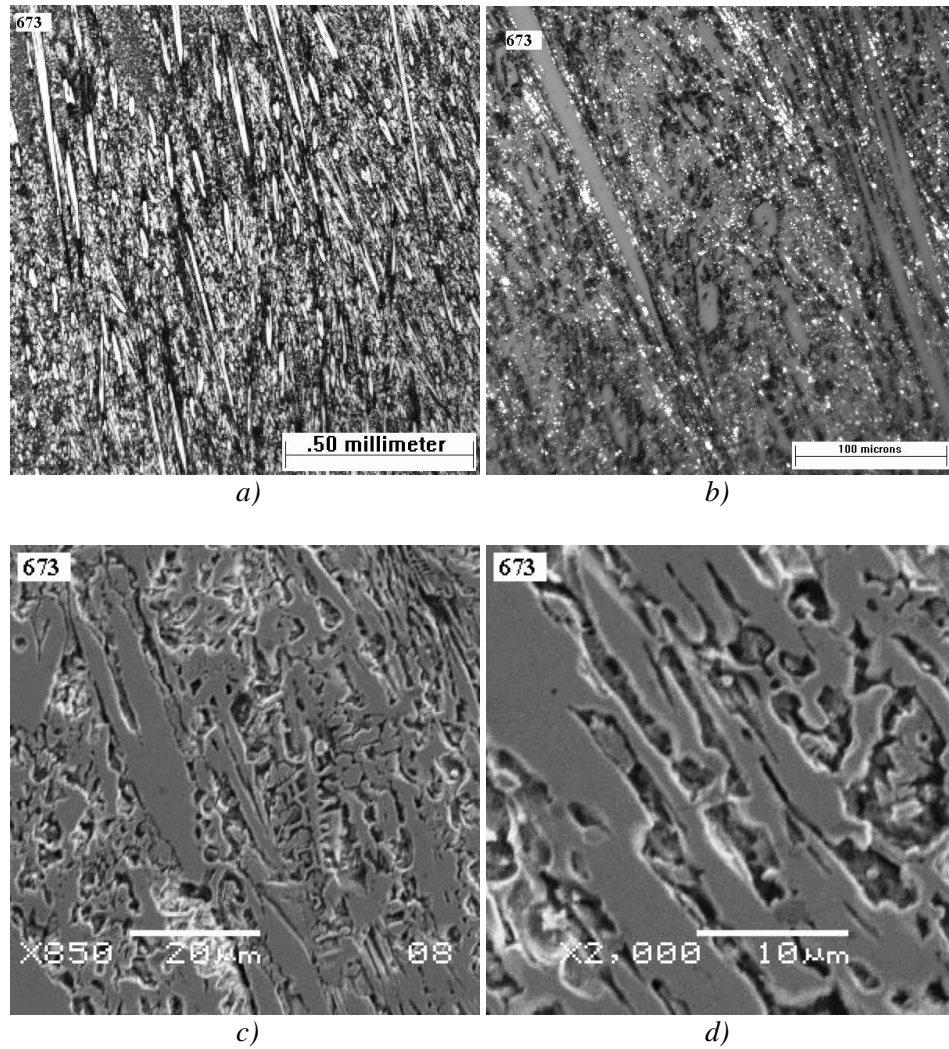
3.17 pav. Sluoksnių, apvirintų 671 kodo elektrodais, mikrostruktūra

Struktūroje matosi susidarę pirminiai karbidai (balti ilgi) ir ledeburitas. Yra didelių karbidų, sankaupų.



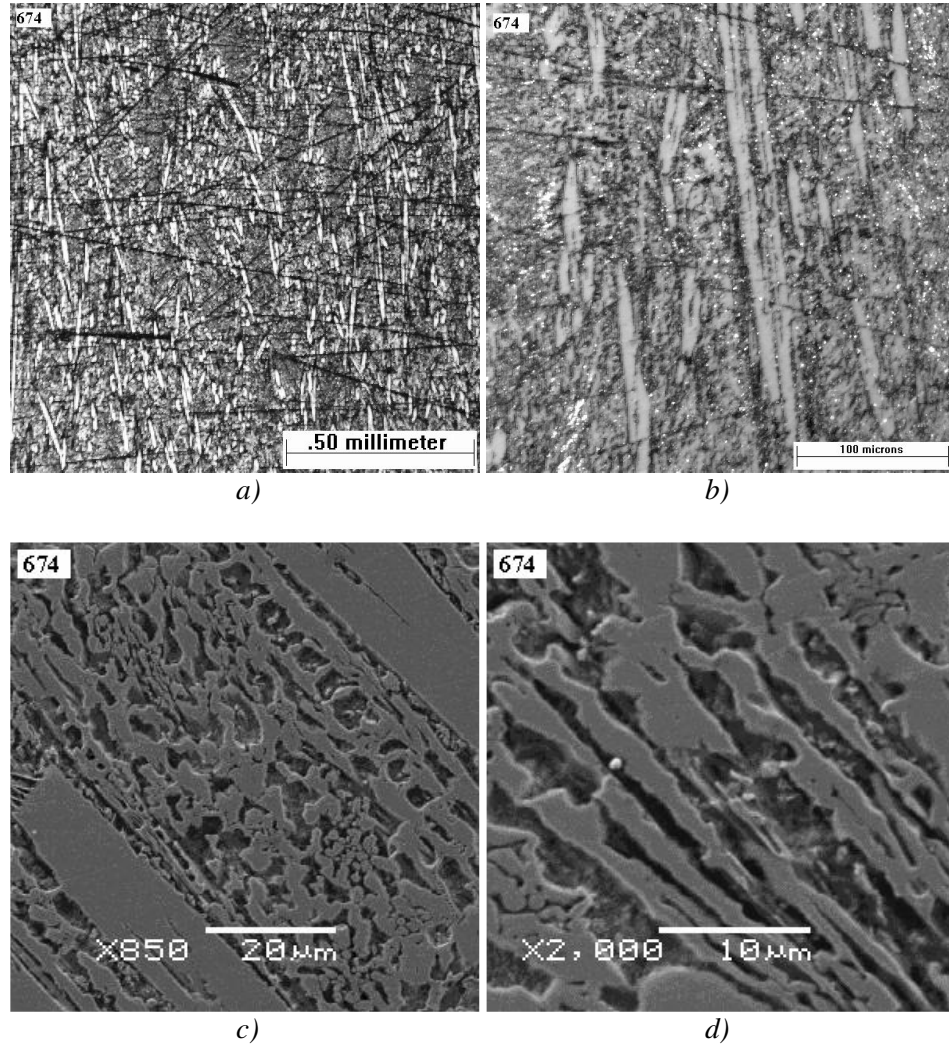
3.18 pav. *Sluoksnių, apvirintų 672 kodo elektrodais, mikrostruktūra*

Struktūroje matosi susidarę pirminiai karbidai (ilgi) ir ledeburitas. Karbidai didesnių sankaupų nesudaro.



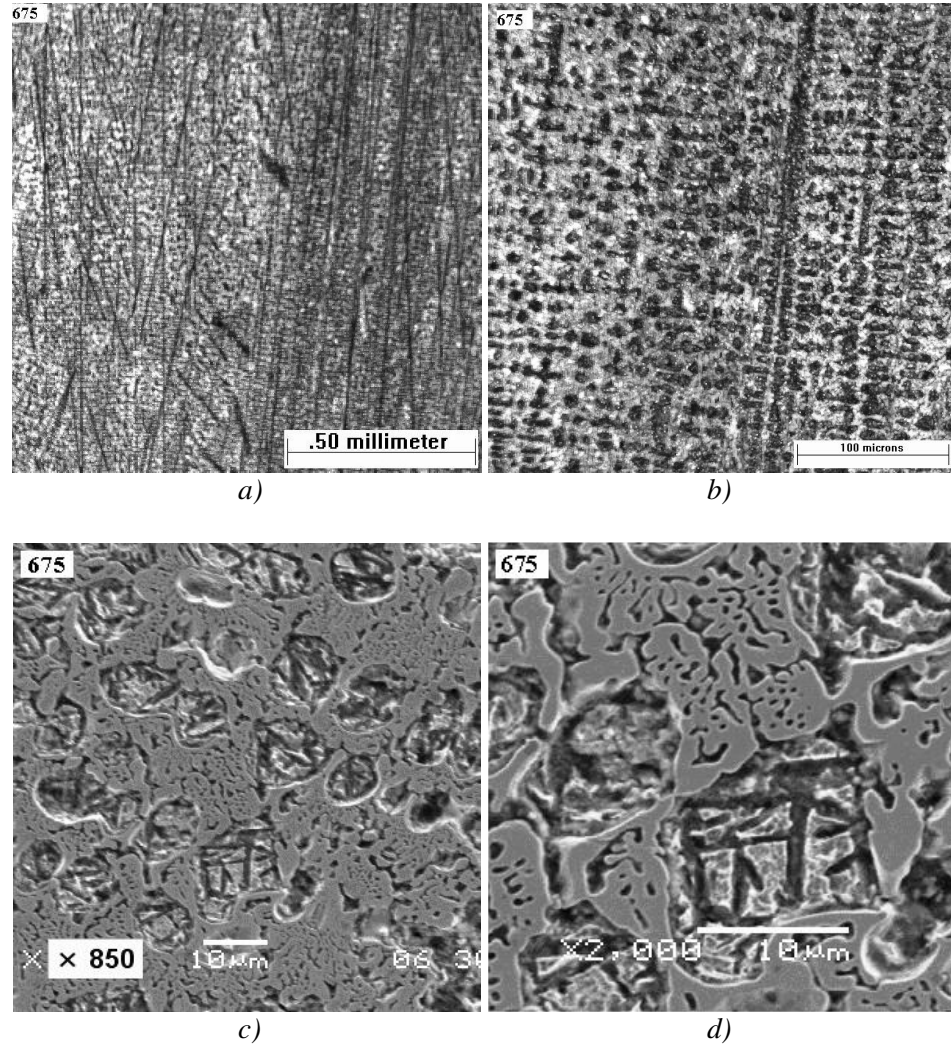
3.19 pav. *Sluoksnių, apvirintų 673 kodo elektrodais, mikrostruktūra*

Struktūroje matomi ilgi pirminiai karbidai ir ledeburitas (c ir d).



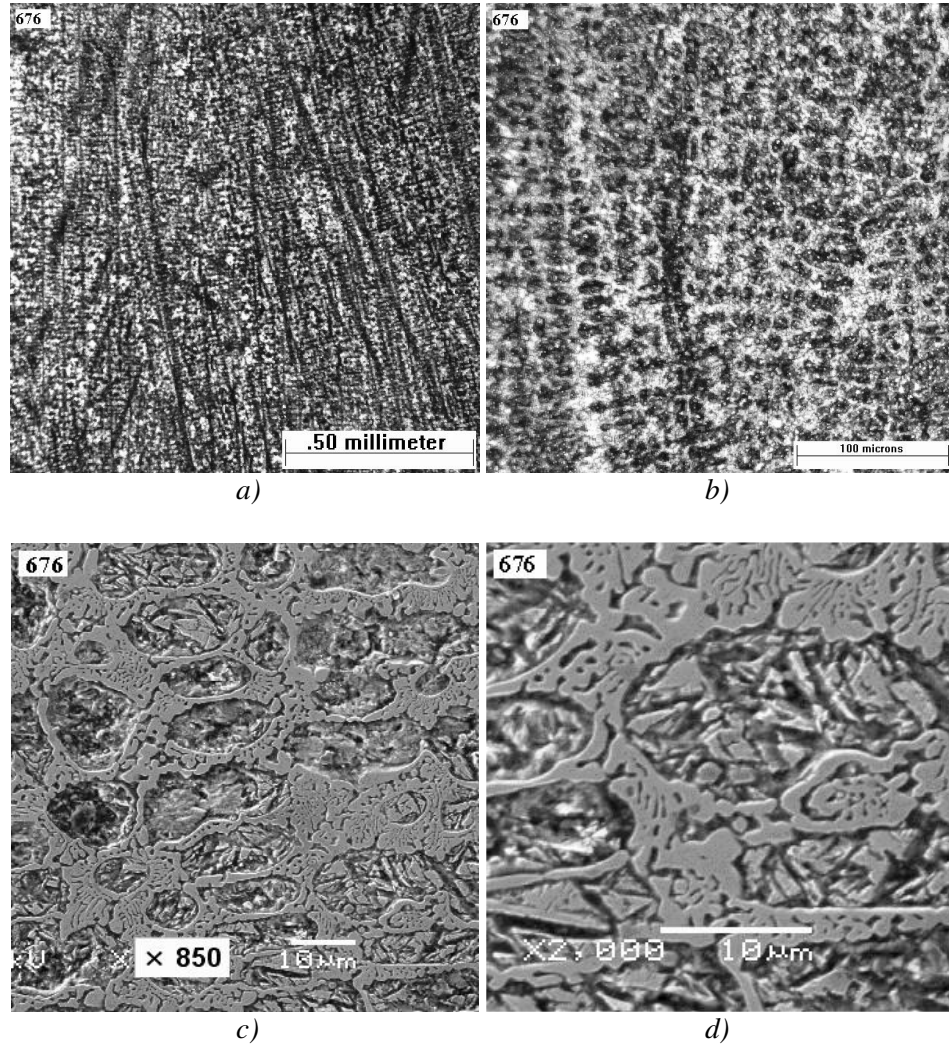
3.20 pav. *Sluoksnių, apvirintų 674 kodo elektrodais, mikrostruktūra*

Struktūroje pirminiai karbidai ir ledeburitas (c ir d).



