



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MECHANIKOS IR MEDŽIAGŲ INŽINERIJOS KATEDRA

Paulius Kazlauskas

Mineralinės vatos gamybos atliekų tyrimas ir jų taikymo apsauginėms dangoms gaminti įvertinimas

Investigation of mineral wool production waste and evaluation of its application for the production of protective coatings

Baigiamasis magistro darbas

Medžiagų ir suvirinimo inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX054

Gamybos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2020

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Mechanikos fakultetas
Mechanikos ir medžiagų inžinerijos katedra

ISBN ISSN
Egz. sk.
Data-.....-.....

Antrosios pakopos studijų **Medžiagų ir suvirinimo inžinerijos** programos magistro baigiamasis darbas 4

Pavadinimas **Mineralinės vatos gamybos atliekų tyrimas ir jų taikymo apsauginėms dangoms gaminti įvertinimas**

Autorius **Paulius Kazlauskas**

Vadovas **Jelena Škamat**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe tirtos mineralinės vatos gamybos metu susidarančios atliekos bei nagrinėta galimybė panaudoti tas atliekas apsauginėms dangos gaminti. Gamybos metu susidarančios atliekos yra opi šių laikų problema, todėl yra nuolatos ieškoma naujų atliekų panaudojimo sprendimų. Darbe atlikta literatūros analizė ir nustatyti pagrindiniai mineralinės vatos gamybai būdingi atliekų tipai bei apibrėžti eksperimentinių tyrimų etapai bei apimtis. Taikant malimą ir sijojimą paruoštos 3 tipų gabalinių atliekų miltelių skirtingos frakcijos, ištirta jų morfologija, nustatytos elementinė bei fazinė sudėtys. Remiantis gautais rezultatais parengta metodika eksperimentinėms dangoms formuoti ir tirti. Panaudojus vieną iš tirtų atliekų (šlaką), 2 būdais (kaitinimu krosnyje ir terminio purškimo su perlydymu būdu) pagamintos eksperimentinės kompozitinės Ni lydinio matricos dangos. Taikant mikroskopinę analizę, kietumo matavimus bei tribologinius bandymus nustatytos gautų dangų mikrostruktūros bei savybių (kietumo, trinties koeficiento, masės nuostolių sausos trinties metu) priklausomybės nuo atliekos kiekio dangoje. Apibendrinus gautus rezultatus, pateiktos išvados dėl tirtų atliekų taikymo dangų technologijose galimybių.

Darbo apimtis – 53 p. teksto be priedų, 21 iliustr., 11 lent., 42 literatūros šaltiniai.

Atskirai pridedami darbo priedai.

Prasminiai žodžiai: Mineralinės vatos gamybos atliekos, perdirbimas, kompozitinės dangos, termininis purškimas, nikelio pagrindo dangos.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Mechanics
Department of Mechanical and Material Engineering

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

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

Title **Investigation of Mineral Wool Production Waste and Evaluation of its Application for the Production of Protective Coatings**

Author **Paulius Kazlauskas**

Academic supervisor **Jelena Škamat**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

In the final master's thesis, the waste generated during the production of mineral wool is investigated and the possibility of using that waste for the production of protective coatings is examined. Waste generated during production is a sensitive problem of our time, so new solutions for the recovery of waste are constantly being sought. During the literature analysis main types of waste generated during the mineral wool production and the scope of experimental research are determined. During grinding and sieving, different fractions of 3 types of waste powders were prepared, their morphology was investigated, and elemental and phase compositions were determined. Based on the obtained results, a methodology for the formation and research of experimental coatings was developed. Using one of the investigated wastes (slag), experimental composite Ni alloy matrix coatings were prepared in 2 ways (by forming loosely placed in a furnace and by thermal spraying with remelting). Using microscopic analysis, hardness measurements and tribological tests, the dependences of the obtained microstructures and properties (hardness, coefficient of friction, weight loss during dry friction) on the amount of waste in the coating were determined. After summarizing the obtained results, the conclusions about the possibilities of the applied waste application in coating technologies are presented.

Thesis consists of: 53 p. text without appendixes, 21 pictures, 11 tables, 42 bibliographical entries.

Work appendixes are attached separately.

Keywords: Mineral wool manufacturing waste, recycling, composite coating, thermal spraying, nickel based coatings.

Turinys

Paveikslų sąrašas	9
Lentelių sąrašas	9
Įvadas	11
Temos aktualumas ir problematika	11
Tyrimo objektas.....	12
Darbo tikslas.....	12
Darbo uždaviniai	12
Darbo planas.....	12
Tyrimų metodika	13
Tyrimo naujumas.....	13
Darbo aprobacija	13
1 Literatūros apžvalga	14
1.1 Atliekų problematika	14
1.1.1 Atliekų naikinimo būdai.....	15
1.2 Mineralinės vatos gamybos procesas	16
1.3 Mineralinės vatos gamybos atliekų problema	17
1.4 Apsauginės dangos	20
1.4.1 Dengimui naudojami procesai.....	21
1.5 Kompozitinėms dangoms naudojamos medžiagos.....	22
1.5.1 Medžiagos/proceso pasirinkimas	23
1.6 Terminis purškimas	24
1.7 Apibendrinimas	27
2 Tyrimo metodika	29
2.1 Atliekų tyrimo metodika.....	29
2.2 Dangų formavimo krosnyje metodika	30
2.3 Purkštų dangų tyrimo metodika.....	31
2.4 Taikyti tyrimo metodai	31

3	MVGA ir dangų, gautų panaudojant šias atliekas, tyrimų rezultatai	34
3.1	Mineralinės vatos gamybos atliekų tyrimas	34
3.1.1	Smulkintų ir sijotų atliekų granulometrija	34
3.1.2	Smulkintų MVG atliekų dalelių morfologija ir elementinė sudėtis	35
3.1.3	MVG atliekų fazinės sudėties tyrimo rezultatai	37
3.1.4	Atliekų tyrimo apibendrinimas.....	38
3.2	Krosnyje suformuotų dangų tyrimas	39
3.2.1	Krosnyje formuotų dangų mikrostruktūra.....	39
3.2.2	Krosnyje formuotų dangų kietumo matavimų rezultatai.....	40
3.2.3	Krosnyje formuotų dangų tribologinių savybių rezultatai	41
3.2.4	Apibendrinimas	43
3.3	Purkštų dangų tyrimas	43
3.3.1	Gautos dangos	43
3.3.2	Purkštų dangų mikrostruktūra	44
3.3.3	Purkštų dangų kietumo matavimų rezultatai.....	45
3.3.4	Purkštų dangų tribologinių savybių rezultatai.....	46
3.3.5	Apibendrinimas	48
	Išvados ir rekomendacijos.....	49
	Literatūros sąrašas	50
	Priedai.....	54

Paveikslų sąrašas

1 pav. Mineralinės vatos gamybos technologijos schema (<i>AP-42: Compilation of Air Emissions Factors, Volume 1: Stationary point and area sources</i> (5-oji laida), 2009).....	17
2 pav. Medžiagos bei proceso pasirinkimo diagrama	24
3 pav. Supaprastinta terminio purškimo schema (Kuzma, 2011)	25
4 pav. Terminio purškimo proceso sandara: 1 – oksidų plėvelė; 2 – purškiamos medžiagos lašeliai; 3 – susidūrę su paviršiumi ir subliuškę lašeliai ; 4 – mechaninio sukibimo zona; 5 – lokalinio susilydymo zona; 6 – nevysiškai išsilydžiusi dalelė; 7 – pora; 8 – substrato paviršius; 9 – substratas (Kuzma, 2011).....	25
5 pav. Malūno veikimo principas (Changsha DECO Equipment Co., Ltd., n.d.).....	29
6 pav. Į mažesnius gabalus sutrupintų atliekų bendras vaizdas: a) šlakas, b) lydalas, c) latako nuosėdos	34
7 pav. Smulkintų MVG atliekų skirtingų frakcijų morfologija.....	36
8 pav. Lydalo XRD kreivė	37
9 pav. Šlako XRD kreivė.....	37
10 pav. Latako nuosėdų XRD kreivė	38
11 pav. Krosnyje formuotų dangų mikrostruktūra	40
12 pav. Krosnyje formuotų dangų kietumo priklausomybė nuo šlako kiekio dangoje	41
13 pav. Krosnyje formuotų dangų trinties koeficientai	42
14 pav. Krosnyje formuotų dangų trinties koeficiento priklausomybė nuo šlako kiekio	42
15 pav. Krosnyje formuotų dangų masės nuostolių priklausomybė nuo šlako kiekio	43
16 pav. Gautos užpurkštos dangos	44
17 pav. Purkštų dangų mikrostruktūra	45
18 pav. Purkštų dangų kietumo priklausomybė nuo šlako kiekio dangoje	46
19 pav. Purkštų dangų trinties koeficientai	47
20 pav. Purkštų dangų trinties koeficiento priklausomybė nuo šlako kiekio	47
21 pav. Purkštų dangų masės nuostolių priklausomybė nuo šlako kiekio	48

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Plieno S235JR cheminė sudėtis (S235JR steel grade, mechanical properties, chemical composition grade equivalent, 2014)	30
2 lentelė. <i>Metco 12C</i> purškimo miltelių cheminė sudėtis (Oerlikon Metco, 2016)	30
3 lentelė. Krosnyje formuotų dangų sudėtys bei žymenys (<i>Metco 12C</i> – likusi dalis).....	31
4 lentelė. Liepsninio purškimo parametrai	31
5 lentelė. Purškimu formuotų dangų sudėtis bei žymenys (<i>Metco 12C</i> – likusi dalis)	31

6 lentelė. Tribologijos tyrimo parametrai.....	32
7 lentelė. MVG atliekų granulometrija (mm)	34
8 lentelė. Šlako cheminė sudėtis	36
9 lentelė. Lydalo cheminė sudėtis	36
10 lentelė. Latako nuosėdų cheminė sudėtis	36
11 lentelė. Atskirų fazių vidutinis mikrokietumas HK0,2	40

Įvadas

Temos aktualumas ir problematika

Mineralinė vata – bendras terminas akmens, šlako ir stiklo vatai – yra labiausiai paplitusi izoliacinė medžiaga pasaulyje, kuri, priklausomai nuo rūšies, gaminama iš stiklo, uolienu (bazalto, dolomito) arba metalurginių šlakų lydalų. Išlydytas mišinys paverčiamas į pluoštą, naudojant didelio greičio sukimą. Mineralinės vatos gamybos proceso metu taip pat susidaro atliekų ir šalutinių produktų: mineralinės vatos nuopjovos, nuosėdos filtruose, centrifugavimo atliekos (neišplaušinto lydalo dalelės (karoliukai) ir į atliekas patekę mineralinės vatos plaušeliai), lydymo metu atsiskiriantis geležies lydalas, šlakas, lydalo likučiai ir kt. Spėjama, kad EU27 šalyse 2020 m. mineralinės vatos atliekų bus apie ~2,5 milijonų tonų. Dalį šių atliekų pavyksta sėkmingai grąžinti į mineralinės vatos gamybos procesą arba panaudoti kaip žaliavą gaminant kitus produktus. Tačiau didelė dalis atliekų iki šiol konservuojama sąvartynuose. Pagrindiniai sunkumai, kylantys bandant perdirbti mineralinės vatos atliekas bei panaudoti jas kitų produktų gamybai, yra susiję su gaunamų žaliavų grynumu bei mineralinės vatos atliekų poveikiu sveikatai (pvz., fenolio ir formaldehidų buvimu sudėtyje). Taip pat reikia įvertinti ir ekonominius rodiklius, tokius kaip transportavimo, perdirbimo kaštai, darbo jėgos kaštai bei aplinkosaugos kaštai. Šiuo metu nuolat ieškoma naujų sprendimų mineralinės vatos atliekoms perdirbti ir panaudoti įvairiems produktams gaminti, mažinant tokiu būdu atliekų (tarp jų ir kenksmingų) kaupimąsi ir su juo susijusį neigiamą poveikį gamtai ir žmonių sveikatai. Šiame darbe siekiama įvertinti mineralinės vatos gamybos atliekų panaudojimo dangų technologijose perspektyvumą (Papadopoulos, 2005; Kizinievič, Balkevičius, Pranckevičienė ir Kizinievič, 2014; Vantsi ir Karki, 2014).

Skirtingų dangų formavimui yra sukurta daug įvairių metodų ir naudojama daug įvairių medžiagų. Padengimo tikslas dažniausiai yra apsaugoti detalę nuo įvairių mechaninių bei cheminių pažeidimų. Apsauginės dangos leidžia sumažinti detalių paviršių irimą dėl įvairių tipų korozijos bei dilimo, tokiu būdu padidinant įrangos resursą ir sumažinant kaštus, susijusius su įrangos stabdymu bei remontu. Taikant padengimo technologijas taip atliekamas detalių restauravimas – ekonominis efektas ypač didelis, kai remontuojamos ypatingos, vienetinės detalės, kurių gamyba yra ypač brangi. Pagrindinės medžiagos, taikomos apsauginių dangų gamybai, tai metalai ir jų lydiniai, oksidinė ir neoksidinė keramika bei kompozitai šių medžiagų pagrindu. Plačiai pritaikomos yra metalo matricos kompozitinės dangos, kuriose plastiška metalinė matrica užtikrina gerą sukibimą su substratu, dangos tįsumą, antikoroazines savybes (kai reikia) bei paskirsto kietas daleles, užtikrinančias atsparumą dilimui, arba, pavyzdžiui, kietojo tepalo savybėmis pasižyminčias daleles, užtikrinančias geras tribologines savybes. Tokiems tikslams gali būti naudojamos atitinkamomis savybėmis pasižyminčios pramoninės atliekos, kurių nėra galimybės

perdirbti arba grąžinti atgal į gamybą (Fotovvati, Namdari ir Dehghanghadikolaei, 2019; Yu ir Li, 2018).

Terminis purškimas yra bendras terminas, vartojamas apibrėžiant medžiagų padengimo procesus, kurių metu padengimui naudojama medžiaga įkaitinama ir išpurškiama, tokiu būdu formuojant dispersinių dalelių srautą. Sraute dalelės yra įgreitinamos ir nukreipiamos į paruoštą paviršių, su kuriuo susidūrus, subliūška ir suformuoja tiškalus. Įvykus susidūrimui, susidaro ryšys tarp tiškalių. Taip susidaro atitinkamo storio danga. Pagrindinis terminio užpurškimo privalumas yra tas, kad šiam procesui gali būti naudojamas itin platus medžiagų pasirinkimas (Davis, 2004; Dearnley, 1988).

Šiame baigiamajame darbe yra siekiama ištirti, ar galima pritaikyti mineralinės vatos gamybos metu susidarančias atliekas kompozitinėms dangoms kurti.

Tyrimo objektas

Tyrimo objektas – mineralinės vatos gamybos atliekos: šlakas, lydalas bei latako nuosėdos, ir dangos, pagamintos naudojant šias atliekas.

Darbo tikslas

Darbo tikslas – nustatyti mineralinės vatos gamybos atliekų savybes ir jų, kaip užpildo, poveikį apsauginių dangų savybėms.

Darbo uždaviniai

1. Atlikti literatūros analizę mineralinės vatos gamybos atliekų, kompozitinių dangų ir jų tyrimo metodų tema.
2. Parinkti 2–3 atliekų tipus tyrimams, sudaryti tyrimų metodiką, nustatyti elementinę bei fazinę sudėtį ir kitas savybes.
3. Parengti eksperimentinių dangų formavimo ir tyrimo metodiką.
4. Atlikti dangų formavimo eksperimentus bei ištirti suformuotų dangų mikrostruktūrą, kietumą ir kitas savybes.
5. Išanalizuoti ir susisteminti tyrimo rezultatus, įvertinti mineralinės vatos gamybos atliekų galimą panaudojimą dangų ir panašiose technologijose.
6. Gautų rezultatų pagrindu suformuluoti išvadas ir rekomendacijas.

Darbo planas

Žaliavų (mineralinės vatos gamybos atliekų) paruošimas (malimas, sijojimas) bei jų ištyrimas (elementinės ir fazinės sudėties nustatymas, gautų po malimo dalelių morfologijos tyrimas); ištirtų žaliavų rezultatų analizė ir galimybės pritaikyti purkštosioms dangoms įvertinimas; padengimo metodikos sudarymas; bandomųjų dangų formavimas; dangų tyrimas (mikrostruktūra; kietumas; atsparumas dilimui).