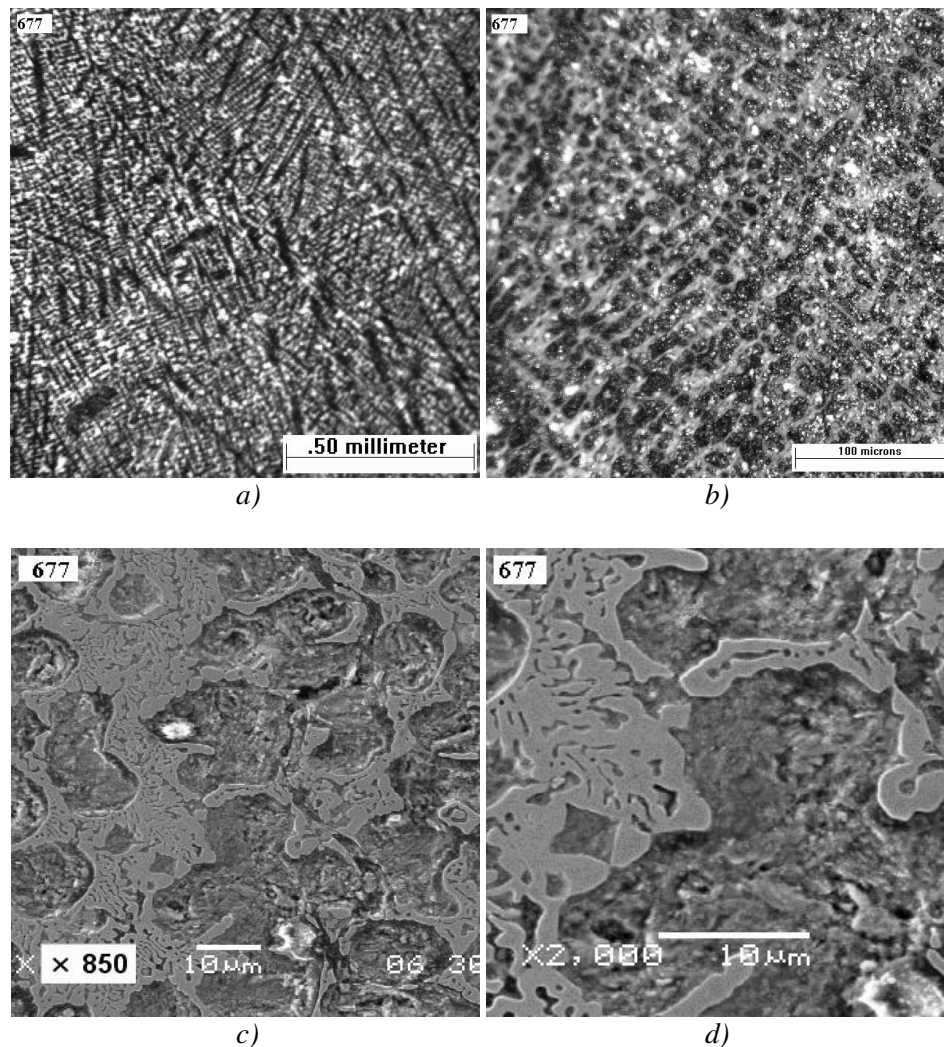
3.21 pav. *Sluoksnių, apvirintų 675 kodo elektrodais, mikrostruktūra*

Struktūroje matomas ledeburitas ir pirminės austenito fazės virsmo produktai.



3.22 pav. *Sluoksnių, apvirintų 676 kodo elektrodais, mikrostruktūra*

Struktūroje matomas ledeburitas ir pirminės austenito fazės perlitinio virsmo produktai.



3.23 pav. *Sluoksnių, apvirintų 677 kodo elektrodais, mikrostruktūra*

Struktūroje matomi ledeburitiniai karbidai perlito pagrindu. Struktūra tolygesnė, be didelių karbidų.

Apvirintų sluoksnių mikrostruktūros rodo, kad sluoksniuose, apvirintuose 671, 672 ir 673 kodų elektrodais, kuriuose anglies kiekis yra apie 3 %, o chromo – nuo 18 iki 36 %, susidaro dideli pirminiai karbidai. Kuo didesnis anglies ir chromo kiekis lydinyje, tuo karbidai yra didesni ir jų išsidėstymas yra netolygesnis, susidaro didelių karbidų sandraupos.

Sluoksnyje, apvirintame 674 kodo elektrodais, kuriame anglies yra apie 2,5 %, o chromo apie 16 %, susidaro nedideli pirminiai karbidai.

Sluoksniuose, apvirintuose 675 ir 676 kodų elektrodais, kuriuose anglies kiekis yra nuo 1,9 iki 2,2 %, o chromo – nuo 6,2 iki 9,2 %, susidaro ledeburitas ir pirminės austenito fazės virsmo produktai.

Sluoksnyje, apvirintame 677 kodo elektrodais, kuriame anglies kiekis yra 1,4 %, o chromo – 1,7 %, susidaro perlitas ir tolygus nedidelių ledeburitinių karbidų išsidėstymas.

Rentgeno spindulių difrakcinės kreivės ir mikrostruktūros rodo, kad feritas pagrindo struktūroje susidaro sluoksniuose, apvirintuose 671 ir 672 kodų elektrodais, austenitas – sluoksniuose, apvirintuose 673, 674 ir 675 kodų elektrodais. Perlitas susidaro – sluoksniuose, apvirintuose 675, 676 ir 677 kodo elektrodais.

Jei difraktograma rodo austenito buvimą, tai esant tinkleliu išsidėsčiusiems karbidams tarp karbidų yra nevirtusio perlito austenito, kurių visuma sudaro ledeburitą.

Didelis α -ferito kiekis greičiausiai su M_3C sudaro perlitą. Taigi ten, kur yra martensito sutapimas su M_3C , labiau tikėtina, kad tai yra M_3C . Didelis legiruojančiųjų elementų kiekis nustumia martensito pradžios liniją labai žemai į neigiamas temperatūras. Jo galėtų būti tuo atveju, jei austenite lydymosi metu ištirptų labai mažai legiruojančiųjų elementų, o anglies daugiau.

3.11. Abrazyvinio dilimo bandymų pagal ASTM G65 metodą rezultatų analizė

Abrazyvinio dilimo bandymams pagal ASTM G65 metodą bandiniai buvo pagaminti apvirinant pagamintais elektrodais 80×40×8 mm dydžio mažanglio plieno plokštes trimis sluoksniais. Šiuo atveju gaunama didesnė pagrindinio metalo (apvirinamo mažanglio plieno) įtaka apvirintų sluoksnių lydinių cheminei sudėčiai, negu gaminant gryno prilydyto metalo cheminės analizės bandinius, kurie buvo virinami prilydant penkis sluoksnius.

Naudoti darbo režimai: apkrova 130 N, tyrimo trukmė 20 min, dilimo kelias 2890 m. Abrazyvas – 0,2–0,425 mm frakcijos kvarcinis smėlis. Atsparumo dilimui etalonu (vienetu) panaudotas grūdintas boru mikrolegiruotas plienas 38MnB5 (C 0,39 %, Si 0,17 %, Mn 1,26 %, Cr 0,19 %, B 0,002 %), 52 HRC.

Apvirintų sluoksnių cheminė sudėtis pateikta 3.21 ir 3.22 lentelėse.

Abrazyvinio dilimo tyrimų ir kiečio matavimo rezultatai pateikti 3.23 ir 3.24 lentelėse, bei 3.24 ir 3.25 paveiksluose

Lydinio legiruojančiųjų elementų įtaka apvirintų sluoksnių nudilimui pateikta 3.26–3.29 paveiksluose.

3.21 lentelė. *Abrazyvinio dilimo bandinių, apvirintų 671–677 kodų elektrodais trimis sluoksniais, cheminės sudėtys bei [Cr/C] parametras*

Elektrodo kodas	Cheminė sudėtis, %						Parametras [Cr/C]
	C	Si	Mn	Cr	Ti	B	
671	3,14	1,76	0,74	36,72	0,267	0,655	11,7
672	2,83	2,79	1,18	20,79	0,777	0,718	7,3
673	2,96	2,50	1,14	17,74	0,727	0,722	6,0
674	2,56	2,37	1,31	16,46	0,899	0,705	6,4
675	2,23	2,34	1,19	9,70	0,826	0,733	4,3
676	1,95	2,01	1,02	6,22	0,779	0,705	3,2
677	1,45	1,79	1,03	1,75	0,604	0,584	1,2

3.22 lentelė. *Abrazyvinio dilimo bandinių, apvirintų 680–688 kodų elektrodais trimis sluoksniais, cheminės sudėtys bei [C+B] parametras*

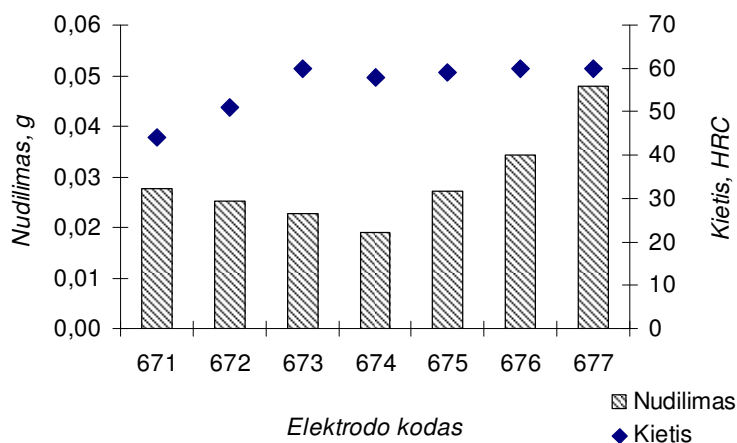
Elektrodo kodas	Cheminė sudėtis, %						Parametras [C+B]
	C	Si	Mn	Cr	Ti	B	
680	3,34	2,11	0,89	15,2	1,10	0,76	4,10
681	3,06	2,45	0,92	19,5	1,12	0,87	3,94
682	2,74	2,19	1,09	18,3	1,04	0,88	3,62
683	2,96	2,50	1,14	17,7	0,73	0,72	3,68
684	2,41	1,72	1,21	20,3	0,48	0,79	3,19
685	1,76	2,03	1,11	20,5	0,23	0,77	2,52
686	1,13	2,12	1,05	19,0	0,17	0,72	1,86
687	0,54	2,17	1,17	21,5	0,19	0,83	1,37
688	0,13	2,26	0,97	21,3	0,08	0,75	0,89

3.23 lentelė. *Sluoksnių, apvirintų 671–677 kodų elektrodais, abrazyvinio dilimo bandymų ir kietio matavimo rezultatai*

Elektrodo kodas	Nudilimas, g	Santykinis atsparumas dilimui	Kietis, HRC
671	0,0277	6,47	44
672	0,0253	7,11	51
673	0,0228	7,88	60
674	0,0191	9,43	58
675	0,0271	6,63	59
676	0,0344	5,22	60
677	0,0480	3,74	60

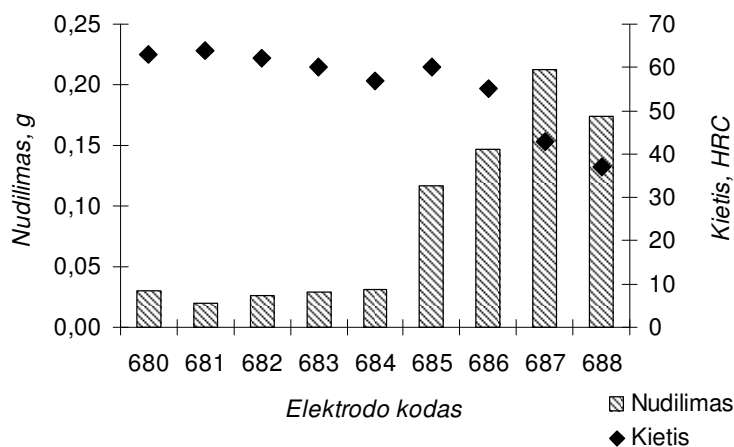
3.24 lentelė. *Sluoksnių, apvirintų 680–688 kodų elektrodais, abrazyvinio dilimo bandymų ir kietio matavimo rezultatai*

Elektrodo kodas	Nudilimas, g	Santykinis atsparumas dilimui	Kietis, HRC
680	0,0307	5,85	63
681	0,0202	8,91	64
682	0,0260	6,91	62
683	0,0288	6,24	60
684	0,0310	5,79	57
685	0,1166	1,54	60
686	0,1473	1,22	55
687	0,2120	0,85	43
688	0,1739	1,03	37



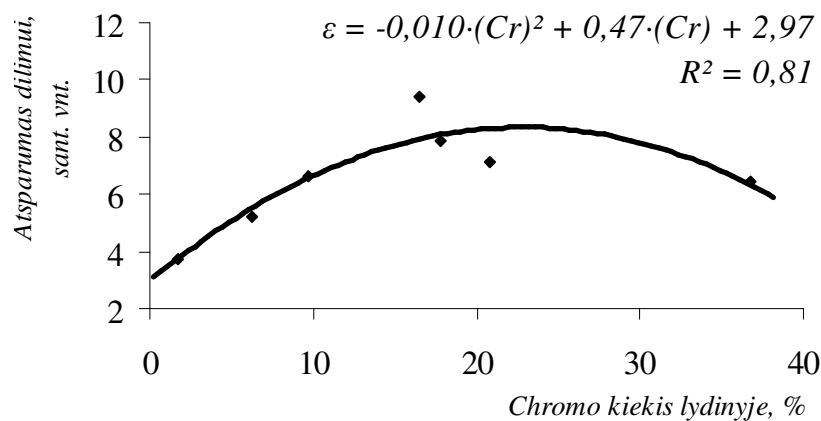
3.24 pav. *Sluoksnių, apvirintų 671–677 kodų elektrodais, kietis ir nudilimas esant abrazyviniam dilimui*

Maksimalus nudilimas atliekant sluoksnių, apvirintų 671–677 elektrodais tyrimus gautas, esant minimaliam chromo ir anglies kiekiams – 671 kodo elektrodas. Didėjant lydynyje chromo kiekiui iki 17 % ir anglies – iki 2,7 % (674 kodo elektrodas), jų nudilimas palaipsniui mažėja. Toliau didėjant chromo kiekiui, anglies kiekis keičiasi (didėja) labai nežymiai. Todėl kietojo sluoksnio atsparumas dilimui pradeda mažėti. To priežastimi yra laisvas chromas, kurio gryno atsparumas dilimui yra nežymiai didesnis už geležies. Todėl nesant galimybės į lydinį įterpti pakankamo anglies kiekio (iki 4–4,5 %), netikslinga didinti ir chromo, kaip legiruojančiojo elemento komponento, kiekio.



3.25 pav. Sluoksnių, apvirintų 680–688 kodų elektrodais, kietis ir nudilimas esant abrazyviniam dilimui

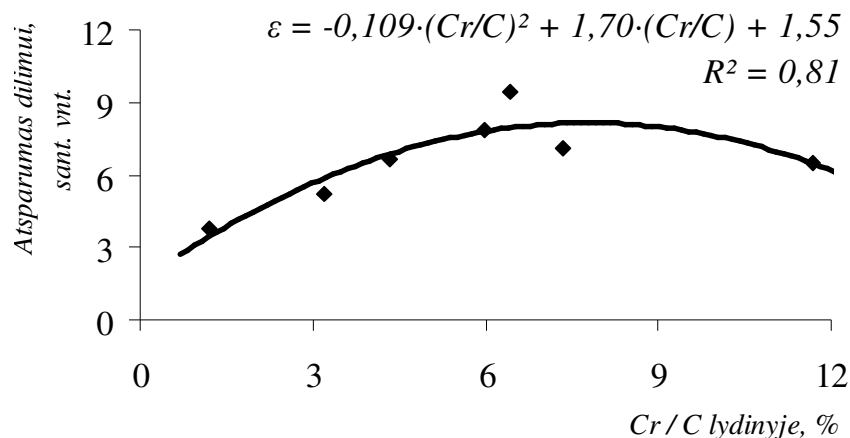
Nustatyta, kad Fe-C-Cr lydinų atsparumas dilimui priklauso ne tik nuo šių elementų kiekio lydinuose, bet ir nuo šių elementų tarpusavio proporcijų, ypač chromo ir anglies. Chromo ir anglies kiekių didėjimas didina kietį, tuo pačiu atsparumą dilimui. Tačiau lydinys tampa trapesniu. Lydinio trapumą padidina ir padidintas boro kiekis.



3.26 pav. Chromo kiekio įtaka kietųjų sluoksnių nudilimui

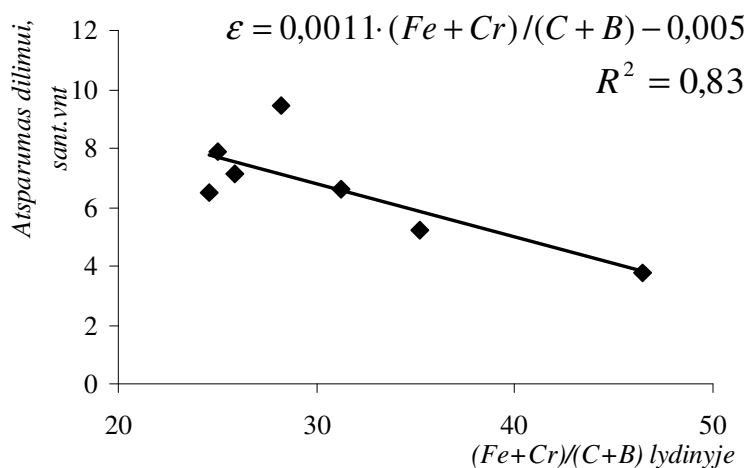
Atsparumas dilimui (tiek tiesioginiais vienetais [g], tiek ir santykiniais vienetais [ε]) yra įtakojamas ir chromo kiekio, ir chromo bei anglies kiekių santykio. Pastarasis lemia chromo karbidų kiekį (CrC, 13000–16000 MPa) lydinyje ir yra labiausiai atsparumą dilimui įtakojantis komponentas. Abiem

atvejais chromo kiekio bei chromo ir anglies kiekių santykio įtaką santykiniam atsparumui dilimui apibūdina antro laipsnio polinominės lygtys (3.26 ir 3.27 paveikslai).



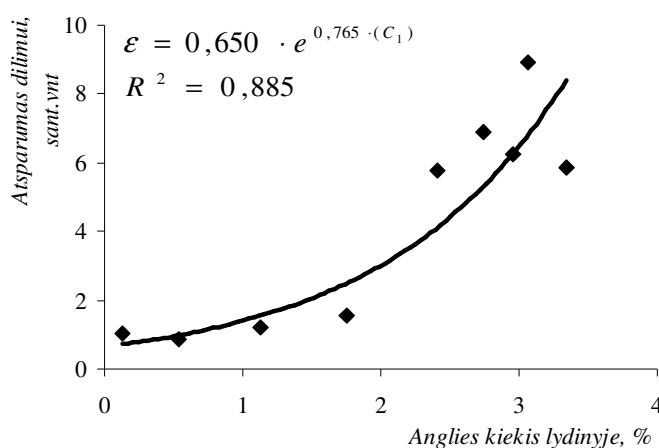
3.27 pav. Chromo ir anglies kiekių santykio įtaka kietųjų sluoksnių nudilimui

Pagal tyrimų rezultatus tikslingiausia lydinių sudėties optimizacijos tyrimus tęsti esant nuo 16 iki 30 % chromo kiekiams bei esant nuo 6 iki 10 chromo ir anglies santykiui.



3.28 pav. Kietųjų sluoksnių $([Fe+Cr]/[C+B])$ sudėties įtaka nudilimui

Kietųjų sluoksnių dilimą pakankamai tiksliai apibūdina sluoksnių komponentų (Fe+Cr) ir (C+B) santykis intervale 25...45. Kuo šis santykis yra mažesnis, tuo santykinis atsparumas dilimui yra didesnis (3.28 paveikslas). Tai paaiškinama lydinyje didėjančiu karbidų bei boridų kiekiu – Fe_3C , CrC, Fe_2B ar FeB, kurie savo savybėmis (kiečiu) yra pakankamai artimi.



3.29 pav. Anglies kiekio įtaka kietųjų sluoksnių Fe-C-Cr-B nudilimui

Apvirintuose sluoksniuose didėjantis anglies kiekis (iki 3,5...4 %) pagal eksponentinę funkciją didina santykinį atsparumą dilimui (3.29 paveikslas). Kai anglies kiekis pasiekia 2,4 % (680–683 sluoksnių kietis 60...63 HRC), santykinis atsparumas dilimui itin padidėja. Toks pokytis paaiškinamas kietojo sluoksnių ir abrazyvo (SiO_2 , 10–11 GPa) kiečių santykio vienodėjimu, o taip pat karbidinės fazės kietajame sluoksnyje didėjimu.

Palyginus sluoksnių, apvirintų kuriamais glaistytaisiais elektrodais, difrakcinės fazinės analizės, apvirintų sluoksnių mikroskopijos tyrimų ir abrazyvinio dilimo bandymų rezultatus, matome, kad didžiausias atsparumas dilimui gaunamas, kuomet karbidai nėra dideli, jie išsidėstę tolygiai, nesudaro sankaupų, o pagrindo mikrostruktūroje susidaro ledeburitas ir yra nedidelis kiekis austenito.

3.12. Sukurtų elektrodų virinimo technologinių savybių vertinimas

Atliktas sukurtų apvirinimo elektrodų virinimo technologinių savybių vertinimas. Tam tikslui naudoti standartiniai glaistytųjų elektrodų virinimo

technologinių savybių vertinimo bandymai, kurio metu patikrinta:

- lanko užsidegimas;
- lanko degimo stabilumas;
- elektrodo metalinio strypelio ir glaisto lydymosi tolygumas;
- metalo ištaškymas;
- siūlės rumbelės formavimasis;
- šlako luobelės išvaizda;
- šlako luobelės atsiskyrimas;
- siūlės išvaizda;
- įvirinimas;
- porų susidarymas.

Bandymai atlikti naudojant kintamosios ir nuolatinės srovės maitinimo šaltinius.