Tyrimų metodika

Darbe taikomi analitiniai ir eksperimentiniai tyrimo metodai. Išanalizuotas mineralinės vatos gamybos procesas ir identifikuotos proceso metu susidarančios atliekos; tolesniems eksperimentiniams tyrimams atrinktos 3 atliekos. Taikant malimą ir sijojimą, paruoštos skirtingų frakcijų atliekų milteliai. Taikant rentgeno fluorescentinę analizę, rentgeno spindulių difrakcijos analizę ir skenuojamąją elektroninę mikroskopiją, nustatyta atliekų cheminė ir fazinė sudėtis bei ištirta morfologija. Naudojant nikelio ir atliekų miltelius, paruošti mišiniai eksperimentinėms dangoms formuoti. Parengta eksperimentinių dangų formavimo metodika ir atlikti dangų formavimo bandymai. Dangų savybės įvertintos taikant mikrostruktūros tyrimą, kietumo matavimus, tribologinį bandymą.

Tyrimo naujumas

1. Mineralinės vatos gamybos metu susidarančios atliekos pritaikytos kompozitinėms purkštinėms dangoms gaminti.
2. Nustatytas atliekos (šlako) poveikis kompozitinių nikelio matricos dangų struktūrai ir savybėms.

Darbo aprobacija

2020 metais Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“ buvo skaitytas pranešimas tema „Mineralinės vatos gamybos atliekų tyrimas ir jų taikymo apsauginėms dangoms gaminti įvertinimas.“ (žr. 1 priedą).

1 Literatūros apžvalga

1.1 Atliekų problematika

Visose pramonės įmonėse po gamybos proceso susidaro įvairių atliekų, kurias būtina tinkamai sutvarkyti ir, svarbiausia, tai padaryti aplinkai saugiu būdu. Gamybinėmis atliekomis laikomos medžiagų (žaliavų), pusgaminių ir kitų materialinių išteklių, susidarančių produkcijos gamybos (darbų atlikimo, paslaugų teikimo) procese, likučiai, visiškai arba iš dalies praradę pirmines vartojimo savybes – chemines ar fizines. Pramoninių atliekų kiekis didėja nerimą keliančiu greičiu, o įvairių pramoninių atliekų šalinimas sąvartynuose nebėra įmanomas. Atliekų srautus yra sudėtinga matuoti, sekti ir vertinti, ypač jeigu tai yra industrinės atliekos. Jungtinėse Amerikos Valstijose (JAV) kasmet pagaminama apie 236 milijonus tonų kietų komunalinių atliekų, tačiau pramoninių atliekų kiekis nėra toks aiškus. Yra spėjama, kad kasmet susidaro 7,6 milijardo tonų komunalinių atliekų. Kai kurie didieji miestai turi išvežti savo komunalines ir pramonines atliekas už tai sumokėdami kitoms valstybėms. Pavyzdžiui, Niujorkas per dieną išleidžia apie 1 mln. dolerių atliekų išvežimui. (Krishna et al., 2020; Recover Inc., 2017).

Pasauliui artėjant link urbanistikos ateities, kietųjų komunalinių atliekų, kurios yra vienas iš svarbiausių šalutinių miesto gyvenimo būdo produktų, kiekis auga dar sparčiau nei urbanizacijos tempas. Prieš dešimt metų 2,9 milijardo miesto gyventojų sugeneravo apie 0,64 kg atliekų vienam asmeniui per dieną (0,68 milijardo tonų per metus). Apskaičiuota, kad iki 2025 m. miesto gyventojų greičiausiai padidės iki 4,3 milijardo, kurie per dieną susidarys apie 1,42 kg komunalinių atliekų (2,2 milijardo tonų per metus) (Hoornweg ir Bhada-Tata, 2012).

Komunalinių kietųjų atliekų tvarkymas yra svarbiausia miesto teikiama paslauga; mažas pajamas gaunančiose ir daugelyje vidutinės pajamas gaunančių šalių kietųjų atliekų tvarkymas yra didžiausias atskiras biudžeto punktas miestams ir vienas didžiausių darbdavių. Komunalinių atliekų tvarkymas paprastai yra ta paslauga, kuri visiškai patenka į vietos valdžios kompetenciją. Miestas, kuris negali efektyviai sutvarkyti savo atliekų, retai sugeba tvarkyti sudėtingesnes paslaugas, tokias kaip sveikata, švietimas ar transportas (Hoornweg ir Bhada-Tata, 2012).

Prastai tvarkomos atliekos daro didžiulį poveikį sveikatai, vietos ir pasaulio aplinkai bei ekonomikai; netinkamai tvarkomos atliekos paprastai sukelia didesnes paskesnes sąnaudas, nei pirmiausia kainuotų tinkamai sutvarkyti atliekas. Visuotinis komunalinių atliekų pobūdis apima jo indėlį į kenksmingų dujų išmetimą į aplinką, pvz. metanas, susidarantis iš organinių atliekų srauto frakcijų, ir vis labiau didėjančios globalios sąsajos tarp produktų, miesto praktikos ir perdirbimo pramonės (Hoornweg ir Bhada-Tata, 2012).

Pasaulyje atliekų kiekis auga greitai – net greičiau nei urbanizacijos mastas. Panašiai kaip urbanizacijos tempai ir BVP augimas, komunalinių atliekų augimo sparta yra sparčiausia

Kinijoje, kitose Rytų Azijos dalyse, Rytų Europos ir Vidurio Rytuose. Savivaldybių planuotojai kietąsias atliekas turėtų tvarkyti kiek įmanoma paprasčiau. Miesto kietųjų atliekų susidarymo normos ir dujų išmetimas į aplinką yra glaudžiai susiję. Šis ryšys greičiausiai panašus su kitomis miesto įvestimis / išvestimis, tokiomis kaip nuotekos ir bendras energijos suvartojimas. Integruotas komunalinių atliekų tvarkymas ir supaprastintas požiūris, sutelkiant dėmesį į miesto formą ir gyvenimo būdo pasirinkimą, gali duoti daugiau naudos (Hoornweg ir Bhada-Tata, 2012).

1.1.1 Atliekų naikinimo būdai

Atliekų tvarkymo sektoriuje laikomasi visuotinai priimtose hierarchijos. Hierarchija prasidėjo kaip „trys R“ – „reduce“ (sumažinti), „reuse“ (pakartotinai naudoti), „recycle“ (perdirbti), tačiau dabar dažnai pridedamas ketvirtasis R – „recovery“ (atkūrimas). Hierarchija reaguoja į finansinius, aplinkos, socialinius ir vadybos aspektus. Hierarchija taip pat skatina sumažinti dujų išmetimą į aplinką (Hoornweg ir Bhada-Tata, 2012).

1. Atliekų mažinimas: atliekų ar jų šaltinių mažinimo iniciatyvomis (įskaitant prevenciją, sumažinimą iki minimumo ir pakartotinį naudojimą) siekiama sumažinti atliekų kiekį gamybos vietose pertvarkant produktus arba keičiant gamybos ir vartojimo modelius. Atliekų susidarymo sumažėjimas turi dvigubą naudą mažinant išmetamą šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekį. Pirmiausia išvengiama su žaliavų ir gaminių gamyba susijusių teršalų. Antrasis pranašumas yra išmetamų teršalų, susijusių su išvengta atliekų tvarkymo veikla, pašalinimas (Hoornweg ir Bhada-Tata, 2012).

2. Perdirbimas ir medžiagų utilizavimas: pagrindiniai perdirbimo ir naudojimo pranašumai yra mažesnis šalinamų atliekų kiekis ir žaliavų grąžinimas ekonomikai. Daugelyje besivystančių šalių neoficialūs atliekų rinkėjai surinkimo punktuose ir šalinimo vietose atgauna didelę dalį atliekų. Pavyzdžiui, Kinijoje apie 20% išmestų atliekų panaudojama perdirbti, daugiausia dėl neoficialių atliekų rinkimo. Susijusios šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijos atsiranda dėl anglies dioksido, susijusio su elektros energijos sunaudojimu medžiagų utilizavimo įrenginiams eksploatuoti. Neoficialus atliekų rinkėjų perdirbimas išmeta mažai šiltnamio efektą sukeliančių dujų, išskyrus perdirbant medžiagas, skirtas pardavimui ar pakartotiniam naudojimui, kuris gali būti palyginti didelis, jei netinkamai sudeginamas, pvz. metalo panaudojimas iš e-atliekų (Hoornweg ir Bhada-Tata, 2012; Hoornweg, Lam ir Chaudry, 2005).

3. Aerobinis kompostavimas ir anaerobinis virškinimas: kompostavimas yra skirtas aerobinei (su deguonimi) operacijai, kuri leidžia išvengti metano susidarymo, susijusio su anaerobinėmis sąlygomis (be deguonies). Taikant anaerobinį skaidymo procesą, organinės atliekos apdorojamos uždaramame inde. Anaerobinis skaidymas, dažnai susijęs su nuotekų valymo įrenginiais, sudarys metaną, kuris gali būti deginamas arba naudojamas šilumai ir (arba) elektrai gaminti. Apskritai, kompostavimas yra mažiau sudėtingas, atleidžiantis ir pigesnis nei anaerobinis

virškinimas. Metanas yra skirtas šalutinis anaerobinio skaidymo produktas, kurį galima surinkti ir sudeginti. Daugelio jurisdikcijų patirtis rodo, kad kompostuojant iš šaltinio atskirtas organines medžiagas žymiai sumažinamas gatavo komposto užterštumas, užuot perdirbus mišrias komunalines atliekas su atskyrimu pradžioje arba pabaigoje (Hoornweg ir Bhada-Tata, 2012).

4. Deginimas: atliekų deginimas (su energijos sugražinimu) pašalintų atliekų kiekį gali sumažinti iki 90%. Šis didelis tūrio sumažėjimas pastebimas tik atliekų srautuose, kuriuose yra labai daug pakavimo medžiagų, popieriaus, kartono, plastiko ir sodininkystės atliekų. Pageidautina, kad prieš išvežant atliekas į sąvartyną būtų atkurta į atliekas įdėta energinė vertė – jei yra tinkamai atsižvelgta į taršos kontrolės reikalavimus ir kaštus. Paprastai deginimas neatgaunant energijos (arba neautogeninis deginimas, kai yra poreikis reguliariai pilti degalus) nėra tinkamas pasirinkimas dėl išlaidų ir taršos. Atviras atliekų deginimas yra ypač atgrasomas dėl didelės oro taršos, susijusios su degimu žemoje temperatūroje (Hoornweg ir Bhada-Tata, 2012).

5. Sąvartynas: Kitų procesų atliekos ar likučiai turi būti siunčiami į šalinimo vietą. Sąvartynai yra bendra galutinio atliekų šalinimo vieta, todėl jie turėtų būti suprojektuoti ir tvarkomi siekiant apsaugoti aplinką ir visuomenės sveikatą. Sąvartyno dujos (SD), susidarančios dėl anaerobinio organinių medžiagų skaidymo, gali būti panaudotos ir metanas (apie 50% SD) sudeginamas su energijos gražinimu arba be jo, kad būtų sumažintas išmetamas šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekis. Tinkamų sąvartynų dažnai trūksta, ypač besivystančiose šalyse. Sąvartynai paprastai pereina nuo atviro išmetimo, kontroliuojamo išmetimo, kontroliuojamo užkasimo iki sanitarinių sąvartynų (Hoornweg ir Bhada-Tata, 2012).

1.2 Mineralinės vatos gamybos procesas

Mineralinė vata dažnai apibrėžiama kaip bet kokia pluoštinė stiklinė medžiaga, pagaminta iš mineralų (paprastai natūralių akmeninių medžiagų, tokių kaip bazaltas ar diabazė) arba mineralinės kilmės produktų, tokių kaip šlakas ir stiklas (*AP-42: Compilation of Air Emissions Factors, Volume 1: Stationary point and area sources (5-oji laida)*, 2009).

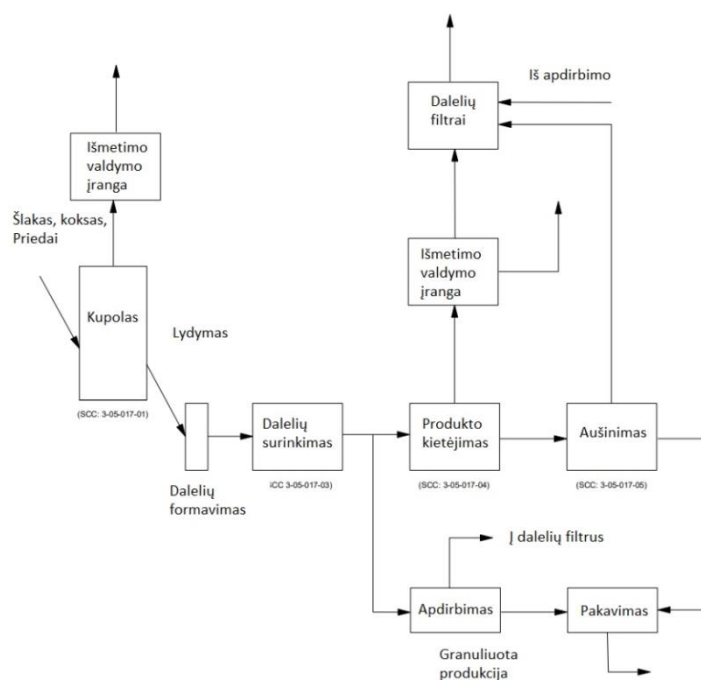
Dauguma mineralinių vatų yra gaminamos iš šlako arba iš šlako ir akmens mišinio. Naudojamas šlakas dažniausiai atsiranda, kaip šalutinis produktas ketaus gamyboje naudojamos aukštakrosnės. Šlako taip pat galima rasti vario, švino ir fosfato pramonėje. Gamybos procesą sudaro 3 pagrindiniai etapai – mineralų išlydymas aukštakrosnėje, pluoštų sudarymas ir surinkimas bei galutinio produkto formavimas (*AP-42: Compilation of Air Emissions Factors, Volume 1: Stationary point and area sources (5-oji laida)*, 2009).

Pirmajame etape vyksta mineralinės medžiagos lydymas. Žaliavos (šlakas ir uoliena) yra paduodamas į krosnį. Padavimas vyksta sluoksniais su kokso mase santykiu nuo 5 iki 6 dalių mineralų iki 1 dalies kokso. Uždegus kokšą, mineralinės medžiagos yra pašildomos nuo 1300 iki

1650 °C, kol žaliavos išsilydo (AP-42: *Compilation of Air Emissions Factors, Volume 1: Stationary point and area sources* (5-oji laida), 2009).

Išsilydyta žaliava yra išleidžiama per lydkrosnės apačią, per vandeniui aušinamus tunelius, ir krenta ant išplaušinio įrenginio. Sukimo metu ne visa žaliava virsta į plaušelius. Atliekos nuo vatos, dėl žemės traukos, yra atskiriamos iškart po išplaušinio (AP-42: *Compilation of Air Emissions Factors, Volume 1: Stationary point and area sources* (5-oji laida), 2009).

Po formavimo ir cheminio apdirbimo, pluoštai yra surenkami drenažo kameroje. Dervomis ir (arba) alyvomis dengti pluoštai yra nuleidžiami į apačią ant vielinio tinklelio naudojant ventiliatorius esančius žemiau surinkėjo. Keičiant konvejerio greitį, galima pasiekti norimą storį. Mineralinė vata, kartu su rišikliu, yra transportuojama konvejeriu į kietėjimo krosnį, kur vilnos antklodė yra suspausta iki tinkamo tankio ir riškis yra iškepamas. Toliau seka aušinimo sekcija, kur oras iš ventiliatorių yra pučiamas į vatą. Toliau vata yra supjaustoma į tam tikras dalis, pagal poreikį galutiniam produktui (AP-42: *Compilation of Air Emissions Factors, Volume 1: Stationary point and area sources* (5-oji laida), 2009).



1 pav. Mineralinės vatos gamybos technologijos schema (AP-42: *Compilation of Air Emissions Factors, Volume 1: Stationary point and area sources* (5-oji laida), 2009).

1.3 Mineralinės vatos gamybos atliekų problema

Mineralinės vatos gamybos proceso metu taip pat susidaro atliekos ir šalutiniai produktai: mineralinės vatos nuopjovos, nuosėdos filtruose, centrifugavimo atliekos (neišplaušinto lydalo dalelės (karoliukai) ir į atliekas patekę mineralinės vatos plaušeliai), lydymo metu atsiskiriantis geležies lydalas, šlakas, lydalo likučiai ir kt. Spėjama, kad EU27 šalyse 2020 mineralinės vatos atliekų bus apie ~2,5 milijonų tonų. ES atliekų prevencijos ir perdirbimo

strategijoje nurodoma (Europos Komisija 2005), kad ES šalys narės turi tapti atliekas perdirbančia bendruomene. Nurodoma, kad daugelyje valstybių narių dažniausiai taikomas atliekų šalinimo metodas – užkasimas sąvartynuose, todėl pakartotinis naudojimas, grąžinimas perdirbimui ir energijos iš atliekų gavimas, siekiant taupyti gamtinius išteklius, kol kas nėra išplėtotas. Įgyvendinant ES atliekų prevencijos ir perdirbimo strategiją, šiandien vyraujantys įvairių atliekų pašalinimo sprendimai, kurie remiasi atliekų laidojimu sąvartynuose, turės būti peržiūrėti pereinant prie pavojingų ir antrinių atliekų perdirbimo, grąžinant jas į gamybos procesą arba pasiūlant rinkai saugius produktus, gautus perdirbus tokias atliekas (Pranckevičienė, 2011).

Mineralinės vatos gamybos centrifugavimo atliekos (MVCF atliekos) yra aliumosilikatinė technogeninė žaliava, susidaranti mineralinės vatos gamybos metu. Atliekas sudaro neišplaušinto lydalo dalelės (karoliukai) ir į atliekas patekę mineralinės vatos plaušeliai. Kitos mineralinės vatos gamybos metu atsirandančios atliekos yra šlako, lydalo likučiai, lakieji pelenai, latako nuosėdos. Šlako pagrindinė fazė yra diopsidas, kas reiškia, kad tai ganėtinai kieta atlieka. Mineralinės vatos perdirbimo problemas sukelia medžiagos pluošto pobūdis, įskaitant cementiniame arba gipsiniame panaudojime, kur drastiškai sumažėja vandens poreikis (Pranckevičienė, 2011; Kinnunen, Yliniei, Talling ir Illikainen, 2016).

Šiuo metu yra keletas mineralinės vatos gamybos metu atsirandančių atliekų perdirbimo galimybių. Pirmoji yra galimybė grąžinti perdirbtą medžiagą į mineralinės vatos gamybos procesą. Naudojant šį būdą, gali atsirasti problemų krosnyje, kuri yra naudojama žaliavų lydymui. Smulkios dalelės gali užkimšti oro ir deguonies tiekimo sistemas. Siekiant to išvengti, galima, prieš grąžinant atliekas į gamybą, atlikti briketavimą, naudojant atitinkamą rišamąją medžiagą (Paroc Group Oy Ab., 2004; Corning, 1998).

Ohbergas užpatentavo atliekų briketavimo metodą, kuriam naudojami hidrauliniai rišikliai, pavyzdžiui portland cementis, molis ir natrio silikatas. Buvo ištirta, kad šiuos medžiagos nėra visiškai tinkamos briketavimui, kadangi tokių briketų gniuždomasis stipris krinta pasiekus 500 °C. Dėl to, pasiekus aukštas temperatūras, briketai suskyla į mažus gabaliukus, tai trikdo dujų bei oro tiekimą į krosnį. Nepageidautinas oro bei dujų tiekimas gali nulemti didelio aukštos temperatūros lydalo susiformavimą, kai tikslas yra, kad briketų paviršiai tolygiai išsilydytų (Ohberg, 1966; Holbek, 1981).

Holbekas užpatentavo briketų gniuždomojo stiprio padidinimo aukštoje temperatūroje metodą maišant skirtingas rišamąsias medžiagas, kad mišinyje būtų ne mažiau kaip 75 % SiO₂ ir jo dalelių dydis būtų <100 μm. Šiuo metodu pagamintų briketų gniuždomasis stipris buvo apie 5,9 N/mm² (60 kp/cm²), kurį Holbekas laiko pakankamu. Balkevičius et al. (2007) pristatė modelį, kuriame kaip rišiklis naudojami mažai tirpstantys moliai, sumaišyti su dolomitu ir cemento dulkėmis. Mineralinės vatos atliekos kartu su tokiu rišiklio mišiniu turėjo mažesnes temperatūrines

vertės nei paprastai naudojamas krosnies užtaisas, kurio sudėtyje yra 80 % bazalto ir 20 % dolomito (Holbek, 1981; Balkevičius, Christauskas, Gailius, Špokauskas ir Siaurys, 2007).

Kaip Europos Sąjungos „Life“ programos dalis buvo sukurtas metodas, kaip grąžinti smulkią mineralinės vatos gamybos atlieką į gamybą be briketavimo. Su šia technologija yra galimybė į gamybą sugrąžinti atliekas, kurių dalelės dydis yra tarp 0 ir 6 mm, tiekiant jas tiesiai į lydymosi zoną kupole. Taip galima pakeisti apie 10 % naudojamos grynos žaliavos į atlieką. Pakeičiant 5 % grynos žaliavos į gamybos atlieką, kokso sunaudojimas sumažėja daugiau kaip 10 %. Taip mažinami gamybos kaštai ir aplinkos tarša (Paroc Group Oy Ab., 2004).

Perdirbtą mineralinę vatą taip pat gali būti naudojama kaip žaliava kituose produktuose. Mineralinės vatos atliekas galima derinti su moliais kompozitinei keramikai gaminti. Pranckevičiene ir kt. ištyrė nefelino sinenito įtaką kompozito sukepimo savybėms keramikai, kurioje yra molio ir mineralinės vatos atliekos. Jie nustatė, kad su nefelino sinatu įmanoma pakeisti lydymosi temperatūrą ir maksimalaus endoterminio efekto temperatūrą, ir pakeisti ilgį, tankį, vandens sugėrimą ir susitraukimą degant turinčios mažai lydyto illito molio ir mineralinės vatos atliekas (Pranckevičiene, Balkevičius ir Špokauskas, 2010).

Cheng et al. (2011) ištyrė uolienų panaudojimo galimybę mineraline vatos atliekos cemento pagrindu pagamintuose kompozituose. Jie siūlo, kad mineralinės vatos atliekos gali būti naudojamos kaip šiurkštus užpildas, smulkus užpildas, cementinė medžiaga arba ypač švelnus užpildas betone, atsižvelgiant į mineralinės vatos atliekos cheminę sudėtį ir dalelių dydį. Jie nustatė, kad naudojant mineralinės vatos atlieką kaip natūralaus užpildo pakaitalą žymiai pagerėja gniuždymo stiprumas, tempimo stipris, absorbcija, varža ir atsparumas chlorido jonų įsiskverbimui (Cheng, Lin, ir Huang, 2011).

Mineralinė vata gali būti naudojama kaip dirbtinis substratas auginant įvairius augalus kultūrose, kur trūksta dirbamos dirvos. Iš 50 000 ha Europos šiltnamio kultūrų pasėlių ploto 20 000 ha yra užauginama ant dirbtinių substratų, kur didžiausią dalį sudaro mineralinė vata kaip substrato medžiaga. Dirbtiniai substratai naudojami šiltnamiuose, nes jie apriboja užsiteršimo problemas ir leidžia gauti didesnę derlių (Bougoul, Ruy, de Groot ir Boulard, 2005).

Maminski et al. (2011) ištirtos medžio ir mineralinės vatos hibridinių drožlių plokščių mechaninės savybės, storio pakitimas, šiluminės savybės ir užsidegimas. Jų išvada yra, kad mineralinė vata pagerino šilumos laidumą ir sumažino hibridinių plokščių degumą palyginti su tipine drožlių plokšte. Deja, tą teigiamą poveikį lydėjo mechaninių savybių suprastėjimas. Jie pasiūlė, kad mechaninis hibridinių plokščių savybes būtų galima pagerinti optimizuojant mineralinės vatos dalelių dydį, klijų kiekį, ir suspaudimo parametrus (Maminski, Krol, Jaskołowski, ir Borysiuk, 2011).

Gaminant mineralinę vatą, susidaro atliekos tokios kaip nuosėdos filtruose (angl. *Cupola Dust*). Viena vertus, mineralinės vatos pluošto atliekas galima perdirbti ir grąžinti į gamybos liniją, tačiau filtrų nuosėdos paprastai siunčiamos į atliekų sąvartyną. Kita vertus, mineralinės vatos pluošto atliekos gali būti naudojamos kaip stambių ir smulkių užpildų pakaitalas, taupant natūralių užpildų išlaidas ir mažinant poveikį aplinkai. Filtrų nuosėdos po mineralinės vatos gamybos yra labiau smulkios, todėl nėra lengvai perdirbamos. Buvo rasta, kad tirtas dulkes daugiausia sudaro kvarcas, periklazė, albitas, dolomitas ir amorfinės fazės (Stonys et al., 2016; Kubiliūtė, Kaminskas ir Kazlauskaitė, 2018).

Lydant uolienų ir kitų priedų mišinį krosnyje atsiskiria geležies lydalas. Būdamas didesnio tankio, jis nusėda apatinėje krosnies dalyje, iš kur yra nuleidžiamas į atskirus kontenerius ir kaupiamas ten. Kartu su geležies lydalu į šį kontenerį patenka šlakas, susidarantis lydant žaliavas, ir dalis likusio lydalo. Geležis nesudėtingai atskiriama nuo kitų atliekų ir pridudama į metalo laužą. Kitos gabalinės atliekos išvežamos į sąvartynus arba smulkinamos ir naudojamos gaminant statybinius gaminius, pvz. plytas, blokelius. Šiuose gaminiuose atliekų priedas gali sudaryti tik nedidelę dalį, kitaip mechaninės gaminių savybės labai suprastėja arba iš viso neįmanoma suformuoti gaminių. Šios atliekos pakankamai kietos. Atsižvelgiant į pradinių žaliavų, naudojamų gaminant mineralinę vatą, sudėtį, jų sudėtyje galima laukti silikatų arba atskirų elementų oksidų. Silikatai – didžiausia mineralų klasė. Daugiausiai susideda iš silicio ir deguonies ir dar kartu su aliuminio, magnio, geležies ir kalcio jonais. Atskirą struktūrinę silikatų klasę sudaro sluoksninę struktūrą turintys mineralai, tokie kaip serpentiniai, pasižymintys geromis kietojo tepalo savybėmis. Tokios medžiagos gali būti naudojamos apsauginėse dangose, siekiant pagerinti jų tribologines savybes. Jei tokių junginių būtų atliekose, jas galima būtų bandyti panaudoti dangose. Jei atliekose būtų rasta kietų oksidų, pavyzdžiui aliuminio oksido, jų priedai galėtų turėti teigiamo poveikio dangų kietumui ir atsparumui dilimui. Mineralinės vatos gamybos procese susidaro ir kitos atliekos. Taip, latake, kuriuo lydalas yra tiekiamas į plaušinimo būgną, taip pat kaupiasi nuosėdos. Dalis šių nuosėdų palieka grafitui būdingus pėdsakus. Grafitas taip pat yra žinomas kaip labai geras kietas tepalas (Болгов и Балабанов, 2011). Daug grafito turinčias atliekas taip pat galima būtų bandyti taikyti kaip tribologines savybes gerinantį priedą kompozitinėse dangose. Šio darbo eksperimentai inicijuoti, siekiant patikrinti šiuos spėjimus.

1.4 Apsauginės dangos

Laipsniškas naudojamų metalinių paviršių nusidėvėjimas dėl trinties arba korozijos gali sukelti didelių nuostolių įmonėms arba net nelaimingus įvykius. Pramonės industrijai įrangos nusidėvėjimo arba jos korozijos kaina yra milžiniška. Tai parodo, kad paviršių inžinerija yra toliau plėtojama. Paviršių inžinerija sprendžia metalinių paviršių padengimo klausimą, kad būtų

pagerintos jų konkrečios darbo sąlygos. Tai yra ypač svarbu pramonės įmonėse, kurių tikslas yra, kad jų gamyba dirbtų nepertraukiamai su mažiausiais įmanomais kaštais (Grainger ir Blunt, 1998).

Paviršių dengimo technologija yra naudojama sumažinti komponentų nusidėvėjimo kaštus suteikiant šias savybes komponentams:

- atitinkamas komponento darbo laikas;
- sumažinami aptarnavimo darbų kaštai;
- sumažinama komponento kaina, naudojant pigesnę pagrindinę metalą ir jį padengiant specialiomis savybėmis pasižyminčiu komponentu;
- galimybė suremontuoti komponentą po jo paviršių pažeidimo (Grainger ir Blunt, 1998).

Nors dauguma paviršių yra dengiami siekiant juos apsaugoti nuo korozijos arba nusidėvėjimo, yra ir kitos ekonomiškai svarbios medžiagų dengimo priežastys. Paviršių padengimas gali suteikti detalės paviršiui elektros laidumą arba kaip tik gali izoliuoti detalę nuo elektros srovės. Galiausiai, dengtasis sluoksnis gali veikti kaip šilumos izoliatorius, skiriantis detalę ir jos darbo aplinką (Grainger ir Blunt, 1998).

Metallų korozija yra metallų irimas, chemiškai veikiant agresyviajai aplinkai. Erozija yra metallų yra dėl mechaninio nutrynimo. Kartais abu reiškiniai pasireiškia kartu, pavyzdžiui, veikiant varikliams, siurbliams turbinoms. Šių reiškinų vyksmas vienu metu vadinamas korozine erozija, koroziniu nusidėvėjimu (Kerienė, 2014).

Metallų apsaugos nuo korozijos būdai: apsauginės dangos, legiravimas, elektrocheminė apsauga, inhibitoriai, konstrukcinės priemonės (Kerienė, 2014).

Metallams apsaugoti nuo korozijos naudojamos metalinės (mangano, cinko, nikelio, vario ir kitų metallų bei jų lydinų), metallų junginių (oksidų, fosfatų) ir nemetalinės (tepallų, lakų, dervų, gumos, cemento, emalių, keraminės ir kt.) apsauginės dangos (Kerienė, 2014).

Nusidėvėjimą galima apibūdinti kaip laipsnišką medžiagos praradimą nuo dirbančio detalės paviršiaus, veikiant trinčiai. Ši sąvoka apima metallo su metallu, metallo su kitos kietos medžiagos ir metallo su skysčių kontaktu. Taip pat, sąvoka aiškiai apibūdina, kad procesai vyksta detalės paviršiniuose sluoksniuose (Grainger ir Blunt, 1998).

1.4.1 Dengimui naudojami procesai

Dauguma metallų, lydinų, keramikinių medžiagų ir kai kurių nemetalinių mišinių gali būti naudojami dengimui kaip vienalyčiai komponentai arba kaip mišiniai, bet dauguma atveju jų charakteristikos apriboja procesus, kurie gali būti naudojami. Pavyzdžiui, ugniai atsparūs oksidai negali būti taikomi, kai yra naudojamas suvirinimo procesas arba, kad būtų galima naudoti karbidus, su jais reikia naudoti metalinę arba lydinio matricą (Grainger ir Blunt, 1998).

Medžiagos bei proceso ryšys apibūdina ne vien, kur jie gali būti naudojami, bet ir tai kokių dangos savybių galima tikėtis, pavyzdžiui dangos tankis, sukibimas su substratu (Grainger ir Blunt, 1998).

Dengimui naudojami procesai gali būti apvirinimas, terminis purškimas, elektrinis nusodinimas, garų nusodinimas (Grainger ir Blunt, 1998).

Apvirinimu yra pasiekiamas stipriausias ryšys tarp substrato ir dangos, galima gauti palyginti storas dangas ir su keliomis išimtimis, gali būti atliktas rankiniu arba automatinio būdu. Tinkama danga dažnai gali būti gauta naudojant daugiau nei vieną suvirinimo procesą. Gebėjimas pasirinkti daugiau nei vieną procesą yra vienas iš pagrindinių proceso privalumų. Dengimui gali būti naudojamas ypatingai didelis medžiagų diapazonas (Grainger ir Blunt, 1998).

Terminis purškimas turi 2 pagrindinius privalumus palyginus su suvirinimu. Pirmiausia, tai, kad terminio purškimo procesui gali būti naudojamos suvirinamos ir nesuvirinamos medžiagos, tokios kaip keramika. Antra, kad visos šios medžiagos gali būti nusodintos ant substrato medžiagos, kuri yra netinkama suvirinimui (dėl jos sudėties arba per plona ir atliekant suvirinimą labai deformuotąsi) (Grainger ir Blunt, 1998).

Elektrinio nusodinimo procesas turi mažesnę medžiagų pasirinkimą, palyginus su suvirinimu ir terminiu purškimu. Užtat procesui nereikia tokių aukštų temperatūrų, todėl substratas patiria mažesnes deformacijas, yra lengviau pasiekiami vidiniai paviršiai ir galima tiksliai reguliuoti dengiamo paviršiaus temperatūrą (Grainger ir Blunt, 1998).

Garų nusodinimui medžiagų pasirinkimas yra ypač mažas, tačiau jis gali būti naudojamas tada, kai kitus procesus naudoti yra sunku arba neįmanoma arba kai reikia sukurti kontroliuojamas plonas dangas (Grainger ir Blunt, 1998).

1.5 Kompozitinėms dangoms naudojamos medžiagos

Aluminio (Al) matricos kompozitinės dangos: geras lydinio stiprumo ir svorio santykis daro Al patrauklia medžiaga pramonėje. Tačiau, laikui bėgant, dėl galvaninės korozijos arba abrazyvų poveikio, Al lydinys gali tapti jautrus korozijai, nusidėvėjimui ar kitokiai degradacijai. Siekiant pagerinti mechanines ir fizikines savybes, Al matricos kompozitui buvo atlikta daugybė tyrimų, siekiant padidinti kietumą, atsparumą dilimui, atsparumą korozijai. Pagerintos Al matricos dangos savybės stipriai susijusios su naudojamu priedo savybėmis (Yu ir Li, 2018).