Nustatyta, kad sukurtų apvirinimo elektrodų virinimo technologinės savybės atitinka glaistytiesiems elektrodams keliamus reikalavimus.

Nustatyta, kad parinkta $TiO_2 - SiO_2 - CaO$ šlako sistema ir jos sudėtinių dalių proporcijos yra tinkama apvirinimo elektrodų gamybai

Lietuvoje turimų žaliavų – klinties ir kvarcinio smėlio – kokybė atitinka suvirinimo elektrodų gamybai naudojamų žaliavų kokybės reikalavimus.

3.13. Sukurtų apvirinimo elektrodų panaudojimo galimybės

Sukurti ir gaminami trijų markių apvirinimo elektrodai:

- 1) elektrodai, kuriais apvirinti sluoksniai įgauna vidutinio atsparumo abrazyviniam poveikiui ir didelėms smūginėms apkrovoms savybes;
- 2) elektrodai, kuriais apvirinti paviršiai gali būti naudojami intensyvaus abrazyvinio poveikio aplinkoje;
- 3) elektrodai, kuriais apvirinti sluoksniai pasižymi atsparumo korozijai savybėmis, taip pat gali būti naudojami barjerinių sluoksnių sudarymui prieš apvirinant kietaisiais sluoksniais.

Sukurtų apvirinimo elektrodų aprašymai pateikti B priede, sukurtiems elektrodams suteikti atitikties sertifikatai pateikti C priede.

Sukurti apvirinimo elektrodai gali būti naudojami:

- žemės ūkio mašinų (dirvos dirbimo mašinų kaltai ir noragai),
- kalnakasybos mašinų darbinių dalių,
- uolienų smulkinimo mechanizmų žiaunų,
- žemės kasimo, statybos mašinų kaušų bei dantų,
- smėliasvaidžių menčių, siurblių rotorių bei darbo ratų apvirinimui.

3.14. Trečiojo skyriaus išvados

1. Chromo perėjimas iš elektrodo į prilydomą metalą tirtame 0–40 % intervale turi tiesinį pobūdį. Esant lydinyje 20–26 % chromo, kitų cheminių elementų įsisavinimas į lydinį yra didžiausias. Chromo kiekiui keičiantis nuo 20 % iki 40 %, anglies kiekis praktiškai nekinta – lydinys anglį įsisavina maksimaliai. Anglies įsisavinimo koeficientas, esant lydinyje pakankamai chromo, yra lygus 0,557. Mažėjant chromo kiekiui (nuo 20 %), tiesiškai mažėja anglies įsisavinimas į lydinį, nes anglis išdega ir, kaip rodo šlako rentgeno spindulių difrakcinė analizė, pereina į šlaką.

2. Didėjant anglies kiekiui lydinyje, ženkliai didėja titano įsisavinimas. Kitų elementų įsisavinimui anglies kiekis lydinyje įtakos neturi.

3. Chromo kiekio bei chromo ir anglies kiekių santykio įtaką santykiniam atsparumui dilimui apibūdina antro laipsnio polinominės lygtys. Didžiausias lydinio atsparumas dilimui pasiekiamas esant lydinyje nuo 16 iki 30 % chromo bei esant nuo 6 iki 10 chromo ir anglies kiekių santykiui.

4. Kietųjų sluoksnių dilimą tiksliai apibūdina sluoksnio komponentų (Fe+Cr) ir (C+B) santykis. Kuo šis santykis (intervale 25...45) yra mažesnis, tuo dilimas mažesnis.

5. Anglies kiekio įtaką Fe–C–Cr–B kietųjų sluoksnių abrazyviniam dilimui geriausiai aprašo eksponentinė funkcija $\varepsilon = 0,650 \cdot e^{0,765 \cdot (C_1)}$.

Rezultatų apibendrinimas ir išvados

1. Eksperimentais patvirtinta, kad detalių, kurios yra eksploatuojamos abrazyvinio ir smūginio-abrazyvinio poveikio sąlygomis, paviršių apvirinimui reikalinga optimali konkrečioms poveikio sąlygoms struktūrinė-fazinė prilydyto metalo sudėtis. Nustatyta, kad didžiausias atsparumas dilimui gaunamas, kuomet nedideli karbidai išsidėstę tolygiai, nesudaro sankaujų, o pagrindo mikrostruktūroje susidaro ledeburitas ir austenitas.

2. Nustatyta, kad chromo perėjimas iš elektrodo į prilydomą metalą (tirtame 0–40 % intervale) turi tiesinį pobūdį. Esant lydinyje 20–26 % chromo, visų kitų legiruojančiųjų elementų įsisavinimas į lydinį yra didžiausias. Chromo kiekiui keičiantis nuo 20 % iki 40 %, anglies kiekis praktiškai nekinta – lydinys anglį įsisavina maksimaliai. Anglies įsisavinimo koeficientas, esant lydinyje pakankamai chromo, yra lygus 0,557. Mažėjant chromo kiekiui (nuo 20 %), tiesiškai mažėja anglies įsisavinimas į lydinį, nes anglis išdega ir, kaip rodo šlako rentgeno spindulių difrakcinė analizė, iš dalies pereina į šlaką.

3. Eksperimentais nustatyta, kad didėjant anglies kiekiui lydinyje nuo 0,2 iki 4 %, ženkliai didėja titano įsisavinimas (nuo 0,06 iki 1,3 %). Kitų elementų įsisavinimui anglies kiekis lydinyje įtakos neturi.

4. Atlikus apvirintų sluoksnių cheminės analizės ir atsparumo dilimui tyrimus, nustatyta, kad chromo kiekio bei chromo ir anglies kiekių santykio įtaką santykiniam atsparumui dilimui apibūdina antro laipsnio polinominės lygtys.

Didžiausias lydinio atsparumas dilimui pasiekiamas esant lydinyje nuo 16 iki 30 % chromo bei esant nuo chromo ir anglies kiekių santykiui ($Cr/C = 6-10$).

5. Atlikus tyrimus paaiškėjo, kad apvirinto sluoksnio atsparumą dilimui tiksliausiai atspindi sluoksnio metalo legiruojančiųjų elementų (Fe+Cr) ir (C+B) santykis. Kuo šis santykis (intervale 25...45) yra mažesnis, tuo dilimas mažesnis.

6. Nustatyta, kad anglies kiekio įtaką Fe–C–Cr–B kietųjų sluoksnių abrazyviniam dilimui geriausiai aprašo eksponentinė funkcija $\varepsilon = 0,650 \cdot e^{0,765 \cdot (C_1)}$.

7. Išnagrinėjus dilimo matavimo metodus, matyti, kad nė vienas iš jų nėra universalus, todėl negalima palyginti įvairiuose literatūros šaltiniuose teikiamų atsparumo dilimui duomenų, nes jie priklauso nuo mechanizmo konstrukcijos, geometrinės formos, matmenų ir detalių judėjimo kinematikos. Kaskart reikia parinkti, o kartais ir sukurti tinkamiausią metodą, matavimo aparatūrą ir įrenginius.

8. Sukurtų glaistytųjų elektrodų panaudojimas apvirinant specialių savybių lydinio yra ekonomiškai tikslingas, nes leido sumažinti elektrodo savikainą bei gauti ženklų technologinį efektą. Elektrodų savikainos sumažėjimas pasiektas glaisto komponentams panaudojus vietines žaliavas, kurios yra ženkliai pigesnės nei importuojamos, ir mažaanglią nelegiruotą vielą, kuri yra pigesnė už legiruotą.

Sukūrus naujus apvirinimo elektrodus, įmonė gali rinkai pasiūlyti geresnių techninių charakteristikų pigesnę produktą, tokiu būdu padidindama savo produkto konkurencingumą, arba gali pasiūlyti rinkai šį produktą už tą pačią kainą padidindama pelno maržą, o produkto konkurencingumą padidindama pagerintų technologinių savybių dėka.

9. Tyrimų išdavoje sukurti ir jau pramoniniais kiekiais gaminami trijų markių apvirinimo elektrodai:

- 1) elektrodai, kuriais apvirinti sluoksniai įgauna vidutinio atsparumo abrazyviniam poveikiui ir didelėms smūginėms apkrovoms savybes (nuo 2005 m. kovo mėn. pagaminta 20 tonų);
- 2) elektrodai, kuriais apvirinti paviršiai gali būti naudojami intensyvaus abrazyvinio poveikio aplinkoje (nuo 2006 m. balandžio mėn. pagamintos 4 tonos);
- 3) elektrodai, kuriais apvirinti sluoksniai pasižymi atsparumo korozijai savybėmis, taip pat gali būti naudojami barjerinių sluoksnių sudarymui prieš apvirinant kietaisiais sluoksniais (nuo 2007 m. balandžio mėn. pagaminta 0,5 tonos).

Literatūros sąrašas

- [1] Витязь, П. А.; Ивашко, В. С.; Ильющенко, А. Ф. и др. *Теория и практика нанесения защитных покрытий*. Минск: Белорусская наука, 1998. 170 с.
- [2] Bhakat, A. K.; Mishra, A. K.; Mishra, N. S. Characterization of wear and metallurgical properties for development of agricultural grade steel suitable in specific soil conditions. *Wear*, 2007, Vol. 263, p. 228–233.
- [3] Fleming, D.; Metco, S. *Waste wear – extending landfill equipment life*. Milford, 2005. 13 p.
- [4] Sapate, S. G.; RamaRao, A. V. Effect of material hardness on erosive wear behavior of some weld-deposited alloys. *Materials and Manufacturing Processes*, 2002, Vol. 17, No. 2, p. 187–198.
- [5] Fernandez, J. E.; Vijande, R.; Tucho, R.; Rodriguez, J.; Martin, A. Effect of cold deformation on the abrasive resistance of coatings with applications in the mining industry. *Wear*, 2001, Vol. 250, p. 28–31.
- [6] Xu, L.; Xing, J.; Wei, S.; Zhang, Y.; Long, R. Study on relative wear resistance and wear stability of high-speed steel with high vanadium content. *Wear*, 2007, Vol. 262, p. 253–261.

- [7] Jonaitis, L.; Žeromskas, R. *Mašinų patikimumas*. Vilnius: Mokslas, 1988, 157 p.
- [8] Serapinas, V. *Tribologiniai procesai kinematinėse porose*. Kaunas: Technologija, 1999, 362 p.
- [9] Giacchi, J. V.; Martinez, R. A.; Martinez Gamba, M. R.; Dommarco, R. C. Abrasion and impact properties of partially chilled gray iron. *Wear*, 2007, Vol. 262, p. 282–291.
- [10] Radhakrishnan, G.; Adams, P. M.; Robertson, R.; Cole, R. Integration of wear-resistant titanium carbide coatings into MEMS fabrication processes. *Tribology Letter*, 2000, Vol. 8, p. 133–137.
- [11] Xu, Z.; Li, L. Wear behavior of austenite steel matrix composite reinforced by in situ granular eutectics in impact abrasion. *Materials Science and Engineering, Part A*, 2006, Vol. 428, p. 256–261.
- [12] Kuyucak, S.; Llewellyn, R. *High-chrome white irons incorporating ultra-hard carbide-forming elements for improved wear-resistance*. Paper 06–097(05), AFS Transactions 2006 © American Foundry Society, Schaumburg, IL USA. 23 p.
- [13] Katsuki, F.; Watari, K.; Tahira, H.; Umino, M. Abrasive wear behavior of a pearlitic (0.4 % C) steel microalloyed with vanadium. *Wear*, 2008, Vol. 264, p. 331–336.
- [14] Hussainova, I.; Pirso, J.; Antonov, M.; Juhani, K.; Letunovits, S. Erosion and abrasion of chromium carbide based cermets produced by different methods. *Wear*, 2007, Vol. 263, p. 905–911.
- [15] Bermudez, M.-D.; Carrion, F. J.; Martinez–Nicolas, G.; Lopez, R. Erosion-corrosion of stainless steels, titanium, tantalum and zirconium. *Wear*, 2005, Vol. 258, p. 693–700.
- [16] Cozza, R. C.; de Mello, J. D. B.; Tanaka, D. K.; Souza, R. M. Relationship between test severity and wear mode transition in micro-abrasive wear tests. *Wear*, 2007, Vol. 263, p. 111–116.
- [17] Gates, J. D.; Gore, G. J.; Hermand, M. J.-P.; Guerineau, M. J.-P.; Martin, P. B.; Saad, J. The meaning of high stress abrasion and its application in white cast iron. *Wear*, 2007, Vol. 263, p. 6–35.

- [18] Khizhnyak, V. G.; Korol, V. I.; Kostenko, A. D. Wear resistance of carbide and boride coatings on U8A steel. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2003, Vol. 42, Nos. 11–12, p. 644–648.
- [19] Lee, K.-Y.; Ko, K. H.; Kim, J. H.; Kim, G. G.; Kim, S.-J. Effects of temperature and sliding distance on the wear behavior of austenitic Fe-Cr-C-Si hardfacing alloy. *Tribology Letters*, 2007, Vol. 26, No. 2, p. 131–135.
- [20] Lee, K.-Y.; Lee, S.-H.; Kim, Y.; Hong, H. S.; Oh, Y.-M.; Kim, S.-J. The effects of additive elements on the sliding wear behavior of Fe-base hardfacing alloys. *Wear*, 2003, Vol. 255, p. 481–188.
- [21] Savulyak, V. I.; Zhukov, A. A.; Shilina, E. P.; Arkhipova, T. F. Obtaining wear-resistant high-carbon surface layers on steel and cast iron. *Metal Science and Heat Treatment*, 1997, Vol. 39, No. 11–12, p. 523–524.
- [22] Kumar, S.; Mondal, D. P.; Khaira, H. K.; Jha, A. K. Improvement in high stress abrasive wear property of steel by hardfacing. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1999, Vol. 8(6), p. 711–715.
- [23] Jha, A. K.; Prasad, B. K.; Dasgupta, R.; Modi, O. P. Influence of material characteristics on the abrasive wear response of some hardfacing alloys. *Journal of materials engineering and performance*, 1999, Vol. 8, No. 2, p. 190–196.
- [24] Wu, W.; Wu, L.-T. The wear behavior between hardfacing materials. *Metallurgical and Materials Transactions, Part A*, 1996, Vol. 27, p. 3639–3648.
- [25] Dasgupta, R.; Prasad, B. K.; Jha, A. K.; Modi, O. P.; Das, S.; Yegneswaran, A. H. Low stress abrasive wear behavior of a hardfaced steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1998, Vol. 7, No. 2, p. 221–226.
- [26] Sapate, S. G.; RamaRao, A. V. Effect of carbide volume fraction on erosive wear behaviour of hardfacing cast irons. *Wear*, 2004, Vol. 256, p. 774–786.
- [27] Sapate, S. G.; RamaRao, A. V. Erosive wear behaviour of weld hardfacing high chromium cast irons: effect of erodent particles. *Tribology International*, 2006, Vol. 39, p. 206–212.

- [28] Kim, Ch. K.; Lee, S.; Jung, J.-Y.; Ahn, S. Effects of complex carbide fraction on high-temperature wear properties of hardfacing alloys reinforced with complex carbides. *Materials Science and Engineering, Part A*, 2003, Vol. 349, p. 1–11.
- [29] Suchanek, J.; Smrkovský, J.; Blaškovič, P.; Grinberg, N. A. Erosive and hydroabrasive resistance of hardfacing materials. *Wear*, 1999, Vol. 233–235, p. 229–236.
- [30] *Обеспечение износостойкости изделий. Повышение долговечности поверхностей, изнашиваемых в условиях низких температур, методами наплавки. Методические рекомендации МР 244-87.* Москва, 1987. 27 с.
- [31] *Сварочные материалы для ремонта и наплавки: Справочник* / Пер. с англ. Г. В. Домаша. Минск: Изд-во В. М. Скакуна, 2001. 124 с.
- [32] Мозберг, Р. К. *Материаловедение.* Москва: Высшая школа, 1991. 448 с.
- [33] Сидоров, А. И. *Восстановление деталей машин напылением и наплавкой.* Москва: Машиностроение, 1987, 192 с.
- [34] Толстов, И. А.; Семиколенных, М. Н.; Баскаков, Л. Б.; Коротков, В. А. *Износостойкие наплавочные материалы и высокопроизводительные методы их обработки.* Москва: Машиностроение, 1992. 224 с.
- [35] Хасуи, А.; Моригаки, О. *Наплавка и напыление* / Пер. с яп. В. Н. Попова. Под ред. В. С. Степина, Н. Г. Шестеркина. Москва: Машиностроение, 1985. 240 с.
- [36] Lee, K.-Y.; Kim, G. G.; Kim, J. H.; Lee, S.-H.; Kim, S.-J. Sliding wear behavior of hardfacing alloys in a pressurized water environment. *Wear*, 2007, Vol. 262, p. 845–849.
- [37] Yao, M. X.; Wu, J. B. C.; Xie, Y. Wear, corrosion and cracking resistance of some W- or Mo-containing Stellite hardfacing alloys. *Materials Science and Engineering, Part A*, 2005, Vol. 407, p. 234–244.
- [38] Ohriner, E. K.; Wada, T.; Whelan, E. P.; Ocken, H. The chemistry and structure of wear-resistant, iron-base hardfacing alloys. *Metallurgical and Materials Transactions, Part A*, 1991, Vol. 22, p. 983–991.

- [39] Kumar, S.; Mondal, D. P.; Jha, A. K. Effect of microstructure and chemical composition of hardfacing alloy on abrasive wear behavior. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2000, Vol. 9, No. 6, p. 649–655.
- [40] Atamert, S.; Bhadeshia, H. K. D. H. Comparison of the microstructures and abrasive wear properties of stellite hardfacing alloys deposited by arc welding and laser cladding. *Metallurgical Transactions, Part A*, 1989, Vol. 20, p. 1037–1054.
- [41] Chatterjee, S.; Pal, T. K. Solid particle erosion behaviour of hardfacing deposits on cast iron – Influence of deposit microstructure and erodent particles. *Wear*, 2006, Vol. 261, p. 1069–1079.
- [42] Buchely, M. F.; Gutierrez, J. C.; Leon, L. M.; Toro, A. The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys. *Wear*, 2005, Vol. 259, p. 52–61.
- [43] Wang, X. H.; Zou, Z. D.; Qu, S. Y.; Song, S. L. Microstructure and wear properties of Fe-based hardfacing coating reinforced by TiC particles. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, Vol. 168, p. 89–94.
- [44] Lu, S.-P.; Kwon, O.-Y.; Kim, T.-B.; Kim, K.-H. Microstructure and wear property of Fe-Mn-Cr-Mo-V alloy cladding by submerged arc welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, Vol. 147, p. 191–196.
- [45] Buchanan, V. E.; Shipway, P. H.; McCartney, D. G. Microstructure and abrasive wear behaviour of shielded metal arc welding hardfacings used in the sugarcane industry. *Wear*, 2007, Vol. 263, p. 99–110.
- [46] Liu, Y.-F.; Xia, Z.-Y.; Han, J.-M.; Zhang, G.-L.; Yang, S.-Z. Microstructure and wear behavior of (Cr, Fe)₇C₃ reinforced composite coating produced by plasma transferred arc weld-surfacing process. *Surface & Coatings Technology*, 2006, Vol. 201, p. 863–867.
- [47] Choo, S.-H.; Kim, Ch. K.; Euh, K.; Lee, S.; Jung, J.-Y.; Ahn, S. Correlation of microstructure with the wear resistance and fracture toughness of hardfacing alloys reinforced with complex carbides. *Metallurgical and Materials Transactions, Part A*, 2000, Vol. 31, p. 3041–3052.
- [48] Buytoz, S. Microstructural properties of SiC based hardfacing on low alloy steel. *Surface & Coatings Technology*, 2006, Vol. 200, p. 3734–3742.

- [49] Fan, Ch.; Chen, M.-Ch.; Chang, Ch.-M.; Wu, W. Microstructure change caused by $(\text{Cr, Fe})_{23}\text{C}_6$ carbides in high chromium Fe-Cr-C hardfacing alloys. *Surface & Coatings Technology*, 2006, Vol. 201, p. 908–912.
- [50] Wang, X.-H.; Zou, Z.-D.; Qu, S.-Y. Microstructure of Fe-based alloy hardfacing coating reinforced by TiC-VC particles. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2006, Vol. 13, No. 4, p. 51–55.
- [51] Correa, E. O.; Alcantara, N. G.; Tecco, D. G.; Kumar, R. V. The relationship between the microstructure and abrasive resistance of a hardfacing alloy in the Fe-Cr-C-Nb-V system. *Metallurgical and Materials Transactions, Part A*, 2007, Vol. 38, p. 1671–1680.
- [52] Paniagua-Mercado, A. M.; Lopez-Hirata, V. M.; Saucedo Munoz, M. L. Influence of the chemical composition of flux on the microstructure and tensile properties of submerged-arc welds. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, Vol. 169, p. 346–351.
- [53] Wang, X. H.; Zou, Z. D.; Qu, S. Y.; Song, S. L. Microstructure and properties of the TiC/Fe-based alloy hardfacing layers. *Journal of Materials Science*, 2005, Vol. 40, p. 3629–3633.
- [54] Lee, S.; Choo, S.-H.; Baek, E.-R.; Ahn, S.; Kim, N. J. Correlation of microstructure and fracture toughness in high-chromium white iron hardfacing alloys. *Metallurgical and Materials Transactions, Part A*, 1996, Vol. 27, p. 3881–3891.
- [55] Yun, E.; Lee, S. Correlation of microstructure with hardness and wear resistance in Cr_3C_2 /stainless steel surface composites fabricated by high-energy electron beam irradiation. *Materials Science and Engineering, Part A*, 2005, Vol. 405, p. 163–172.
- [56] Prasad, B. K. Sliding wear response of cast iron as influenced by microstructural features and test condition. *Materials Science and Engineering, Part A*, 2007, Vol. 456, p. 373–385.
- [57] Engqvist, H.; Botton, G. A.; Axen, N.; Hogmark, S. Microstructure and abrasive wear of binderless carbides. *Journal of the American Ceramic Society-Engqvist et al.*, 2000, Vol. 83, No. 10, p. 2491–2496.
- [58] Xinhong, W.; Zengda, Z.; Sili, S.; Shiyao, Q. Microstructure and wear properties of in situ TiC/FeCrBSi composite coating prepared by gas tungsten arc welding. *Wear*, 2006, Vol. 260, p. 705–710.

- [59] Buytoz, S. Microstructural properties of M_7C_3 eutectic carbides in a Fe-Cr-C alloy. *Materials Letters*, 2006, Vol. 60, p. 605–608.
- [60] Bhadeshia, H. K. D. H. Possible effects of stress on steel weld microstructures. *Mathematical Modelling of Weld Phenomena*, 1995, p. 71–118.
- [61] Paniagua-Mercado, A. M.; Estrada-Diaz, P.; Lopez-Hirata, V. M. Chemical and structural characterization of the crystalline phases in agglomerated fluxes for submerged-arc welding. *Journal of materials Processing Technology*, 2003, Vol. 141, p. 93–100.
- [62] Machmeier, P.; Matuszewski, T.; Jones, R.; Ayer, R. Effect of chromium additions on the mechanical and physical properties and microstructure of Fe-Co-Ni-Cr-Mo-C ultra-high strength steel: Part 1. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1997, Vol. 6, No. 3, p. 279–288.
- [63] Gretoft, B.; Bhadeshia, H.; Svensson, L.-E. Development of microstructure in the fusion zone of steel weld deposits. *Acta Stereologica*, 1986, Vol. 5, No. 2, p. 365–371.
- [64] Kulikauskas, L. *Medžiagotyra. Konstrukcinės medžiagos*. Vilnius: Žara, 1997, 509 p.
- [65] Королев, Н. В.; Бороненков, О. В.; Пименова, О. В. Разработка износостойких наплавочных сплавов методами математического моделирование, в кн. *Сборник докладов I-й международной конференции по сварочным материалам стран СНГ «Состояние и перспективы развития сварочных материалов в странах СНГ»*, Краснодар, 22–26 июня 1998. Москва, 1998, с. 86–91.
- [66] Кальянов, В. Н.; Баргон, В. А. Выбор наплавочных материалов в зависимости от вида износа, в кн. *Сборник докладов I-й международной конференции по сварочным материалам стран СНГ «Состояние и перспективы развития сварочных материалов в странах СНГ»*, Краснодар, 22–26 июня 1998. Москва, 1998, с. 173–175.
- [67] Снаговский, Л. М.; Снаговский, В. М.; Тран, Ю. Н. Кристаллизация эвтектик на базе карбидов ниобия и титана в железных сплавах, в кн. *Карбиды и сплавы на их основе*. Киев: Наукова думка, 1976, с. 70–73.