Vario (Cu) matricos kompozitinės dangos: Cu yra patraukli medžiaga elektronikoje dėl savo gerų elektrinių savybių ir šilumos laidumo. Tačiau blogos mechaninės savybės, įskaitant kietumą, stiprumą ir atsparumą dilimui, riboja darbo laiką. Pridedant tinkamus priedus galima pagerinti Cu mechaninį stiprumą bei laidumą. Pastaruoju metu buvo bandoma naudoti kai kurias kitas medžiagas, kaip dangos priedą, siekiant pasiekti gerą fizinį suderinamumą ir surišimą su Cu

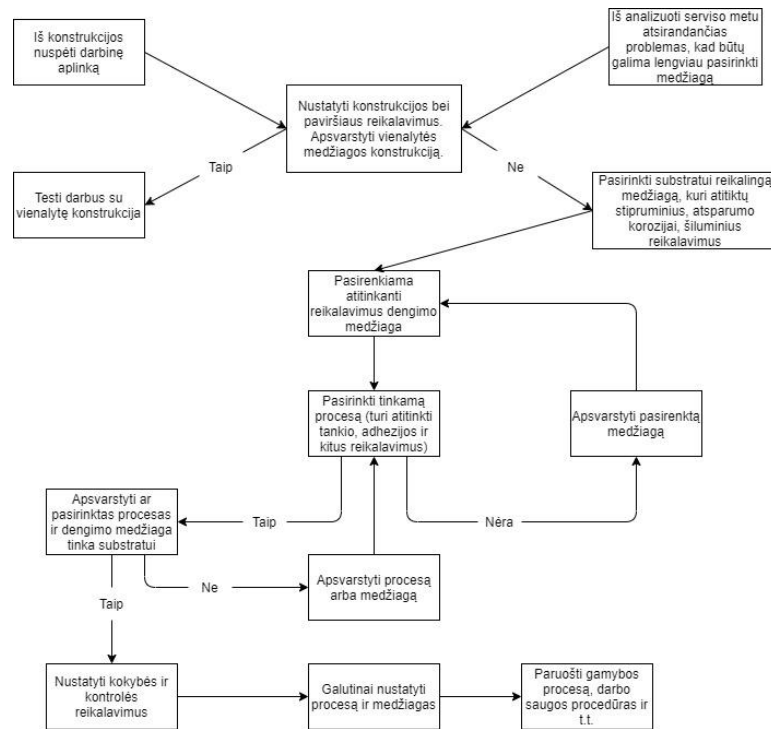
matrica. Pavyzdžiui, Al_2Cu sustiprintos Cu matricos kompozicinės dangos buvo sėkmingai sukurtos šaltuoju purškimu. Cu matricos kompozicinės dangos sustiprintos 5 tūrio% ir 10 tūrio% Al_2Cu pasižymi geresniu elektriniu laidumu ir atsparumu dilimui nei vien Cu danga (Yu ir Li, 2018).

Nikelio (Ni) matricos kompozitinės dangos: Ni lydiniai yra plačiai naudojami jūrų inžinerijoje ir energetikos pramonėje. Didelis tankis ir mažas oksido kiekis yra vienos iš svarbiausių savybių užtikrinančių aukštą Ni dangos atsparumą korozijai. Viena iš pagrindinių nikelio dangų charakteristikų yra jo kietumas, kuris gali būti nuo 150 HV iki 700 HV. Tai suteikia gerą atsparumą dilimui, ypač slydimui. Ni dangos nėra labai brangios, todėl yra plačiai naudojamos dangų kūrimui (Yu ir Li, 2018; Gedeon, 2011; Wang, Chang, Lei, Fu ir Lin, 2017).

Kobalto (Co) matricos kompozitinės dangos: Co gali puikiai dirbti aukštose temperatūrose, todėl buvo plačiai tiriamas dangų formavimuose. Kadangi gryo Co milteliai yra brangūs, jie dažniausiai laikomi kaip pridėtinė medžiaga metalinių matricų dangose. Gao et al. buvo ištirta Co priedo įtaka mikrostruktūrai ir tarpfaziniam sujungimui geležies miltelių plakiruotame pliene. Rezultatai parodė, kad Co priedas padidina dendritinę struktūrą plakiruotame sluoksnyje bei padidinti sujungimo jėgą tarp plakiravimo sluoksnio ir substrato (Wang ir et al., 2017; Gao, Bian, Tian ir Fu, 2009).

1.5.1 Medžiagos/proceso pasirinkimas

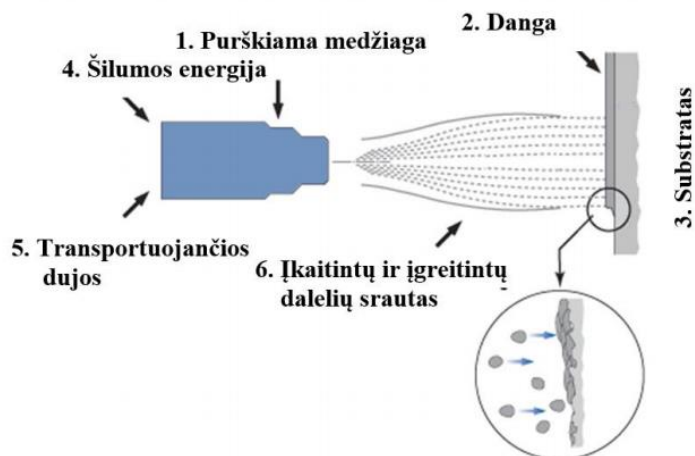
Kai yra didelis medžiagų pasirinkimas, gali atrodyti, kad proceso bei dengimui skirtos medžiagos parinkimas yra sudėtingas procesas, kai iš tiesų tai ganėtinai paprasta. Dažniausiai pasirinkimą riboja medžiagų prieinamumas, bet sprendžiant naują užduotį, padeda 2 paveiksle parodyta diagrama. Priimant sprendimą, reikia žinoti keletą svarbių dalykų. Pirmiausia turi būti žinoma darbo sąlygos, remiantis patirtimi arba konstravimo informacija. Tai yra esminis medžiagos pasirinkimo kriterijus. Toliau reikia nuspręsti tuos medžiagos padengimui tinkamą procesą. Tuo etapu reikia nustatyti substrato suderinamumą su procesu. Taip pat, reikia nustatyti kaip substratas veikia su dangos formavimui skirta medžiaga. Nustačius šiuos dalykus ir įsitikinus, kad jie atitiks detalei keliamus reikalavimus, galima vykdyti dangos formavimą (Grainger ir Blunt, 1998).



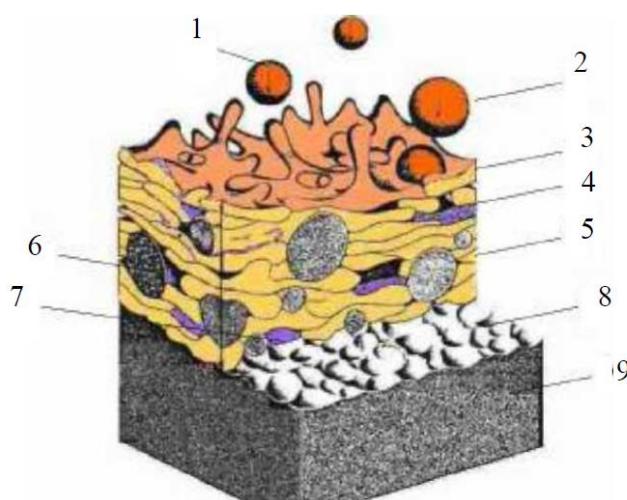
2 pav. Medžiagos bei proceso pasirinkimo diagrama

1.6 Terminis purškimas

Pagal LST EN 657 (ISO 14917), terminis purškimas – procesas, kurio metu purškiamoji medžiaga įkaitinama iki plastinės arba išlydytos būsenos purškiklio viduje arba išorėje ir nukreipiama į paruoštą paviršių; substratas lieka neišlydytas. Paprastai kalbant, terminio purškimo dangos susidaro kaitinant medžiagą miltelių ar vielos pavidalų iki ištirpusios ar pusiau ištirpusios būsenos. Medžiaga yra išstumama naudojant suspaustas dujas ar orą, taip sukuriant apsauginį paviršių ant substrato. Padengimui naudojama medžiaga gali būti iš vieno elemento, bet dažniausiai yra kompozitinė medžiaga su unikaliomis mechaninėmis savybėmis, kurias galima pasiekti tik naudojant terminio purškimo procesą. Bendrai kalbant, terminio purškimo dangos yra ekonomiškąs variantas, norint pagerinti substrato darbui reikalingas savybes. Dangos gali būti metalinės, keraminės, plastinės ar bet kokia medžiagų kombinacija siekiant pasiekti visas norimas savybes. Terminio purškimo dangos gali būti ekonomiškiausias būdas siekiant apsaugoti substratą nuo korozijos ar dilimo. Kitos pagrindinės terminio purškimo dangų funkcijos yra matmenų atkūrimas, tikslios tolerancijos palaikymas, šiluminių ir elektrinių savybių pakeitimas (Kerienė, 2014; Fauchais, Heberlein ir Boulos, 2014).



3 pav. Supaprastinta terminio purškimo schema (Kuzma, 2011)



4 pav. Terminio purškimo proceso sandara: 1 – oksidų plėvelė; 2 – purškiamos medžiagos lašeliai; 3 – susidūrę su paviršiumi ir subliuškę lašeliai; 4 – mechaninio sukibimo zona; 5 – lokalinio susilydymo zona; 6 – nevisiškai išsilydžiusi dalelė; 7 – pora; 8 – substrato paviršius; 9 – substratas (Kuzma, 2011)

Bendros terminio purškimo metodų charakteristikos:

- paprasti;
- našūs;
- universalūs;
- palyginti nebrangūs dangų formavimo metodai;
- gaunamų dangų storiai nuo 0,02 mm iki 50 mm (ir daugiau);
- galimybė atlikti procesą lauko sąlygomis;
- mažas terminis poveikis substratui (išskyrus purškimo-perlydymo metodą);
- beveik jokių dydžio ir formos apribojimų dengiamam paviršiui;
- galimybė padengti tiek visą detalę, tiek atskirą jos paviršiaus vietą. (Fauchais et al, 2014)

Terminio purškimo metodų taikymo sritys:

- naftos ir chemijos pramonėje,

- laivų ir tiltų statyboje,
- mašinų gamyboje,
- transporte ir aviacijoje,
- atominėje energetikoje ir kosminėje pramonėje,
- medicinoje,
- elektronikoje ir elektrotechnikoje,
- maisto pramonėje ir kt. (Fauchais et al, 2014)

Pagrindinės purkštųjų dangų funkcijos:

- ✓ darbinių paviršių restauravimas ir remontas;
- ✓ apsauga nuo korozijos;
- ✓ apsauga nuo abrazyvinio, erozijos, trinties ir kitų nusidėvėjimo formų;
- ✓ termoizoliacija arba terminis laidumas;
- ✓ elektros izoliacija arba laidumas;
- ✓ apsauga nuo aukštatemperatūros korozijos ir oksidacijos;
- ✓ ir kitos. (Fauchais et al, 2014)

Terminio purškimo rūšys:

Liepsninis purškimas. Tai procesas, kurio metu purškiamoji medžiaga kaitinama deguonies ir degiųjų dujų mišinio liepsnos ir smulkių dalelių srauto pavidalu nukreipiama į substratą. Purškiamoji medžiaga bendru atveju gali būti miltelių, strypų, lanksčių miltelinių arba pilnavidurių vielų pavidalu. Įkaitintos medžiagos dalelių srautas nukreipimas į substratą tik deguonies ir degiųjų dujų mišinio liepsnos arba papildomai naudojamas transportuojančių dujų srautas, pvz. suspaustas oras (Flame spray technologies, 2016).

Detonacinis purškimas. Proceso veikimo principas panašus į vidaus degimo variklio. Į purkštuvo kamerą porcijomis tiekiami milteliai, deguonis ir degiosios dujos. Tam tikrais intervalais kameroje kibirkštimi uždegamas dujų ir miltelių mišinys. Sprogus degiajam mišiniui, išsiskiria šiluma, įkaitinanti miltelius iki plastiškos, išlydytos arba pusiau išlydytos būsenos, o susidaranti smūginė banga nukreipia lašelius dengiamo paviršiaus kryptimi. Po kiekvienos detonacijos kamera išvaloma azoto dujų srautu (Flame spray technologies, 2016).

Šaltasis purškimas. Šaltajam purškimui yra naudojamas specialios konstrukcijos purkštuvas: jo antgalis yra Lavalio tūtos formos. Tokios formos tūtoje dujos (dažniausiai azotas) įgreitinamos iki viršgarsinių greičių. Miltelių formos purškiamoji medžiaga tiekama į purkštuvą. Dujų srautas nukreipia daleles viršgarsiniu greičiu į paruoštą substratą. Procesui yra būdingas tam tikras dalelių skriejimo greitis, kurį pasiekus gaunama tanki danga, turinti stiprų adhezinį ryšį su substratu. Šis greitis priklauso nuo purškiamos medžiagos (Flame spray technologies, 2016).

Elektrolankinis purškimas. Proceso metu elektros lankas dega tarp dviejų vielų, kurių galai lydosi. Į purkštuvą tiekiamas dujų srautas, paprastai – suspausto oro; šis srautas praeina per besilydančius vielų galus, išpurškia išlydytą metalą į smulkias dalelis ir srauto pavidalu bloškia jas ant paruošto substrato. Vielos gali būti tiek tos pačios cheminės sudėties, tiek skirtingos. Purškimo srautas gali būti papildomai apsaugotas dujomis (Flame spray technologies, 2016).

Plazminis purškimas ore. Plazma susidaro iš dalies arba visiškai jonizuojantis dujoms elektros lanke, kuris dega tarp katodo (purkštuvo viduje) ir anodo (išorinės purkštuvo tūtos). Susidaręs karštos plazmos srautas įkaitina tiekiamus miltelius iki plastinės, pusiau išlydytos arba išlydytos būsenos ir nukreipia dalelių srautą link paruošto substrato. Milteliai tiekiami į purkštuvo vidų arba iš išorės. Purškimo srautas gali būti papildomai apsaugotas dujomis arba purškimas atliekamas vakuume, arba esant slėgiui iki 1 bar (Flame spray technologies, 2016).

Lazerinis purškimas. Lazerinio purškimo metu į lazerio spindulio veikimo sritį yra tiekiami milteliai; lazerio spindulys išlydo juos. Purškiamų miltelių srautas nukreipiamas į paviršių transportuojančių dujų srautu ir dėl gravitacijos. Purškimo srautas gali būti apsaugotas dujomis (Flame spray technologies, 2016).

Lydalo purškimas. Purškiamoji medžiaga įkaitinama iki skystos būsenos, dažniausiai rezervuare, ir įkaitintų atomizuotų dujų (suspausto oro) srautu bloškiama ant paruošto substrato (Flame spray technologies, 2016).

1.7 Apibendrinimas

Atlikus literatūros analizę, matoma, kad kol kas nėra tinkamo būdo panaudoti visas mineralinės vatos gamybos metu susidarančias atliekas, kadangi kol kas atrasti metodai reikalauja didelių kaštų, nėra patikimi arba sunkiai pritaikomi. Taip pat iš analizės matoma, kad atliekų problema pasaulyje yra opi, todėl reikia ieškoti papildomų būdų, kur būtų galima panaudoti mineralinės vatos gamybos metu susidarančias atliekas.

Šio darbo tyrimams atrinktos 3 tipų mineralinės vatos gamybos metu susidarančios atliekos: šlakas, lydalo likučiai ir lydalo nuleidimo latako nuosėdos. Spėjama, kad dėl savo sudėties, sandaros ir savybių, šios atliekos gali turėti teigiamą poveikį dangų kietumui ir / arba tribologinėms savybėms.

Metalinėms ir metalo matricos kompozitinėms dangoms yra naudojamos 3 pagrindinės lydinų grupės – geležies, nikelio ir kobalto. Nikelis ir kobaltas labiausiai tinka, kai reikia apsaugos aukštesnėse temperatūrose, esant dilimui, gero sukibimo su substratu. Kobaltas pasižymi geresnėmis mechaninėmis savybėmis, bet jis brangesnis, sunkiai prieinamas. Nikelio pagrindu formuoti lydiniai yra vieni iš plačiausiai taikomų, nėra tokie brangūs bei geriau prieinami, todėl tyrime yra pasirinktas nikelio lydinys, kaip pagrindinė dangos matrica.

Liepsninio purškimo metodas su perlydymu yra vienas iš pigiausių ir paprasčiausių, pakankamai universalus, plačiai taikomas formuojant dangas iš perlydomųjų nikelio pagrindo lydinių, todėl jis pasirinktas eksperimentinių dangų formavimo bandymams. Prieš purškimo eksperimentus, taip pat buvo atlikti laisvai padėto ant substrato miltelių mišinio kaitinimo krosnyje eksperimentai, siekiant įvertinti, kaip sąveikauja tarpusavyje nikelio lydinys ir atlieka.

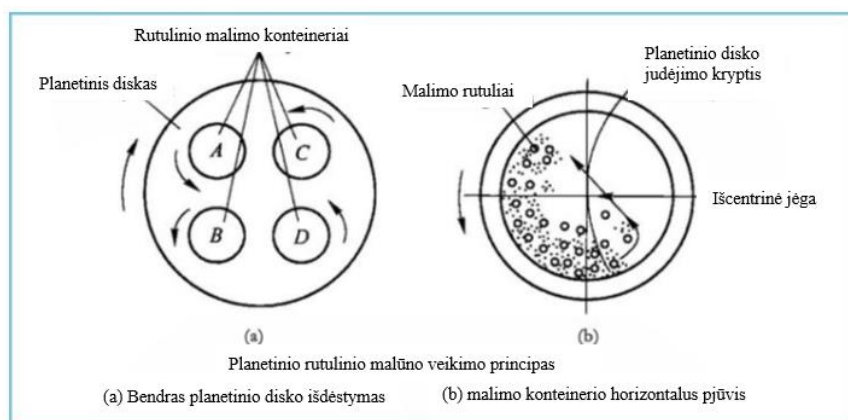
2 Tyrimo metodika

Remiantis literatūros analize ir informacija, gauta konsultuojantis su mineralinės vatos gamybos įmonės atstovu, tyrimams buvo atrinktos 3 tipų atliekos (šlakas, lydalo likučiai ir lydalo nuleidimo latako nuosėdos), jos buvo susmulkintos, susijotos, ištirtos jų elementinė sudėtis, fazinės sudėtis ir gautų frakcijų dalelių morfologija.

Iš jų pasirinkta viena atlieka tolesniems tyrimams atlikti – šlakas. Panaudojant šlako ir perlydomojo Ni lydinio miltelius, paruošti miltelių mišiniai dangoms formuoti. Pirmame tyrimo etape, siekiant įvertinti atliekos vilgumą Ni lydinio lydalu, kaip dalelės reaguoja tarpusavyje, dangos buvo formuotos laisvai padedant tolygų 2 mm storio miltelių mišinį ant paruošto substrato ir kaitintos krosnyje. Antrame etape dangų formavimas pakartotas taikant liepsninį purškimą. Buvo ištirtos dangų mikrostruktūros, kietumas, atlikti tribologiniai bandymai.

2.1 Atliekų tyrimo metodika

Darbe buvo tirtos 3 tipų gabalinės mineralinės vatos gamybos atliekos – šlakas, lydalo likučiai ir lydalo nuleidimo latako nuosėdos. Pirmiausia atliekos plaktuku buvo susmulkintos į mažesnius gabalus, toliau buvo malamos su planetiniu rutuliniu malūnu DECO-PBM-AD-2L. Planetinis rutulinis malūnas turi 4 rutuliukams skirtus konteinerius, kurie yra sumontuoti ant vieno planetinio disko. Kai planetinis diskas sukasi, konteineriai taip pat sukasi apie savo ašis, taip esantys rutuliukai mala ir maišo medžiagas. Įrenginys gali sumalti ir sumaišyti įvairias medžiagas. Mažiausia medžiaga gali būti sumalta iki 0,1 mikrono (Zhenzhou CY scientific Instrument Co., Ltd., 2016).



5 pav. Malūno veikimo principas (Changsha DECO Equipment Co., Ltd., n.d.)

Malimo metu įrenginio galva sukosi 500 aps./min, o planetinis diskas 80 aps/h. Malimo trukmė sudarė 10 min. Iš 200 g atliekos gabaliukų buvo gauta apie 100 g iki tinkamo dydžio sutrintų miltelių, kurie toliau buvo sijojami į frakcijas. Sijojimui naudojamas įrenginys „Haver EML 200 digital T“, kurio veikimo principas: įrenginys vibruoja pagal nustatytą amplitudę ir intervalą, tuo metu žaliava krenta per mažėjančius sietelius. Taip yra atskiriamos stambesnės

dalelės nuo mažesnių. Tyrimo metu buvo sijojama 10 min. Amplitudė buvo 9, pagal įrenginio skalę. Vibravimo intervalas buvo 9 s. Naudojami sietai: 125 µm, 90 µm, 63 µm, 45 µm.

Po sijojimo, buvo atlikti šlako, lydalo bei latakų nuosėdų morfologijos, elementinės bei fazinės sudėčių tyrimai.

2.2 Dangų formavimo krosnyje metodika

Krosnyje buvo formuojamos 5 skirtingos dangos. Dangoms formuoti buvo naudojamas šlako (frakcija tarp 45 µm ir 63 µm) ir nikelio lydinio miltelių mišinys. Nikelio lydinys ir šlakas buvo sumaišomi tam tikru santykiu, gautas mišinys užbertas tolygiu 2 mm storio ant paruoštų substratų. Taip paruošti bandiniai buvo įdėti į krosnį ir išlaikyti nustatytą laiką. Po išlaikymo krosnyje bandiniai buvo ištraukti ir palikti atvėsti ore kambario temperatūroje.

Dangos buvo formuojamos ant 30x120x10 S235JR EN 10219 plokštelių. Plieno cheminė sudėtis pateikta 1 lentelėje.

1 lentelė. Plieno S235JR cheminė sudėtis (S235JR steel grade, mechanical properties, chemical composition grade equivalent, 2014)

Plienas	C _{maks.} , %	Mn _{maks.} , %	P _{maks.} , %	S _{maks.} , %	N _{maks.} , %	Cu _{maks.} , %
S235JR	0,17	1,4	0,04	0,04	0,012	0,55

Dangoms formuoti buvo naudojamas vienas iš lengviausiai prieinamų ir paprasčiausios sudėties perlydomųjų nikelio pagrindo lydinų, skirtų dangoms formuoti – *Metco 12C*. Šis lydinys skirtas terminiam purškimui su perlydymu, t. y. kai užpurškiama danga yra perlydoma, siekiant suformuoti tankią, turinčią nedidelį kiekį oksidų ir porų dangą, kuri suformuoja tvirtą metalurginį ryšį su substratu. Lydinio cheminė sudėtis pateikta 2 lentelėje (Oerlikon Metco, 2016)..

2 lentelė. *Metco 12C* purškimo miltelių cheminė sudėtis (Oerlikon Metco, 2016)

Lydinys	Ni, %	Cr, %	B, %	Si, %	C, %	Fe, %
<i>Metco 12C</i>	~84,55	7,5	1,7	3,5	0,25	2,5

Prieš dangų formavimą, substrato paviršius buvo nušratuotas, nuplautas ir nuvalytas pagal standarto LST EN 13507 reikalavimus.

Dangos buvo formuojamos krosnyje „Elektros krosnis W-50“. Krosnies techniniai parametrai:

- maksimali temperatūra: 1450°C;
- vardinė galia: 9 kW;
- vardinė srovė: 13 A;

- vardinė įtampa: 380 V;
- vardinis dažnis: 50 Hz.

Bandinių kaitinimo temperatūra: 1150 °C. Krosnyje bandiniai buvo laikomi 6 min. Suformuotų dangų sudėtys pateiktos 3 lentelėje.

3 lentelė. Krosnyje formuotų dangų sudėtys bei žymenys (*Metco 12C* – likusi dalis)

Bandinio žymuo	K0	K10	K15	K20	K25
Šlako kiekis, % pagal masę	0	10	15	20	25

Suformuotoms dangoms toliau buvo atliekami mikrostruktūros, kietumo, tribologiniai tyrimai.

2.3 Purkštų dangų tyrimo metodika

Liepsniniu purškimu buvo formuojamos 5 skirtingos dangos. Dangoms formuoti buvo naudojami šlako ir nikelio lydinio mišiniai. Nikelio lydinys ir šlakas (frakcija tarp 45 µm ir 63 µm) buvo sumaišomi tam tikru santykiu, gautas mišinys užpurkštas ant substratų, naudojant liepsninio purškimo metodą ir robotizuotą purškimo stendą. Toliau, siekiant perlydyti užpurkštą dangą, atliktas užpurkštų bandinių kaitinimas krosnyje.

Substrato paruošimo bei purškimo parametrai pateikti 4 lentelėje.

4 lentelė. Liepsninio purškimo parametrai

Substrato paruošimas	Nušratuotas ir nuriebalintas	Substrato pakaitinimas	250-270 °C
Purškimo atstumas	150 mm	Purškimo greitis / ėjimai	230 mm/s /5
Purškimo liepsna	0,8 bar C ₂ H ₂ / 3,8 bar O ₂	Užpurkšto sluoksnio storis	1 – 1,3 mm

Dangos buvo formuojamos ant tokių pat plokštelių kaip ir krosnyje formuojamų dangų. Nikelio lydinys, toks pat kaip ir naudotas krosnyje formuotoms dangoms (*Metco 12C*). Formuotos dangos ir jų žymenys pateikti 5 lentelėje.

5 lentelė. Purškimu formuotų dangų sudėtis bei žymenys (*Metco 12C* – likusi dalis)

Bandinio žymuo	P0	P2,5	P5	P10	P20
Šlako kiekis, % pagal masę	0	2,5	2	10	20

Užpurkštų dangų perlydymas atliktas krosnyje „Elektros krosnis W-50“. Perlydymo parametrai: temperatūra: 1150 °C; išlaikymo laikas – 6 min. Po perlydymo, dangoms buvo atlikti tokie pat tyrimai kaip ir krosnyje formuotoms dangoms.

2.4 Taikyti tyrimo metodai

Morfologijos ir mikrostruktūros tyrimai. Smulkintų atliekų dalelių morfologija ir eksperimentinių dangų mikrostruktūra buvo tiriama skenuojamosios elektroninės mikroskopijos

metodu naudojant SEM JEOL JSM-7600F skenuojamąjį elektroninį mikroskopą. Dangų mikrostruktūra tirta ant skersinių mikrošlifų, paruoštų pagal standartinę metodiką (paskutinis poliravimo žingsnis – su 0,2 suspensija). Pagrindiniai SEM analizės parametrai: greitinančioji įtampa 4 kV (tiriant atliekas) ir 10 kV (tiriant dangas); padidinimas nuo $\times 50$ iki $\times 1000$; vaizdui formuoti naudojamas signalas – 50% atspindėti elektronai, 50% antriniai elektronai.

Elementinės sudėties tyrimas. MVGA cheminės sudėties analizė atlikta rentgeno fluorescencinės spektroskopijos su bangų dispersija (XRF-WD) metodu. Naudotas spektrometras Axios mAX (PANalytical, Olandija) su 4 kW rentgeno spindulių vamzdžiu su Rh anodu. Tyrimų rezultatai apdoroti naudojant beetaloninės kiekybinės elementinės analizės programinę įrangą Omnian (PANlytical).

Rentgeno spindulių difrakcijos analizė. Buvo tirta lydalo, šlako bei latakų nuosėdų fazinė sudėtis. Pasitelkiamas rentgeno spindulių difrakcinės analizės metodas. Tyrimui naudojamas rentgeno spindulių difraktometras „DRON-7“. Rentgeno spinduliuotės Cu K α spektrui ($\lambda = 0,1541837$ nm) gauti naudotas grafito monochromatorius. Bandymų parametrai: 30 kV įtampa; 12 mA srovė; difrakcijos kampo 2θ intervalas nuo 4 iki 60°, skenavimo žingsnis – 0,02°; intensyvumo matavimo trukmė žingsnyje – 0,5 s. Fazėms identifikuoti dešifruojant difrakcines kreives naudota PDF–2 (2003) difrakcijos duomenų bazė.

Kietumo bandymai. Matavimas pagal Vickerso metodą atliktas paruoštuose skersiniuose dangų mikrošlifuose išspaudžiant į tiriamąjį paviršių keturkampės piramidės formos deimantinį antgalį. Taikyta apkrova $F = 5$ kg, išlaikymo laikas – 12,5 s. Kiekvienai dangai atlikti 3 matavimai. Rezultatuose pateikti matavimų vidurkiai. Gautas Vickerso kietis yra tiesiogiai proporcingas piramidės išpaudo įstrižainių vidurkiui. Tyrimui naudojamas Vickerso kietio matavimo įrenginys „TII-7p-1“ ([LST], 2018).

Mikrokietumo tyrimas. Atliktas atskirų fazių mikrokietumo matavimas dangų skersiniuose mikrošlifuose, naudojant „Zwick Roel ZH μ “ universaliu automatizuotu mikrokietmačiu, kurio matavimo paklaida 1%. Matavimai buvo atlikti Knopo metodu su 200g. apkrova bei 15 s išlaikymu. Atlikta 10 matavimų. Rezultatuose pateikti matavimų vidurkiai.

Tribologiniai bandymai. Tribologijos bandymai atlikti Microtest „Pin-on-disc / Ball-on-disc“ tribometru. Tyrimo parametrai nurodyti 6 lentelėje.

6 lentelė. Tribologijos tyrimo parametrai

Slydimo kelias	400 m	Slydimo greitis	300 aps./min
Trajektorijos spindulys	4 mm	Apkrova	10 N
Bandymo temperatūra	23 °C		

Eksperimentiniam tyrimui atlikti pasirinkta „Ball-on-disc“ trinties schema. Indentorius – guoliams naudojamas 6 mm skersmens grūdintas rutuliukas, kuris pagamintas iš AISI52100 nerūdijančio plieno. Bandinių atsparumas trinčiai įvertintas lyginant bandinių mases iki ir po bandymo. Sverimui naudotos svarstyklės „Precisa XR 205SMDR“, kurių tikslumas 10 µg. Tyrimo metu nustatyta, dangų trinties koeficientai ir, pagal masės nuostolius, palyginamas dangų atsparumas irimui.

3 MVGA ir dangų, gautų panaudojant šias atliekas, tyrimų rezultatai

Šiame skyriuje pateikti visų tyrimų rezultatai bei jų apibendrinimai. Rezultatai yra suskirstyti į 3 dalis: atliekų tyrimų rezultatai, formuotų krosnyje dangų tyrimų rezultatai bei purkštų dangų tyrimų rezultatai.

3.1 Mineralinės vatos gamybos atliekų tyrimas

Šiame skyriuje pateikiami mineralinės vatos atliekų – šlako, lydalo likučių ir latako nuosėdų – granulimetrinės sudėties, morfologinių, elementinės sudėties bei fazinės sudėties tyrimų rezultatai.

3.1.1 Smulkintų ir sijotų atliekų granulometrija

Tyrimams buvo atrinktos trijų rūšių kietos gabalinės mineralinės vatos gamybos atliekos (MVGA). Siekiant įvertinti galimybę gauti dangoms formuoti tinkamą atliekų dalelių frakciją, taip pat siekiant paruošti atliekas elementinės bei fazinės sudėties tyrimams, atliekos pirma buvo susmulkintos į mažesnius gabalus, sumaltos ir persijotos. 6-ame paveiksle yra pateiktas susmulkintų atliekų bendras vaizdas.



a)

b)

c)

6 pav. Į mažesnius gabalus sutrupintų atliekų bendras vaizdas: a) šlakas, b) lydalo nuosėdos, c) latako nuosėdos

Taikant darbe nurodytus malimo malūnuose parametrus buvo gautos štai tokios granulimetrinės sudėties maltos atliekos (žiūr. 7 lentelę):

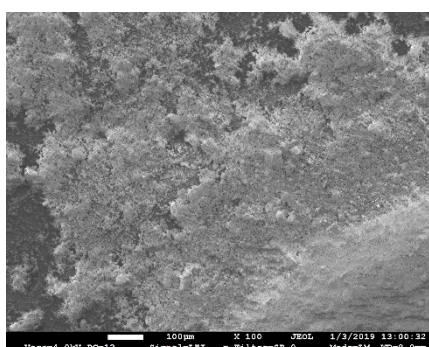
7 lentelė. MVG atliekų granulometrija (mm)

Žaliava	Ant sietelio likęs žaliavos kiekis, %				
	<0,045	0,045	0,063	0,090	0,125
Šlakas	50	35	7	5	3
Lydalas	56	33	6	3	2
Latako nuosėdos	60	34	6	0	0

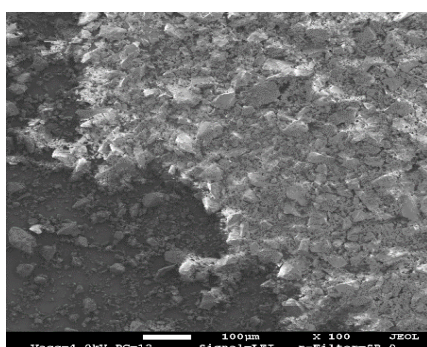
Pastebėta, kad šlako ir lydalo dalelių frakcija <45 μm sudaro lipnumo turinčią masę, kurią būtų sunku naudoti formuojant dangas.