- [68] Shang-Lei, Y.; Xue-Qin, L.; Zeng-Da, Z.; Song-Nian, L. Investigation of surfacing electrode with high hardness based on lath martensite. *Materials Science and Engineering, Part A*, 2006, Vol. 438–440, p. 281–284.
- [69] Amaro, R. I.; Martins, R. C.; Seabra, J. O.; Yang, S.; Teer, D. G.; Renevier, N. M. Carbon/chromium low friction surface coating for gears application. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2005, Vol. 57, No. 6, p. 233–242.
- [70] Chen, Z.; Zhou, Y. Surface modification of resistance welding electrode by electro-spark deposited composite coatings: Part I. Coating characterization. *Surface & Coatings Technology*, 2006, Vol. 201, p. 1503–1510.
- [71] Chen, Z.; Zhou, Y. Surface modification of resistance welding electrode by electro-spark deposited composite coatings: Part II. Metallurgical behavior during welding. *Surface & Coatings Technology*, 2006, Vol. 201, p. 2419–2430.
- [72] Xiaoping, L.; Yuan, G.; Zhonghou, L.; Zhong, X.; Wenhui, T.; Bin, T. Cr-Ni-Mo-Co surface alloying layer formed by plasma surface alloying in pure iron. *Applied Surface Science*, 2006, Vol. 252, p. 3894–3902.
- [73] Wang, X. H.; Zhang, M.; Zou, Z. D.; Song, S. L.; Hanc, F.; Qu, S. Y. In situ production of Fe-TiC surface composite coatings by tungsten-inert gas heat source. *Surface & Coatings Technology*, 2006, Vol. 200, p. 6117–6122.
- [74] Agarwal, A.; Dahotre, N. B. Pulse electrode deposition of superhard boride coatings on ferrous alloy. *Surface and Coatings Technology*, 1998, Vol. 106, p. 242–250.
- [75] Navinšek, B.; Panjan, P.; Krušič, J. Hard coatings on soft metallic substrates. *Surface & Coatings Technology*, 1998, Vol. 98, p. 809–815.
- [76] Taube, K., Carbon-based coatings for dry sheet-metal working. *Surface & Coatings Technology*, 1998, Vol. 98, p. 976–984.
- [77] Kim, J. H.; Yoon, J. C.; Kim, S. J. The effect of boron on the thermal fatigue behavior of iron-chromium-carbon-silicon alloy. *Surface & Coatings Technology*, 2007, Vol. 202, p. 100–106.

- [78] Paustovskyi, O. V.; Berezhnytska, M. P.; Kyrylenko, S. M. Residual stresses after spark hard facing of tool steels. *Materials Science*, 1999, Vol. 35, No. 5, p. 730–732.
- [79] Kim, J. H.; Hong, H. S.; Kim, S. J. Effect of boron addition on the cavitation erosion resistance of Fe-based hardfacing alloy. *Materials Letters*, 2007, Vol. 61, p. 1235–1237.
- [80] Chatterjee, S.; Pal, T. K. Weld procedural effect on the performance of iron based hardfacing deposits on cast iron substrate. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, Vol. 173, p. 61–69.
- [81] Ren, X. J.; James, R. D.; Brookes, E. J.; Wang, L. Machining of high chromium hardfacing materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, Vol. 115, p. 423–429.
- [82] Svensson, L. E.; Gretoft, B.; Ulander, B.; Bhadeshia, H. K. D. H. Fe-Cr-C hardfacing alloys for high-temperature applications. *Journal of Materials Science*, 1986, Vol. 21, p. 1015–1019.
- [83] Tarng, Y. S.; Juang, S. C.; Chang, C. H. The use of grey-based Taguchi methods to determine submerged arc welding process parameters in hardfacing. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, Vol. 128, p. 1–6.
- [84] Kim, J. H.; Na, K. S.; Kim, G. G.; Oh, J. Y.; Yoon, C. S.; Kim, S. J. The effects of Mn and B on the cavitation erosion resistance of austenitic Fe-base hardfacing alloys. *Materials Science and Engineering, Part A*, 2008, Vol. 477, p. 204–207.
- [85] Choo, S.-H.; Baek, E.-R.; Lee, S. Ballistic impact behavior of multilayered armor plates processed by hardfacing. *Metallurgical and Materials Transactions, Part A*, 1996, Vol. 27, p. 3335–3340.
- [86] Yang, Q. X.; Yao, M.; Park, J. Numerical simulation on residual stress distribution of hard-face-welded steel specimens with martensite transformation. *Materials Science and Engineering, Part A*, 2004, Vol. 364, p. 244–248.
- [87] Guo, Ch.; Kelly, P. M. Boron solubility in Fe-Cr-B cast irons. *Materials Science and Engineering, Part A*, 2003, Vol. 352, p. 40–45.

- [88] Wank, A.; Wielage, B.; Pokhmurska, H.; Friesen, E.; Reisel, G. Comparison of hardmetal and hard chromium coatings under different tribological conditions. *Surface & Coatings Technology*, 2006, Vol. 201, p. 1975–1980.
- [89] Wu, X.; Xing, J.; Fu, H.; Zhi, X. Effect of titanium on the morphology of primary M_7C_3 carbides in hypereutectic high chromium white iron. *Materials Science and Engineering, Part A*, 2007, Vol. 457, p. 180–185.
- [90] Branagan, D. J.; Marshall, M. C.; Meacham, B. E. High toughness high hardness iron based PTAW weld materials. *Materials Science and Engineering, Part A*, 2006, Vol. 428, p. 116–123.
- [91] Подгаецкий, В. В.; Кузьменко, В. Г. *Сварочные шлаки: справочное пособие*. Киев: Наукова думка, 1988. 251 с.
- [92] *Сварочные материалы для дуговой сварки: справочное пособие: В 2-х т. Т. 2: Сварочные проволоки и электроды*. Под общ. ред. Н. Н. Потапова. Москва: Машиностроение, 1993. 768 с.
- [93] *Теория сварочных процессов* / Под ред. В. И. Фролова. Москва: Высшая школа, 1988. 560 с.
- [94] Liaudis, B. *Suvirinimo procesų teorija*. Vilnius: Mokslas, 1987, 132 p.
- [95] Мазель, Ю. А. Разработка синтетических электродов для сварки высоколегированных сталей, в кн. *Сборник докладов I-й международной конференции по сварочным материалам стран СНГ «Состояние и перспективы развития сварочных материалов в странах СНГ», Краснодар, 22–26 июня 1998*. Москва, 1998, с. 120–122.
- [96] Хилкес, Я.; ван Нассау, Л. Основные принципы разработки сварочных материалов из нержавеющей стали, в кн. *Сборник научных трудов международной конференции по сварке и соединению 2000: Новые материалы и новые перспективы, Израиль, Тель-Авив, 18–20 июля 2000*. Тель-Авив, 2000, с. 84–92.
- [97] Ворновицкий, И. Н. Практика снижения разнотолщинности покрытия сварочных электродов. *Сварщик*, 2000, № 1, с. 5–7, 9.
- [98] Ворновицкий, И. Н.; Савельев, В. Г. Особенности изготовления электродов с саморассыпающимся шлаком. *Сварочное производство*, 2001, № 1, с. 46–49.

- [99] LST EN ISO 2560:2006. Suvirinimo medžiagos. Glaistytieji nelegiruotųjų ir smulkiagrūdžių plienų rankinio lankinio suvirinimo elektrodai. Klasifikacija (ISO 2560:2002). 2006. 30 p.
- [100] LST EN 14700:2005. Suvirinimo medžiagos. Kietinamojo apvirinimo medžiagos. 2005. 13 p.
- [101] Garcia-Guinea, J.; Correcher, V.; Lombardero, M.; Gonzalez-Martin, R. Study of the ultraviolet emission of the electrode coatings of arc welding. *International journal of environmental health research*, 2004, Vol. 14, No. 4, p. 285–294.
- [102] Kor, G. J. W. Effect of fluorspar and other fluxes on slag-metal equilibria involving phosphorus and sulfur. *Metallurgical Transactions, Part B*, 1977, Vol. 8, p. 107–113.
- [103] Du Plessis, J.; Du Toit, M. Reducing diffusible hydrogen contents of shielded metal arc welds through addition of flux-oxidizing ingredients. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2008, Vol. 17, Iss. 1, p. 50–56.
- [104] Bauné, E.; Bonnet, C.; Liu, S. Reconsidering the basicity of a FCAW consumable – Part 1: Solidified slag composition of a FCAW consumable as a basicity indicator. *Welding Research: Supplement to the Welding Journal*, 2000, p. 57–65.
- [105] Jenkins, N. T.; Eagar, T. W. Chemical analysis of welding fume particles. *Welding Research: Supplement to the Welding Journal*, 2005, p. 87–93.
- [106] Kanjilal, P.; Pal, T. K.; Majumdar, S. K. Combined effect of flux and welding parameters on chemical composition and mechanical properties of submerged arc weld metal. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, Vol. 171, p. 223–231.
- [107] Hu, J.; Tsai, H. L. Heat and mass transfer in gas metal arc welding. Part I: The arc. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, Vol. 50, p. 833–846.
- [108] Hu, J.; Tsai, H. L. Heat and mass transfer in gas metal arc welding. Part II: The metal. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, Vol. 50, p. 808–820.

- [109] Hagni, R. D. Mineralogy of beneficiation problems involving fluorspar concentrates from carbonatite-related fluorspar deposits. *Mineralogy and Petrology*, 1999, Vol. 67, p. 33–14.

Autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose periodiniuose mokslo leidiniuose

- [1A] Jankauskas, V.; Kreivaitis, R.; Kulu, P.; Antonov, M.; Milčius, D.; Varnauskas, V. Research of abrasive erosion wear for Fe-C-Cr-B hard layers. *Mechanika*, Kaunas, 2008, Nr. 4 (72). p. 71–76. ISSN 1392–1207 (Thomson ISI Web of Science, INSPEC, Compendex, Academic Search Complete, FLUIDEX, Scopus).
- [2A] Varnauskas, V.; Valiulis, A. V.; Rudzinskas, V. Investigation of alloy elements transfer in arc facing by high carbon and chromium content electrodes. *Diffusion and defect data. Solid state data. Part B: Solid State Phenomena: Mechatronic Systems and Materials II*, Stafa-Zürich: Trans Tech Publications, 2009, Vol. 144, p. 257–260. ISSN 1012–0394 (Elsevier: SCOPUS).
- [3A] Valiulis, A. V.; Varnauskas, V. Manufacturing of welding electrodes in Lithuania. *Welding in the world*, London, 2007, Vol. 51, SPI, p. 347–356. ISSN 0043–2288 (Compendex, Science Direct, CSA).
- [4A] Jankauskas, V.; Varnauskas, V.; Kreivaitis, R.; Adamonis, D. Apvirintų paviršių abrazyvinio dilimo tyrimai. *Inžinerija = Engineering*, Kaunas, 2006, Nr. 7 (1), p. 64–68. ISSN 1392–8279.
- [5A] Varnauskas, V.; Rudzinskas, V.; Černašėjus, O. Influence of covering components of welding electrodes on chemical composition and mechanical properties of fused metal. *Medžiagotyra*, Kaunas, 2004, Vol. 10, No. 1, p. 7–10. ISSN 1392–1320.
- [6A] Варнаускас, В.; Рудзинскас, В.; Чернашеюс, О. Исследование влияния состава покрытия сварочных электродов на химический состав и механические свойства наплавленного металла. *Теория и практика машиностроения: международный научно-технический журнал*, Минск, 2004, № 2, с. 68–71.