3.1.2 Smulkintų MVG atliekų dalelių morfologija ir elementinė sudėtis

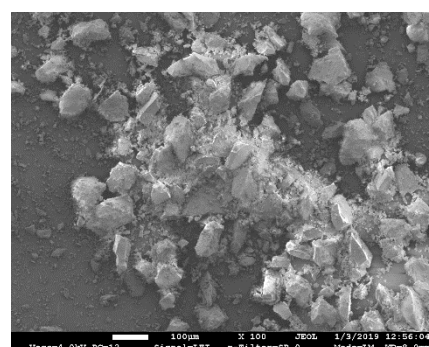
SEM tyrimo metu buvo gauti šlako, lydalų bei latakų nuosėdų įvairių frakcijų vaizdai (7 pav.). Lydale bei šlake galima pastebėti, kad dalelės yra susmulkintos į daugiakampes netaisyklingos formos stambesnes daleles, kurios yra aplipusios smulkesnėmis dalelėmis. Taip pat matoma, kad šlako ir lydalų frakcijose $<45\ \mu\text{m}$ labai daug smulkių dalelių masės, kuri sulipina į bendrą masę ir stambesnes daleles. Šios smulkios masės yra frakcijoje tarp 45 ir $63\ \mu\text{m}$; taip pat kažkiek jos yra ir dar stambesnėje frakcijoje iki $90\ \mu\text{m}$. Tikėtina, kad pritaikius papildomą sijojimą (prailginus sijojimo laiką), šią smulkia frakciją galima būtų atskirti. Stambesnes lydalų frakcijas (nuo $90\ \mu\text{m}$) sudaro švarios netaisyklingos formos dalelės; šių frakcijų šlako dalelėse stebimas nedidelis kiekis ant paviršiaus prilipusių smulkių dalelių. Latakų nuosėdų frakcijose nesimato smulkių frakcijų nuosėdų ant didesnės frakcijos dalelių. Smulkios frakcijos dalelės nesulipusios.



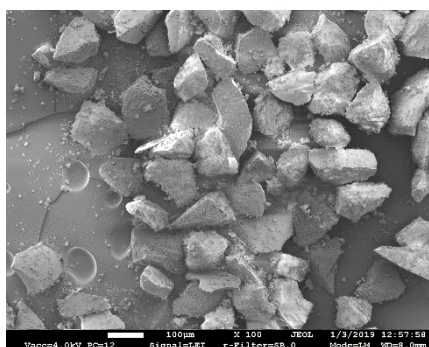
a) lydalas, frakcija iki $45\ \mu\text{m}$



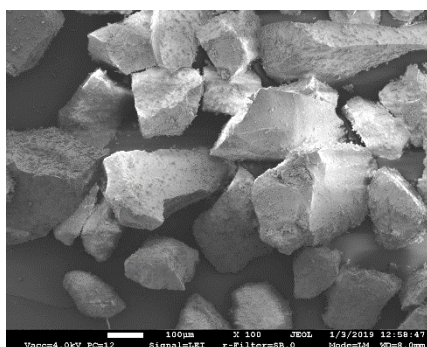
b) lydalas, frakcija nuo 45 iki $63\ \mu\text{m}$



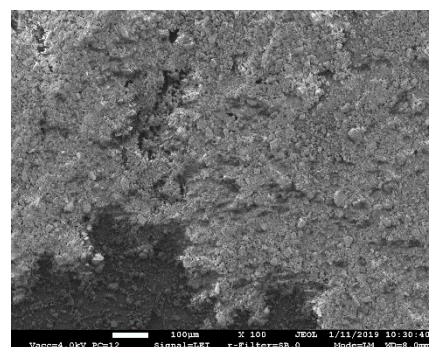
c) lydalas, frakcija nuo 63 iki $90\ \mu\text{m}$



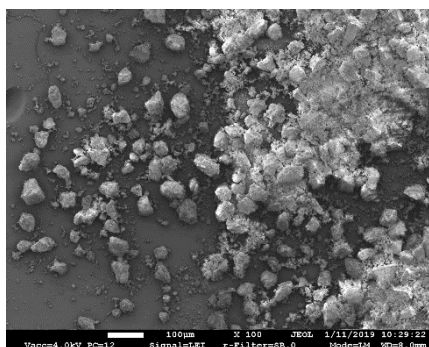
d) lydalas, frakcija $90\ \mu\text{m}$ iki $125\ \mu\text{m}$



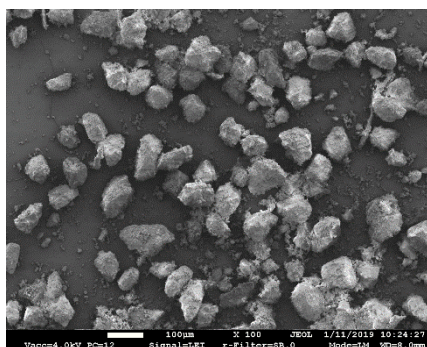
e) lydalas, frakcija virš $125\ \mu\text{m}$



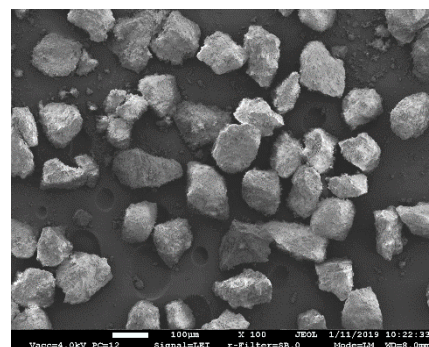
f) šlakas, frakcija iki $45\ \mu\text{m}$



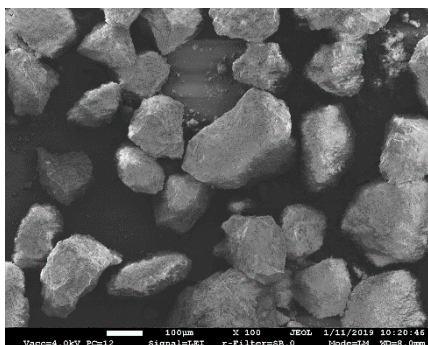
g) šlakas, frakcija nuo 45 iki $63\ \mu\text{m}$



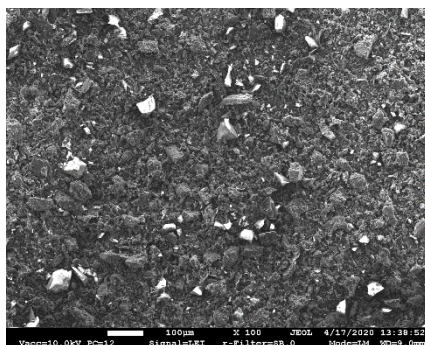
h) šlakas, frakcija nuo 63 iki $90\ \mu\text{m}$



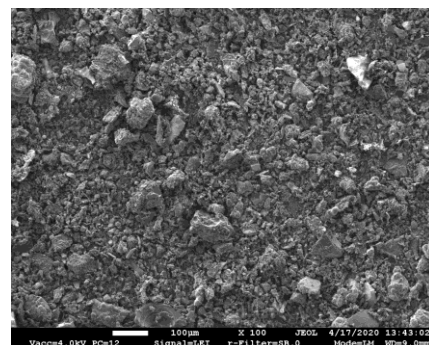
i) šlakas, frakcija nuo $90\ \mu\text{m}$ iki $125\ \mu\text{m}$



j) šlakas, frakcija virš 125 μm



k) 1. nuosėdos, frakcija iki 45 μm



l) 1. nuosėdos, frakcija nuo 45 iki 63 μm

7 pav. Smulkintų MVG atliekų skirtingų frakcijų morfologija

XRF tyrimo metu buvo nustatyta šlako (8 lentelė), lydalo (9 lentelė) bei latakų nuosėdų (10 lentelė) cheminė sudėtis. Šlako cheminė sudėtyje matome, kad pagrindinis elementas yra deguonis, kurio yra 42,43 %. Taip pat, didelę dalį sudaro kalcis (14,10 %) su siliciu (17,79 %). Po jų, jau 10 % nebesiekia aliuminis (8,37 %), magnis (5,86 %), geležis (7,57 %), natris (1,47 %), titanas (1,34 %). Yra matomos vario, cinko, kalio, chromo pėdsakai nesiekiantys 1 %. Lydale, taip pat kaip ir šlake, pagrindinis elementas yra deguonis (43,32 %). Panaši tendencija yra ir su kalciumu (14,10 %) ir siliciu (17,77 %) turinčiais daugiau 10 % kiekio sudėtyje. Mažesnę dalį, mažiau nei 10 %, sudaro natris (1,40 %), magnis (6,06 %), aliuminis (8,49 %), geležis (6,29 %), titanas (1,23 %). Lydalo sudėtyje galima rasti ir kalio, chromo, vario ir cinko pėdsakų, kurių yra mažiau nei 1 %. Latakų nuosėdų pagrindinis elementas yra anglis, kuri sudaro 90 % visos medžiagos kiekio. Taip pat, yra nedaug geležies (4,62 %), aliuminio (1,09 %), silicio (2,31 %).

8 lentelė. Šlako cheminė sudėtis

O, %	Na, %	Mg, %	Al, %	Si, %	K, %
42,43	1,47	5,86	8,37	17,79	0,7
Ca, %	Ti, %	Cr, %	Fe, %	Cu, %	Zn, %
13,79	1,34	0,12	7,57	0,01	0,03

9 lentelė. Lydalo cheminė sudėtis

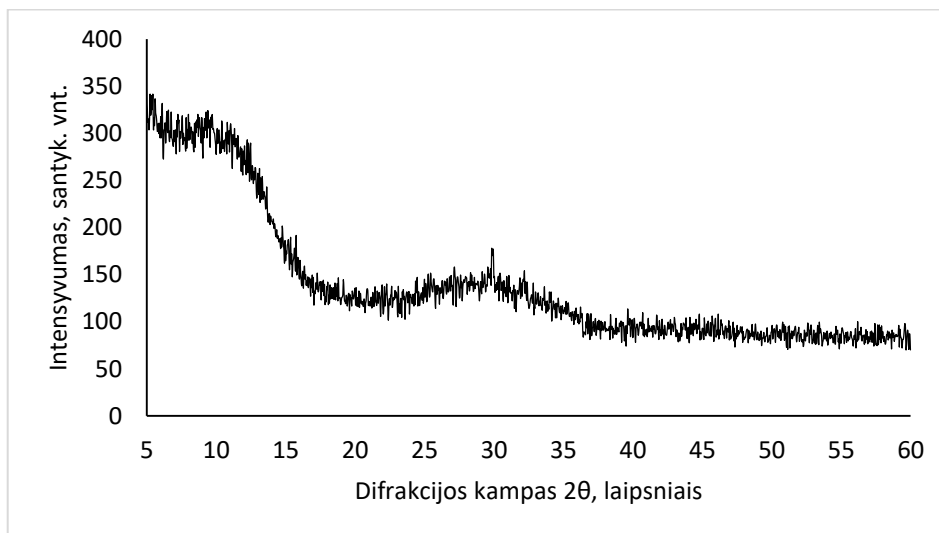
O, %	Na, %	Mg, %	Al, %	Si, %	K, %
43,32	1,40	6,06	8,49	17,77	0,65
Ca, %	Ti, %	Cr, %	Fe, %	Cu, %	Zn, %
14,10	1,23	0,06	6,29	0,01	0,02

10 lentelė. Latakų nuosėdų cheminė sudėtis

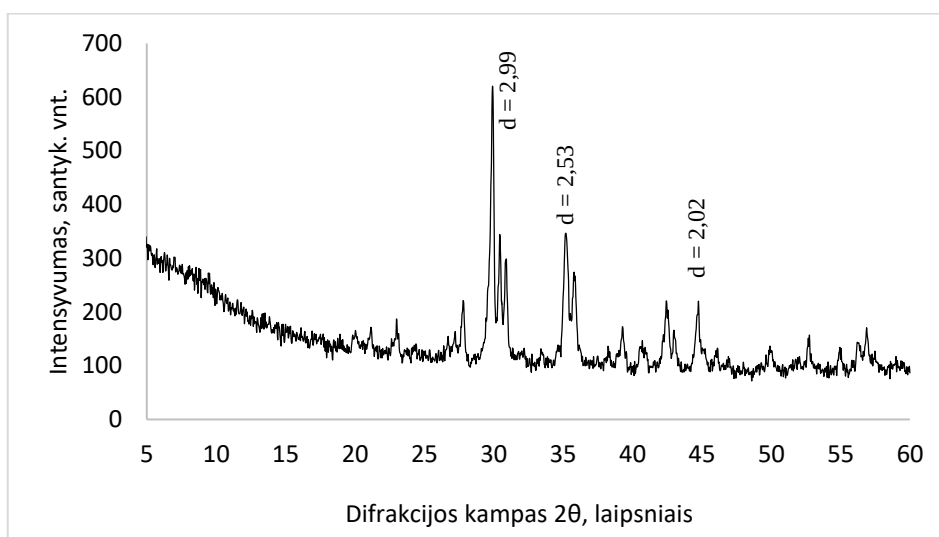
C, %	Na, %	Mg, %	Al, %	Si, %	K, %
90,1	0,141	0,269	1,09	2,31	0,198
Ca, %	Ti, %	Cr, %	Fe, %	Cu, %	Zn, %
0,779	0,075	0,008	4,62	0,015	0,024

3.1.3 MVG atliekų fazinės sudėties tyrimo rezultatai

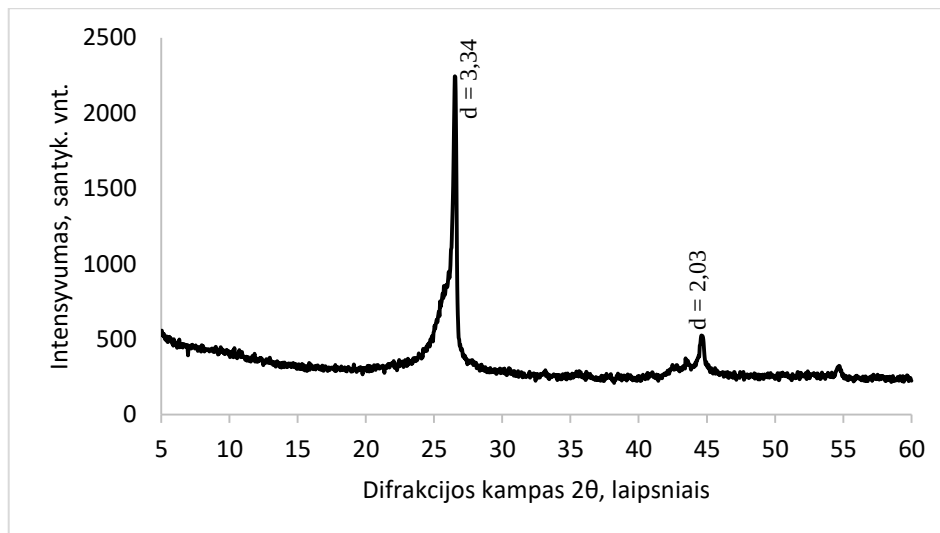
Lydalo rentgeno difrakcijos kreivėje nėra smailių ir susidaręs nelinijinis signalo fonas su iškilimu tarp ~ 22 ir ~ 37 laipsnių byloja, kad lydalas yra amorfinis (8 pav.). Šlako difrakcijos kreivės visos pagrindinės smailės gali būti priskirtos diopsidui (pagrindinė formulė: $\text{MgCaSi}_2\text{O}_6$; sudėtyje gali būti Al, Fe, Ti, Na, Mg, kt.), t. y. šlako pagrindinę dalį sudaro diopsido fazė (9 pav.). Latakų nuosėdų kreivėje visos aptiktos smailės priskirtinos grafitui (10 pav.).



8 pav. Lydalo XRD kreivė



9 pav. Šlako XRD kreivė



10 pav. Latako nuosėdų XRD kreivė

3.1.4 Atliekų tyrimo apibendrinimas

Taikant smulkinimą, malimą ir sijojimą gautos skirtingų frakcijų mineralinės vatos gamybos atliekų – šlako, lydalo bei latako nuosėdų – dalelių frakcijos. Smulkiausiose frakcijose ($<45\ \mu\text{m}$) yra daug smulkios masės, kuri sulipina miltelius. Švariausios yra stambios frakcijos ($>90\ \mu\text{m}$), tačiau formuojant kompozitines dangas iš tokio dydžio dalelių, gautųsi labai stambi dangos mikrostruktūra. Atsižvelgiant į tai, kompozitinėms dangoms formuoti labiausiai tiktų frakcija tarp 45 ir $90\ \mu\text{m}$.