- [7A] Varnauskas, V.; Rudzinskas, V.; Černašėjus, O. Suvirinimo elektrodų savybių tyrimas. *Mechaninė technologija: mokslo darbai*, Kaunas, 2003, T. 31, p. 8–14. ISSN 1648–4711 (VINITI).
- [8A] Varnauskas, V.; Rudzinskas, V.; Černašėjus, O. Research of properties of welding electrodes with rutile covering. *Journal of Vibroengineering*, Vilnius, 2003, Vol. 5, No. 1 (10), p. 49–52. ISSN 1392–8716 (VINITI).

Straipsniai kituose leidiniuose

- [9A] Valiulis, A. V.; Varnauskas, V. Manufacturing of welding electrodes in Lithuania. In *60th Annual Assembly and International Conference. 01–08 July 2007, Dubrovnik–Cavtat, Croatia: Proceedings of the IIW International Conference „Welding & Materials. Technical, Rconomic and Ecological Aspects“*, Zagreb, 2007, p. 347–355. ISBN 978–953–7518–00–4.
- [10A] Jankauskas, V.; Varnauskas, V.; Valiulis, A. V.; Kreivaitis, R. Research into wear of welded hard layers. In *International Conference BALTTTRIB'2007. Lithuanian University of Agriculture, Kaunas, Lithuania, 21–23 November 2007: proceedings*, Kaunas, 2007, p. 58–62. ISSN 1822–8801 (Thomson ISI Proceedings).
- [11A] Varnauskas, V.; Valiulis, A. V. Cr ir C patekimo iš elektrodo glaisto į prilydomą metalą dėsnų tyrimas. Iš *Mechanika, medžiagų inžinerija, pramonės inžinerija ir vadyba: 10-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“, įvykusios Vilniuje 2007 m. balandžio 19–20 d., pranešimų medžiaga*, Vilnius, 2007, p. 105–111. ISBN 9955–28–049–2.
- [12A] Jankauskas, V.; Kreivaitis, R.; Klimas, V.; Varnauskas, V. Strengthening of machine elements used in abrasive environment by hard layers alloying. In *Mechanika – 2006: Proceedings of the 11th International Conference, April 6–7 2006, Kaunas University of Technology, Lithuania*, Kaunas, 2006, p. 105–108. ISSN 1822–2951 (INSPEC).
- [13A] Varnauskas, V.; Valiulis, A. V.; Jankauskas, V.; Kreivaitis, R. Investigation of chromium transfer from electrode coating into weld pool and its influence on cladding or surfacing weld metal properties. In *2nd International Conference Mechatronic systems and materials, MSM '2006: [Elektroninis išteklius], 31 August – 3 September 2006, Cracow, Poland [CD]*, Opole, 2006, p. [1–8].

- [14A] Varnauskas, V.; Valiulis, A. V. Aplydymo elektrodų glaisto komponentų įtaka prilydyto metalo savybėms. Iš *Mechanika – 2005: 10-osios tarptautinės konferencijos pranešimų medžiaga, Kauno technologijos universitetas, Lietuva, 2005 m. balandžio 7–8*, Kaunas, 2005, p. 505–510. ISBN 9955–09–850–3.
- [15A] Varnauskas, V.; Valiulis, A. V. Elektrodų glaistų medžiagos, jų gavybos būdai bei naudojimo technologiniai ir ekonominiai aspektai. Iš *8-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“, įvykusios Vilniuje 2005 m. balandžio 21–22 d., medžiaga: Mechanika, medžiagų inžinerija, pramonės inžinerija ir vadyba*, Vilnius, 2005, p. 71–77. ISBN 9986–05–907–0.
- [16A] Varnauskas, V.; Rudzinskas, V.; Černašėjus, O. Suvirinimo elektrodų glaisto metalinių komponentų įtaka prilydyto metalo cheminei sudėčiai. Iš *7-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“, įvykusios Vilniuje 2004 m. balandžio 20–21 d., medžiaga: Mechanika, medžiagų inžinerija, pramonės inžinerija ir vadyba*, Vilnius, 2004, p. 108–112. ISBN 9986–05–779–5.

Paruoštas straipsnis recenzuojamam periodiniam mokslo leidiniui

- [17A] Varnauskas, V.; Valiulis, A. V.; Jankauskas, V.; Kreivaitis, R. Investigation of chromium transfer from electrode coating into weld pool and its influence on cladding or surfacing weld metal properties. *Materials Science*, New York: Springer Science+Business Media, Inc. ISSN 1068–820X (Print), ISSN 1573–885X (Online) (Thomson ISI Web of Science, SCOPUS) [Priimtas spausdinti].

Priedai

A priedas. Elektrodo glaisto sudarymo algoritmas bei skaičiavimų programos lango vaizdas

A1 PRIEDAS. Elektrodo glaisto sudarymo algoritmas.

A2 PRIEDAS. Skaičiavimų programos, naudojamos elektrodo glaistų sudarymui, lango vaizdas.

B priedas. Sukurtų apvirinimo elektrodo aprašymai gamyklos elektrodo kataloge

B1 PRIEDAS. Sukurtų elektrodo, kuriais apvirinti sluoksniai įgauna vidutinio atsparumo abrazyviniam poveikiui ir didelėms smūginėms apkrovoms savybes, gamyklos elektrodo katalogo lapas.

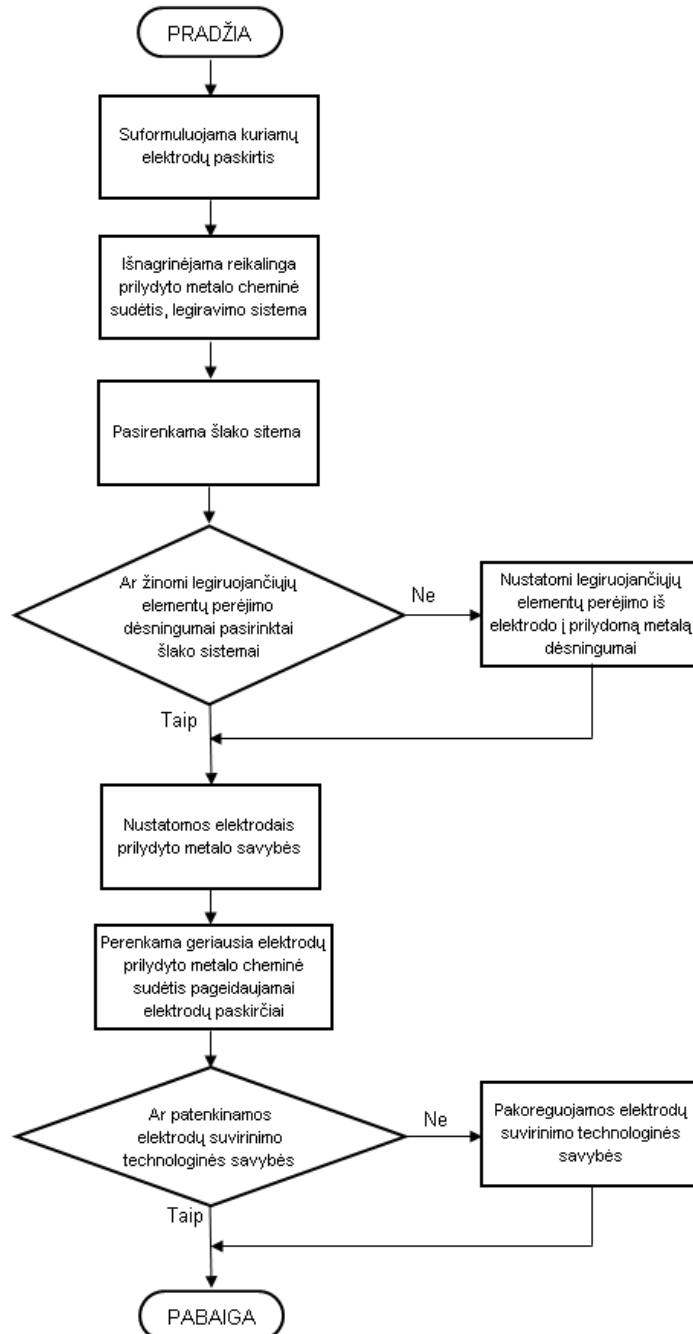
B2 PRIEDAS. Sukurtų elektrodo, kuriais apvirinti paviršiai gali būti naudojami intensyvaus abrazyvinio poveikio aplinkoje, gamyklos elektrodo katalogo lapas.

B3 PRIEDAS. Sukurtų elektrodų, kuriais apvirinti sluoksniai įgauna atsparumo korozijai savybes, taip pat gali būti naudojami buferinių sluoksnių sudarymui prieš apvirinant kietaisiais sluoksniais, gamyklos elektrodų katalogo lapas.

C priedas. Sukurtiems apvirinimo elektrodams suteikti atitikties sertifikatai

C1 PRIEDAS. Ukrainos valstybinės sertifikavimo sistemos УкрСЕІПО išduotas elektrodų atitikties sertifikatas.

C2 PRIEDAS. Baltarusijos respublikos sertifikavimo įstaigos išduotas elektrodų atitikties sertifikatas.

A1 PRIEDAS. ELEKTRODŲ GLAISTO SUDARYMO ALGORITMAS

[illegible]

**B1 PRIEDAS. SUKURTŲ ELEKTRODŲ, KURIAIS APVIRINTI
SLUOKSNIAI ĮGAUNA VIDUTINIO ATSPARUMO ABRAZYVINIAM
POVEIKIUI IR DIDELĖMS SMŪGINĖMS APKROVOMS SAVYBES,
GAMYKLOS ELEKTRODŲ KATALOGO LAPAS**

ELEKTRODAI APVIRINIMUI

AV APL 60

Klasifikacija:

LST EN 14700 :E Fe2
DIN 8555 :E6-UM-55-G



Aprašymas:

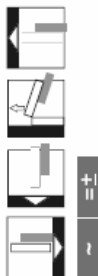
Elektrodai mašinų ir konstrukcijų dalių apdirbinimui, siekiant suteikti įrankių, pagamintų iš mažanglių, mažai legiruotų ar liejinųjų plienų, paviršiams vidutinio atsparumo abrazyviniams poveikiui, smūgiams ir spaudimui savybės.

Paskirtis:

Žemės dirbimo padargams, skreperiams, kaušams ir kaušų dantims, ekskavatorių dalims, kalams, konvejerių sraigtams, pjovimo įrankiams, smulkintuvų kugiams apvinti.

Glaisto tipas:

Rutilo-bazinis.



Apvėrinimo erdvėnės padėty:

Žemutinė, horizontali, vertikali aukštynkryptė, lubinė.

Srovés rūšis ir poliškumas:

Kintamoji, nuolatinė bet kokio poliškumo.

Srovés stúpris:

Ø, mm	3,25	4,0	5,0
I, A	90-130	130-180	190-250

Prilydyto metalo cheminė sudėtis (%):

C	Si	Mn	Cr
0,8	0,4	1,2	5,3

Technologinės savybės:

1 sluoksnis	45-50	45-50	53-60
2 sluoksnis	51-56	51-56	55-61
3 sluoksnis	54-59	54-59	57-62

Ipakavimas:

Ø, mm	3,25	4,00	5,00
Ilgis, mm	350	450	450
Kieksis pakelyje, vnt.	~102	~83	~52
Pakelio masė, kg.	3,5	5,5	5,5

Naudojimo nurodymai:

Esant reikali, elektrodus prieš naudojimą džiovinti 150°C temperatūroje 1 valandą. Mažai legiruotus ir anglingus frankinius plienus prieš apviniimą pakaitinti iki 150-300°C temperatūros, priklausomai nuo jų cheminės sudėties ir storio. Po apviniimo gaminių lėtai atšaldinti ore.