Lydalo ir šlako cheminė sudėtis panaši – be deguonies vyrauja Si, Ca, Al, Mg, tačiau smulkinimo metu pastebėta, kad lydalas susitrina lengviau, tuo tarpu šlakas – sunkiau, t. y. šlakas yra kietesnis. Siekiant įvertinti, ar MVG atliekos galėtų būti taikomos kaip sustiprinimo fazė kompozitinėse metalų matricos dangose, tikslinga pasirinkti šlako miltelius. Šiuo metu tokių tyrimų rezultatų nėra paskelbta.

Atsižvelgiant į tai, kad šlake vyrauja diopsido fazė, šlakas galėtų būti pritaikytas ten, kur šiuo metu taikomas diopsidas. Papildomos literatūros analizės metu nustatyta, kad diopsido priedas pagerina sukepintų aliuminio oksido matricos gaminių atsparumą dilimui ir trinties koeficientą esant sausai trinčiai. Minėtas efektas siejamas su tuo, kad esant diopsido priedui susiformuoja daug tankesnė struktūra. Labai kietos ir patvarios įvairiose cheminėse terpėse aliuminio oksido dangos pakankamai plačiai žinomos ir taikomos technikoje. Kadangi liekamasis akytumas yra būdingas termiškai purkštoms keramikos dangoms, minėtas diopsido priedo efektas galėtų būti naudingas taikant jį ir aliuminio oksido dangoms. Atsižvelgiant į tai, tikslinga ištirti šlako priedo poveikį purkštų aliuminio oksido dangų tribologinėms savybėms ir atsparumui dilimui (Liu, Zhang, Sun ir Zhang, 2007).

Latako nuosėdose aptikta daug grafito pavidalo anglies. Grafitas turi heksagoninę kristalinę gardelę, kurioje atstumas tarp lygiagrečių gardelės sluoksnių yra 2,4 karto didesnis (3,44

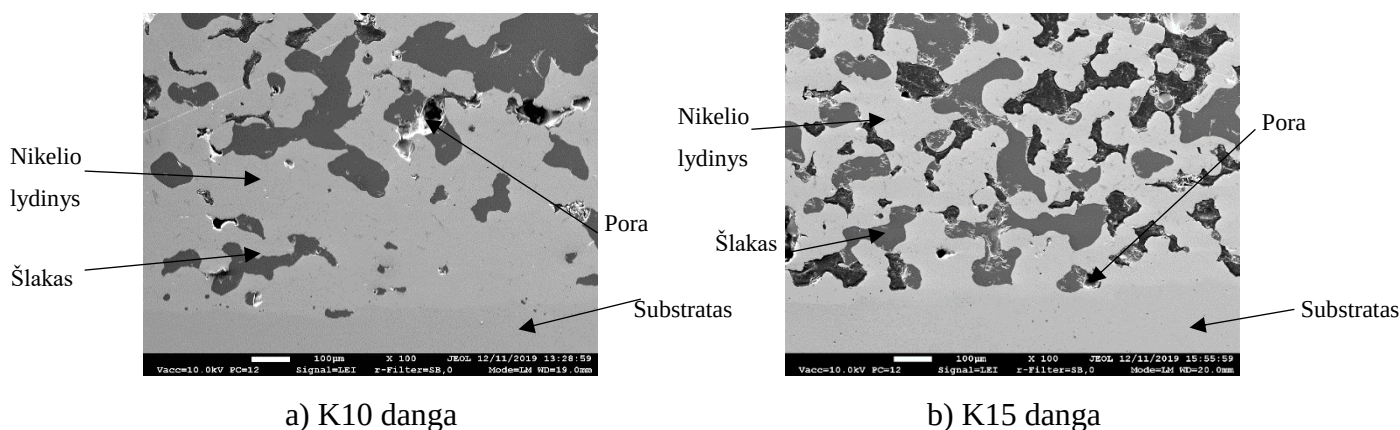
Å) negu atstumai tarp atomų sluoksnyje (1,42 Å). Tokia sluoksninė sandara lemia lengvą grafito sluoksniavimąsi ir grafitas žinomas kaip kietojo tepalo savybėmis pasižyminti medžiaga. Yra žinoma, kad tokio tipo medžiagos efektyviai taikomos siekiant pagerinti kompozitinių dangų tribologines savybes. Daug grafito turinti latakų nuosėdų atlieka gali turėti teigiamo poveikio savitepių dangų savybėms. Atsižvelgiant į tai, tikslinga ištirti latakų nuosėdų poveikį kompozitinių metalo matricos dangų tribologinėms savybėms (Skarvelis ir Padamitriou, 2008).

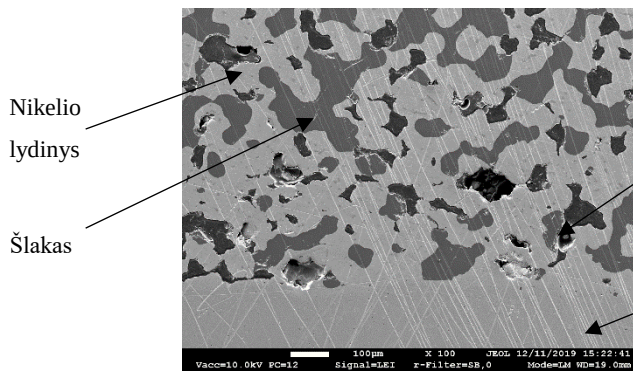
3.2 Krosnyje suformuotų dangų tyrimas

Šiame skyriuje pateikiami tyrimų rezultatai, kurie gauti tiriant kompozitines nikelio lydinio ir MVG šlako dangas. Šiame etape, siekiant įvertinti nikelio lydinio ir MVG šlako suderinamumą, vilgumą, galimybę formuoti ištisinius kompozitinius sluoksnius plieno paviršiuje iš šių komponentų, dangos buvo formuojamos padedant ant plieninio substrato tolygų nikelio lydinio miltelių ir šlako miltelių mišinio sluoksnį ir kaitinant tokius bandinius elektrinėje krosnyje 6 min. 1150 ° temperatūroje, šiek tiek aukštesnėje, nei naudojamo nikelio lydinio *solidus-liquidus* intervalo pradžios.

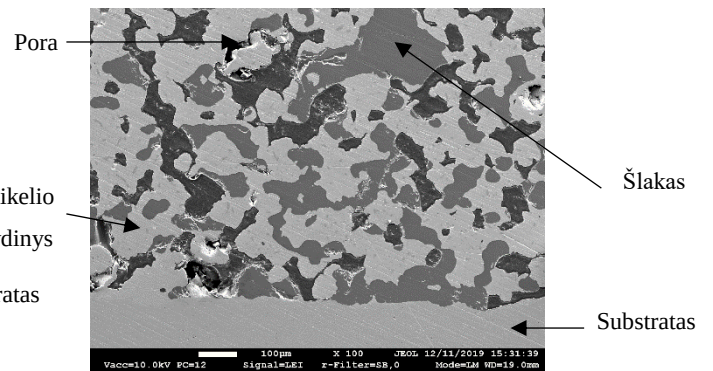
3.2.1 Krosnyje formuotų dangų mikrostruktūra

Suformuotų dangų mikrostruktūros pateikiamos 11-ame paveiksle. Taikant darbe nurodytus kaitinimo parametrus, pavyko suformuoti pakankamai tankias dangas. Dangos ir substrato sąlytyje nesimato tarpų arba nesulydymų. Tai leidžia teigti, kad danga gerai vilgė substratą, užtikrinant tvirto metalurginio ryšio formavimąsi. Esant sudėtyje 10 % šlako, susiformuoja ištisinė metalinė matrica, kurioje pakankamai tolygiai pasiskirsto šlako dalelės (11 pav. a). Matomos dalelės yra netaisyklingos formos, jų dydis kai kur viršija naudojamų miltelių dydį. Tai gali būti apie tai, kai kaitinimo metu dalelės dalinai arba visiškai lydėsi ir jungėsi į stambesnes. Padidinus šlako kiekį iki 15 % ir daugiau – iki 20% ir 25 %, ištisinė metalinė matrica susiformuoja tik vietomis ir dangą dalinai sudaro atskiri nikelio lydinio ir šlako ploteliai. Kai kur, formuojasi šlako matrica su joje esančiomis nikelio lydinio dalelėmis. Visose dangose matyti tuštumų, kurios galėjo susiformuoti tiek dėl netankaus dalelių išsidėstymo prieš kaitinimą, tiek dėl trapesnio šlako ištrupėjimo ruošiant bandinius mikrostruktūrinei analizei.

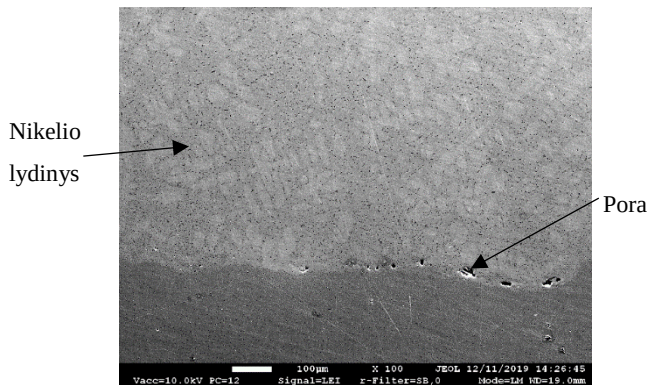




c) K20 danga



d) K25 danga



e) K0 danga

11 pav. Krosnyje formuotų dangų mikrostruktūra

3.2.2 Krosnyje formuotų dangų kietumo matavimų rezultatai

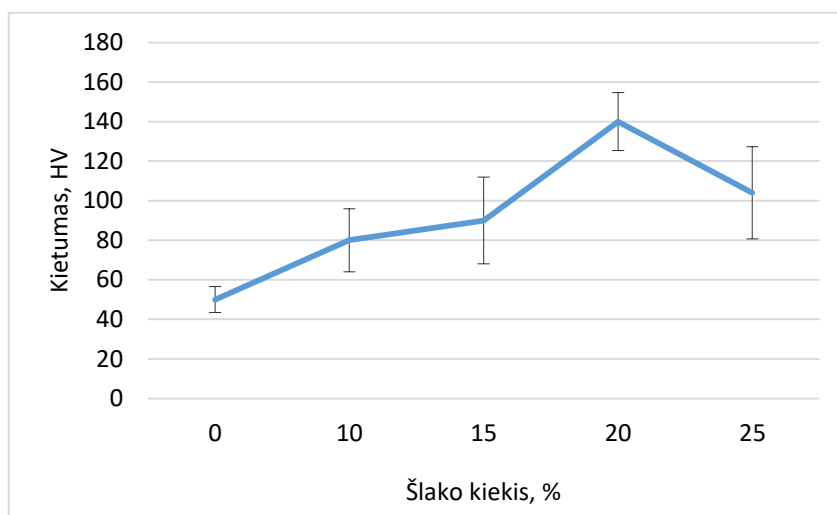
Tiriant eksperimentines dangas, buvo atlikti kietumo matavimai taikant Knupo metodą su 200 g apkrova (siekiant įvertinti atskirų fazių mikrokietumą) ir matavimai pagal Vickerso metodą su 5 kg apkrova (siekiant įvertinti dangų kietumą). Iš fazių mikrokietumo matavimų rezultatų matoma, kad šlakas yra daug kietesnė medžiaga negu nikelio lydinys, kurių vidutinės reikšmės skiriasi per 318 HK (11 lentelė). Galima daryti išvadą, kad dangoje esantis šlakas turėtų padaryti dangą kietesnę.

11 lentelė. Atskirų fazių vidutinis mikrokietumas HK0,2

Substratas	Nikelio lydinys	Šlakas
227±9	315±16	633±27

Dangų kietumo matavimų rezultatai pateikiami 12 pav. Iš rezultatų matome, kad dangos su šlaku yra kietesnės negu danga vien iš nikelio lydinio. Dangų kietumas nuosekliai didėja didinant šlako kiekį ir esant 20 % šlako yra beveik 3 kartus didesnis, negu dangos vien iš nikelio lydinio. Tačiau absoliučios kietumo reikšmės yra labai nedidelės. Tai gali būti susiję su tuo, kad formuojant dangą tokiu būdu (perlydant laisvai padėtą ant substrato miltelių sluoksnį), nepavyksta gauti tankios struktūros ir ryšys tarp dalelių dangos sluoksnyje yra silpnas (t. y. dangos kohezinis stipris yra mažas). Be to, padidinus šlako kiekį iki 25 % kietumas staigiai sumažėja. Tai galima

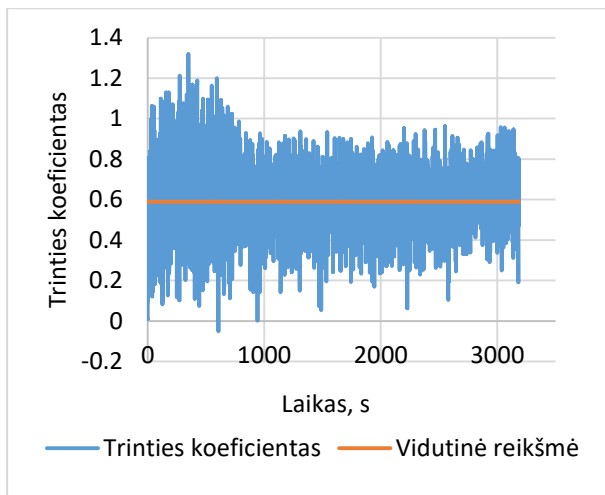
susieti su tuo, kad, didėjant šlako kiekiui, ištisinės metalinės matricos, užtikrinančios sluoksnio vientisumą, dalis struktūroje labai sumažėja ir šlako dalelės, veikiamos indentoriaus apkrovos, lengviau suskyla ir ištrupa.



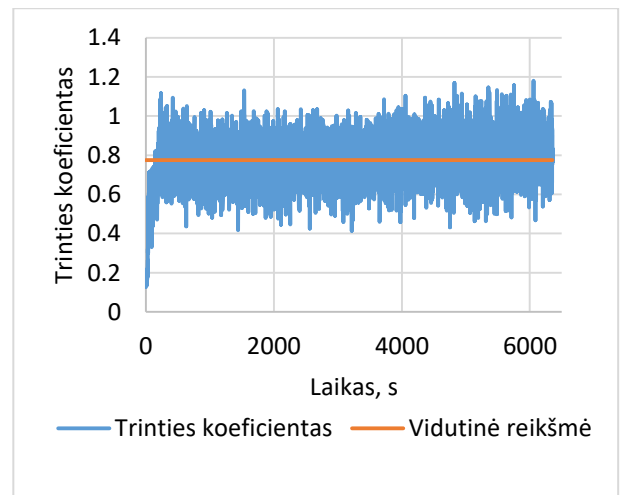
12 pav. Krosnyje formuotų dangų kietumo priklausomybė nuo šlako kiekio dangoje

3.2.3 Krosnyje formuotų dangų tribologinių savybių rezultatai

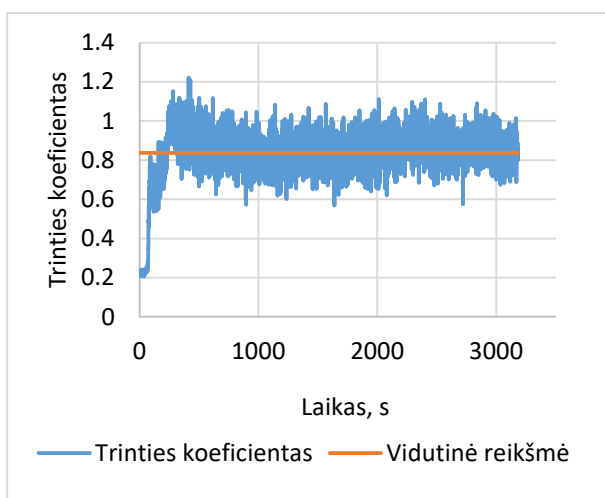
Atlikus tyrimą matoma, kad vien Ni lydinio dangos formuotas trinties koeficientas (0,589) yra mažesnis negu formuojat dangą su šlako priemaišomis (K15 - 0,775; K20 - 0,837; K25 - 0,78). Tyrimų rezultatai pavaizduoti 13 paveiksle. Tai galima paaiškinti tuo, kad esant nepakankamam dangos koheziniam stipriui, trapesnė šlako fazė, lokaliai veikiamą indentoriaus bandymo metu, ištrupa ir suformuoja tarp besitrinančių paviršių ištrupėjusių dalelių sluoksnį, didinant tokiu būdu trinties koeficientą. Didžiausias trinties koeficientas gautas K20 dangoje. Pastebima, kad esant didesnei ir mažesnei atliekos kiekiui trinties koeficientas mažėja, bet vis tiek išlieka didesnis negu vien nikelio lydinio dangos.