**B3 PRIEDAS. SUKURTŲ ELEKTRODŲ, KURIAIS APVIRINTI
SLUOKSNIAI ĮGAUNA ATSPARUMO KOROZIJAI SAVYBES, TAIP PAT
GALI BŪTI NAUDOJAMI BUFERINIŲ SLUOKSNIŲ SUDARYMUI PRIEŠ
APVIRINANT KIETAISIAIS SLUOKSNIAIS, GAMYKLOS ELEKTRODŲ
KATALOGO LAPAS**

UNIVERSALŪS ELEKTRODAI SUVIRINIMUI IR APVIRINIMUI

AV 307APL

Klasifikasi:

LST EN 14700 : E Fe10
LST EN 1600 : ~ E 189 Mn Mo R 5 3
AWS A5.4 : ~ E307



Aprašymas:

Universalūs aukšto našumo elektrodai.
Elektrodų šerdis iš mažanglio nelegiruoto plieno. Legiravimas vyksta per glaistą.

Paskirtis:

Paskirts ↓	Skersmuo, mm →	2,5	3,2	4,0	5,0
Paprastų konstrukcijų iš nerūdijančių plienų viršimui.		1	3	6	6
Skirtingų plienų viršimui.		2	2	5	5
Nežinomų plienų viršimui.		2	1	3	3(5)
Ketaus viršimui.		3	2	3	3
Mechaniški stiprinamų plienų viršimui.		3	2	2	3
Vidutinio anglingumo bei dalinai ir aukšto anglingumo plienų viršimui.		3(4)	3	1	2
Manganinių plienų suviršinimui ir apviršinimui.		4	4	2	2
Buferinių sluoksnių apviršinimui prieš apviršinant kietaisiais sluoksniais.		4	4	3	1

1-pagrindinė paskirtis; 2-label tinkamas; 3-tinkamas; 4-tinkamas, bet ekonomiškai neapsimoka; 5-tobotas panaudojimas; 6-nepanaudojamas.

Glaisto tipas:

Sintetinis (rutilo-bazinis, su leģiruojančiuju metalu milteliais).

Suvirinimo ir apvirinimo erdvinės padėtys:

2,5 mm Visos, išskyrus vertikalią žemynkryptę.

4,0 mm Žemutinė, horizontali, aukšty n ant iki 30° pasvirusios plokštumos.



Srovės rūšis ir poliškumas:

Kintamoji, kai tuščiosios eigos (tampa
ne mažesnė kaip 56 V.
Nuolatinė bet kokio poliškumo.

ne mažesnė kaip 56 V.
Nuolatinė bet kokio poliškumo.

Suvirinimo sąvokos stipris:

Ø, mm	2.5	3.2	4.0	5.0
I, A	90-130	120-180	160-240	200-300

Gryno prilydyto metalo cheminė sudėtis, %:

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	P	S
≤0.25	≤1.2	3-8	17-22	≤1.5	7-10	≤0.02	≤0.02

Prilydyto metalo mechaninės savybės:

Sąlyginė takumo riba	$R_{0,2} \geq 350 \text{ MPa};$
Stiprumo riba	$R_m \geq 500 \text{ MPa};$
Santykinis pailgėjimas	$A_5 \geq 25 \%;$
Kietis: po virinimo	180-200 HB;
po mechaninio kietinimo	38-42 HRC.

Elektrodu matmenys:

Skersmuo, mm	2.5	3.2	4.00	5.00
Ilgis, mm	350	350	450	450
Elektrodų kiekis 1 kg. vnt.	~38	~22	~12	~8

Ypatingos savybės:

Geros virinimo-technologinės savybės.
Aukštas prilydyto metalo atsparumas įtrūkų susidarymui.
Prilydytas metalas mechanškai stiprinamas.

Naudojimo nurodymai:

Virinant vengti didelio metalo persimaišymo.
Virinant nuolatine tiesioginio polikumo srove gaunamas didesnis įvirinimas (naudoti mažesnes sroves), o atvirkščio polikumo srove - mažesnis metalo susimaišymas, kintamąja - tarpinis variantas.
Virinant storus, labiau stiprinamus, sunkiai suvirinimus plienus rekomenduojamas šiluminis pagrindinio metalo pakaitinimas iki 200-300°C. Kitais atvejais pakaitinimas nebūtinas.
Sudrėkus glaistui, elektrodus džiovinti 300°C temperatūroje 1 valandą.

C1 PRIEDAS. UKRAINOS VALSTYBINĖS CERTIFIKAVIMO SISTEMOS
УкрСЕПРО ІШДУОТАС ЕЛЕКТРОДŲ АТІТІКТІЕС СЕРТИФІКАТАС

№ 559431		ДЕРЖАВНИЙ КОМІТЕТ УКРАЇНИ З ПИТАНЬ ТЕХНІЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТА СПОЖИВЧОЇ ПОЛІТИКИ ДЕРЖАВНА СИСТЕМА CERTИФІКАЦІЇ УкрСЕПРО		Серія ВВ	
СЕРТИФІКАТ ВІДПОВІДНОСТІ					
Зареєстровано в Реєстрі за №		UA1.012.0152438-07			
Зареєстрування в Реєстрі					
Термін дії з		31 жовтня 2007 до 29 жовтня 2012			
Срок действия с					
Продукція		8311			
Продукция		код ВТЗ ЕД, ТН ВЕД			
Електроди покриті металеві для наплавлення марок AVI AP60, AVI AP63, AVI APL60, AVI APL600, AV T 590, AV 307APL - всього 6 марок		код ДКП, ОКП			
Відповідає вимогам					
Соответствует требованиям					
ГОСТ 9466-75, ГОСТ 10051-75					
Виробник продукції		Фірма UAB 'ANYKSCIU VARIS', Vairuotoju 10 St, 29107 Anyksciai, Литва			
Изготовитель продукции					
Сертифікат видано		Фірмі UAB 'ANYKSCIU VARIS', Vairuotoju 10 St, 29107 Anyksciai, Литва			
Сертификат выдан					
Додаткова інформація					
Дополнительная информация					
Електроди покриті металеві для наплавлення 6 марок, що виготовляються серійно з 31 жовтня 2007р. до 29 жовтня 2012 р. Періодичність технагляду - 1 раз на рік.					
Сертифікат видано органом з сертифікації					
Сертификат выдан органом по сертификации					
ДП НТЦ СЕПРОЗ НАН України, 03680, МСЦ, м. Київ-150, вул. Боженька, 11, атестат акредитації № UA 4.001.012 від 25.05.2004 р., т. 289-21-69, 271-21-07					
На підставі					
На основании					
Випробування в: 1) АВЛ зварювальних матеріалів ІЕЗ ім. С.О.Патона НАН України (атестат № UA 6.001.T.086 від 14.05.2001 р., 03680, м. Київ, вул. Боженька, 11), протокол № 108-238/07-123x від 19.10.2007, 2) ВЛ механічних випробувань ІЕЗ ім. С.О.Патона НАН України (атестат № UA 6.001.T.083 від 14.05.2001 р., 03680, м. Київ, вул. Боженька, 11), протокол № 221/10-07 від 19.10.2007. Сертифікат на систему управління якістю № UA 2-021.02616-07 від 30.10.2007					
Керівник органу з сертифікації		Академік НАН України			
Руководитель органа по сертификации		Л. М. Лобанов			
М.П. СЕПРОЗ		підпис		ініціали, прізвище	
24832142					
Числовість сертифіката відповідності можна перевірити в Реєстрі системи УкрСЕПРО за тел. (044) 537-35-76					

**C2 PRIEDAS. BALTARUSIJOS RESPUBLIKOS NACIONALINĖS
ATITIKTIES PATVIRTINIMO SISTEMOS СТБ IŠDUOTAS ELEKTRODŲ
ATITIKTIES SERTIFIKATAS**

НАЦИОНАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПОДТВЕРЖДЕНИЯ СООТВЕТСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
ГОССТАНДАРТ

№ 0069013  Серия А

СЕРТИФИКАТ СООТВЕТСТВИЯ

Зарегистрирован в реестре
№ ВУ/112 03.03.025 00829

Срок действия с 26 апреля 2007 г. по 25 апреля 2010 г.

Орган по сертификации
ГНУ ИПМ - Орган по сертификации продукции сварочного производства,
220005, г. Минск, ул. Платонова, 126, тел. 233-97-18.

Настоящий сертификат удостоверяет, что идентифицированная должным образом продукция изготовленная ЗАО «АНИКШЮ ВАРИС», Литовская Республика.

и представленная на сертификацию под наименованием Электроды покрытые
металлические для ручной дуговой сварки и наплавки марок: АНО-4, АV-21, АV-22,
АV-23, АV-31, АV-43, UONI-13/55, АV-61, АV-66, АV1 308L, АV1 316L, АV1 310,
АV1 KetNi, АV1 KetNiFe, АV1 KetNiFeCu, АV1 Alium5, АV1 Alium 12, АV1 AP60,
АV1 AP63, АV APL60, АV APL600, АVТ-590, АV 307 APL.

код ОКП –
код ТН ВЭД – 8311 10

серийное производство

соответствует требованиям технических нормативных правовых актов:
СТБ ЕН 499-2001, СТБ ЕН 1600-2002, СТБ ЕН 759-2002, ГОСТ 9466-75,
ГОСТ 9467-75, IST 5420587-01-99, IST 5420587-02-99, IST 5420587-03-97,
IST 5420587-03-99, IST 5420587-04-97, IST 5420587-04-99, IST 5420587-05-99,
IST 5420587-06-99, IST 5420587-07-2003, IST 5420587-08-2004, IST 5420587-11-2006,
IST 5420587-12-2007, IST 5420587-13-2007.

Заявитель (изготовитель, продавец) ЗАО «АНИКШЮ ВАРИС», Литовская
Республика, 29107, г. Аникшый, ул. Вайрутою, 10.

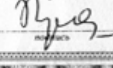
Сертификат выдан на основании:

а) документов Акт анализа состояния производства от 20.04.2007 г.
б) протоколов испытаний № 205 от 13.06.05 г., № 211 от 23.06.05 г. АИЛ НИКТИ
СП с ОП, рег. № ВУ/112 02.1.0.0279; № 034/74 054/118, № 034/75 054/119, № 034/76
054/120 от 06.11.2006 г. ЗАО «Vakaru centrine laboratorija»; № 05-00093 - № 05-00102
от 03.06.05 г., № 05-00107 от 16.06.05 г. ИЛ ЗАО «Аникшю Варис»; № 21.1, № 21.2,
№ 21.3 от 25.04.2007 г. АИЛ ОХП НИКТИС с ОП, рег. № ВУ/112 02.1.0.0279.

б) Инспекционный контроль осуществляет Орган по сертификации продукции
сварочного производства – ГНУ ИПМ.

Особые отметки Срок хранения сертификата соответствия - 1 год после окончания
срока его действия.

М.П. 

Руководитель органа по сертификации  **В.Л. Иванова**
Эксперт-аудитор  **А.А. Прокопенко**

Valentinas Varnauskas

ATSPARIŲ DILIMUI APVIRINTŲ PAVIRŠIŲ
FORMAVIMAS IR TYRIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai, mechanikos inžinerija (09T)

CREATION OF HARDFACED SURFACES AND
INVESTIGATION OF ITS WEAR RESISTANCE

Doctoral Dissertation

Technological Sciences, Mechanical Engineering (09T)

2008 12 16. 10,50 sp. l. Tiražas 20 egz.

Vilniaus Gedimino technikos universiteto leidykla „Technika“, Saulėtekio al. 11,

10223 Vilnius, <http://leidykla.vgtu.lt>

Spausdino UAB „Baltijos kopija“, Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius, <http://www.kopija.lt>