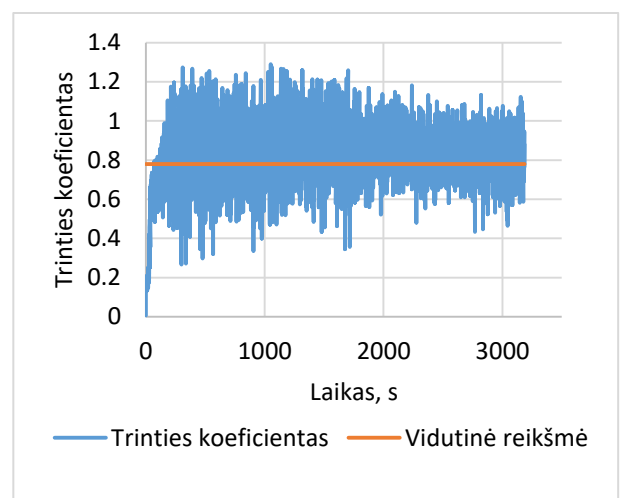
a) K0 dangos trinties koeficientas



b) K15 dangos trinties koeficientas

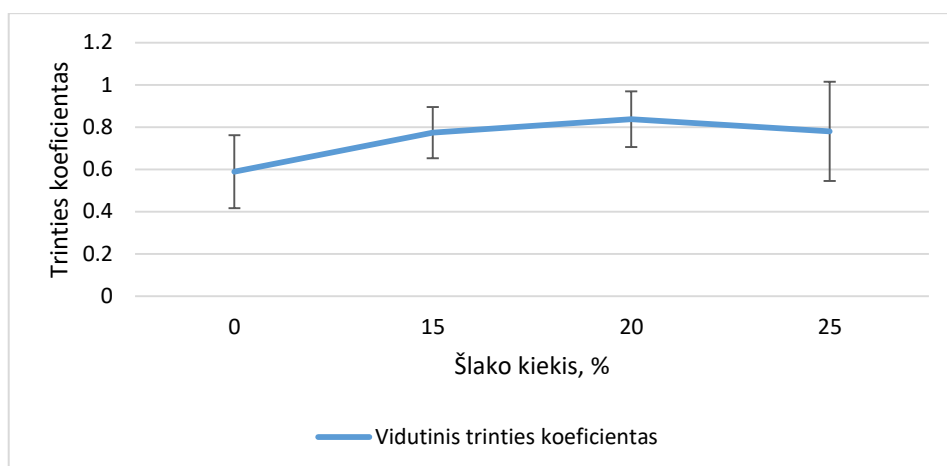


c) K20 dangos trinties koeficientas



d) K25 dangos trinties koeficientas

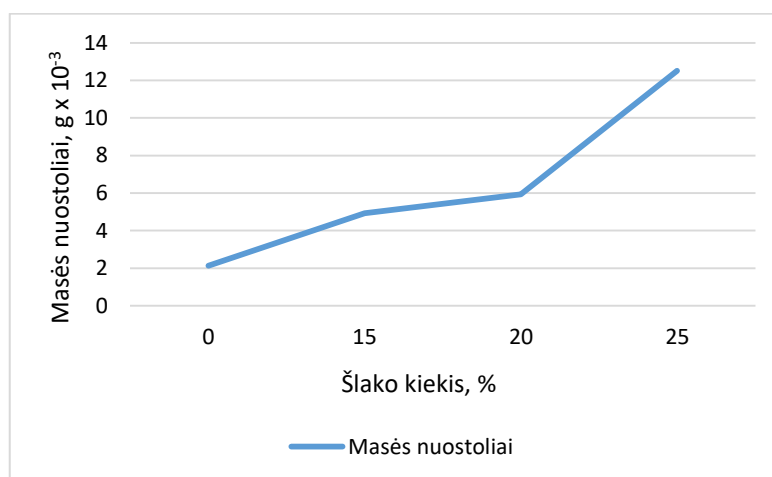
13 pav. Krosnyje formuotų dangų trinties koeficientai



14 pav. Krosnyje formuotų dangų trinties koeficiento priklausomybė nuo šlako kiekio

Bandinių masių nuostoliai po tribologinių bandymų pateikti 15 paveiksle. Nepaisant to, kad dangų su šlaku kietumas yra didesnis, didėjant šlako kiekiui dangų išdilimas didėja. Tai galima susieti su žemą gautų dangų kohezija ir intensyvesniu šlako ištrupėjimu lokaliai veikiant indentoriui. Be to, kai šlako yra iki 20 %, stebimas nuoseklus masės nuostolių didėjimas, gerai

aprašomas tiesine regresija. Padidinus šlako kiekį iki 25 %, masės nuostoliai šoktelėjo daugiau kaip 2 kartus.



15 pav. Krosnyje formuotų dangų masės nuostolių priklausomybė nuo šlako kiekio

3.2.4 Apibendrinimas

Atlikus iš miltelių krosnyje suformuotų dangų tyrimą, nustatyta, kad šlakas ir nikelio lydinys gerai vilgo vienas kitą ir kartu geba suformuoti pakankamai tankias ištisines dangas plieniniame substrate. Dangų kietumas nuosekliai didėja didinant šlako kiekį dangoje iki 20 %, tačiau absoliučios kietumo reikšmės nedidelės. Tribologiniais bandymais nustatyta, kad formuojant dangas su šlaku tokiu būdu, nepavyksta pagerinti tribologinių savybių. Be taikyto dangų formavimo būdo įtakos gali turėti ir tai, kad šlako dalelėms susilydant kaitinimo metu ir susijungiant į stambesnes daleles, dangose susiformuoja palyginti stambi struktūra. Esant dangoje 25 % šlako, kietumas sumažėja ir šuoliškai padidėja masės nuostoliai sausos trinties metu. Kitame tyrimų etape, formuojant dangas purškimo būdu, nuspręsta naudoti ne daugiau kaip 20 % šlako; taip pat suformuoti dangas su mažesniu šlako kiekiu (2,5 % ir 5,0 %), siekiant išlaikyti tribologines savybes, bet padidinant dangos kietumą.

3.3 Purkštų dangų tyrimas

Šiame skyriuje pateikti purkštų dangų tyrimų rezultatai. Dangos buvo formuojamos nikelio matricos pagrindu ir pridedant tam tikrą kiekį atliekos.

3.3.1 Gautos dangos

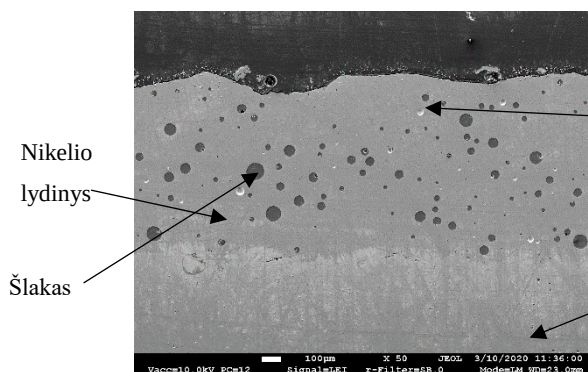
16 paveiksle pavaizduotos purškimo gautos dangos. Buvo formuojamos P2,5, P5, P10, P20. Kontrolinis bandinys buvo gautas formuojant dangą purškimo vien iš nikelio lydinio. Po purškimo dangoms buvo atliktas perlydymas.



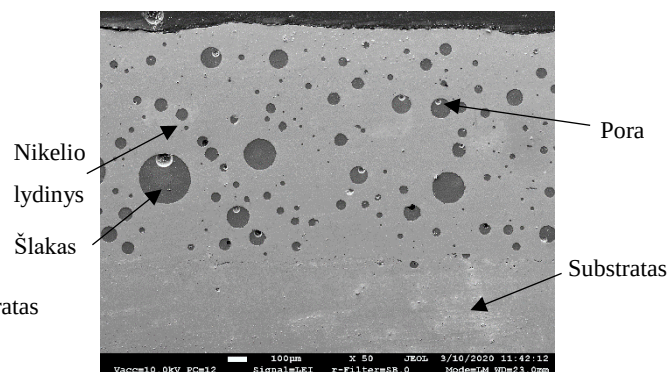
16 pav. Gautos užpurkštos dangos

3.3.2 Purkštų dangų mikrostruktūra

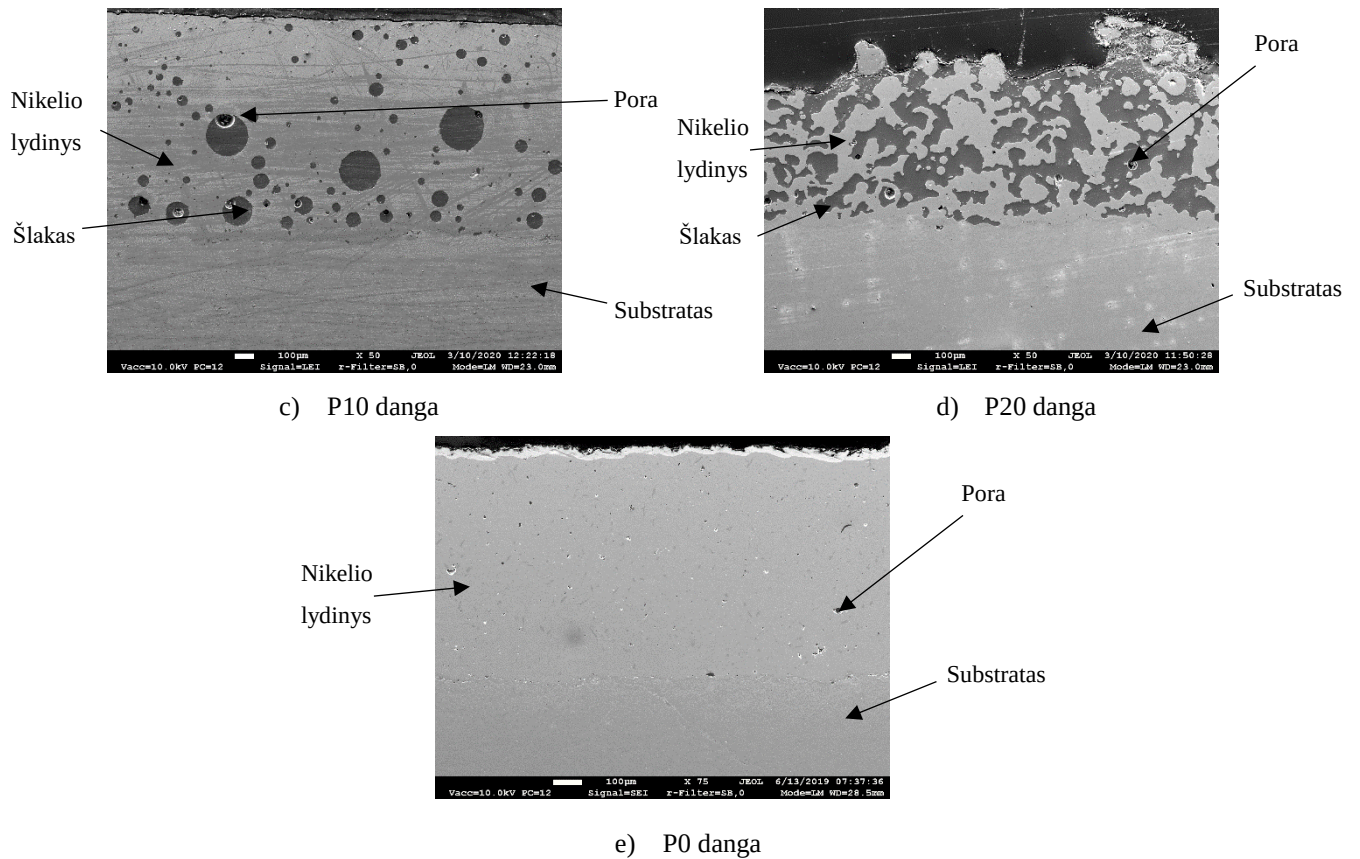
Purkštų ir krosnyje perlydytų dangų mikrostruktūros parodytos 17 paveiksle. Purkštų dangų sulydymas su substratu yra geras, be žymių defektų sulydymo linijoje. Vien iš Ni lydinio pagamintos purškimo su perlydymu dangos mikrostruktūra nieko nesiskiria nuo dangos, gautos krosnyje perlydžius laisvai padėtus miltelius. Taikant po purškimo darbe nurodytus perlydymo parametrus, dangose su 2,5–10 % šlako susiformavo nikelio lydinio matricos su rutulinės formos šlako tarpais mikrostruktūra, kuri ženkliai skiriasi nuo struktūros, gautos perlydant krosnyje laisvai padėtą miltelių mišinį. Tokia taisyklinga rutulinė tarpų forma galėjo susiformuoti perlydymo metu išsilydant šlako tarpams ir kristalizuojantis jiems aušimo metu anksčiau, negu nikelinio lydinio apsilydžiusioms fazėms. Taip pat pastebėta, kad dangose su didesniu šlako kiekiu (P5 ir P10) susiformavo didesni rutuliniai tarpai, tikėtina, susijungiant šalia esantiems smulkesniems tarpams. P20 dangoje, kur nikelio lydinio tūrio nebeužtenka ištisinei metalinei matricai susiformuoti, struktūra kitokia. Čia struktūrą dalinai sudaro nikelio matricos su šlako tarpais plotai, dalinai – šlako matricos su nikelio lydinio tarpais plotai, taip pat atskiri šlako ir Ni lydinio ploteliai. Visose dangose matomi nedideli defektai – daugiausia nedidelės poros, kurios galėjo susiformuoti nespėjus pašalinti dujoms iš išlydytų fazių.



a) P2,5 danga



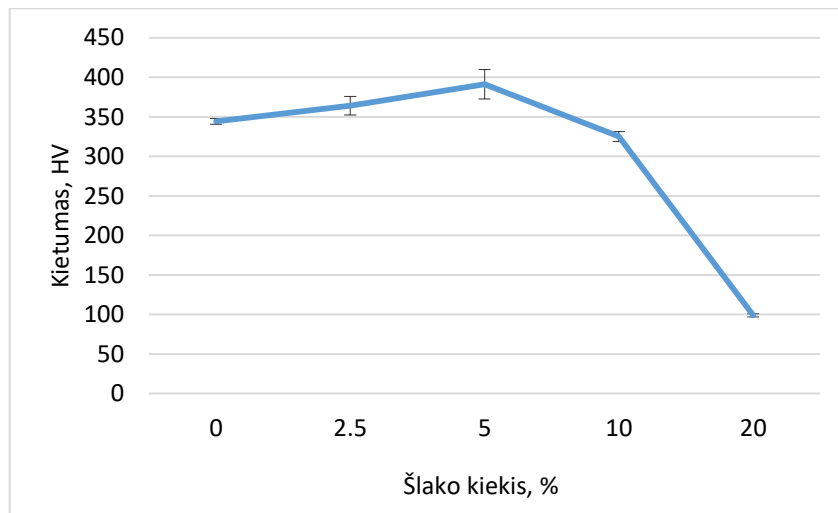
b) P5 danga



17 pav. Purkštų dangų mikrostruktūra

3.3.3 Purkštų dangų kietumo matavimų rezultatai

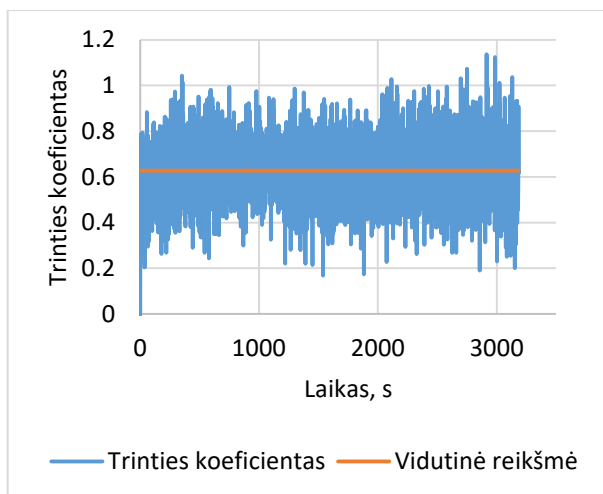
Kietumo matavimų rezultatai pavaizduoti 18 paveiksle. P2,5 bei P5 dangose nustatyta, kad kietumas yra didesnis negu nikelio lydinio. P10 ir P20 dangose nustatyta, kad kietumas mažesnis negu nikelio lydinio. P10 dangoje kietumas mažesnis, bet nežymiai (apie 20 HV). Didžiausias skirtumas buvo pastebėtas P20 dangoje. Gautas kietumas yra neadekvatus. Atkreipus dėmesį į prieš tai atliktas SEM nuotraukas, pastebima, kad P20 dangoje dalelės susilieja tarpusavyje, todėl kietumo matavimuose indenterius pataiko į atlieką ir ją suskaldo, kas iškraipo matavimų rezultatus.



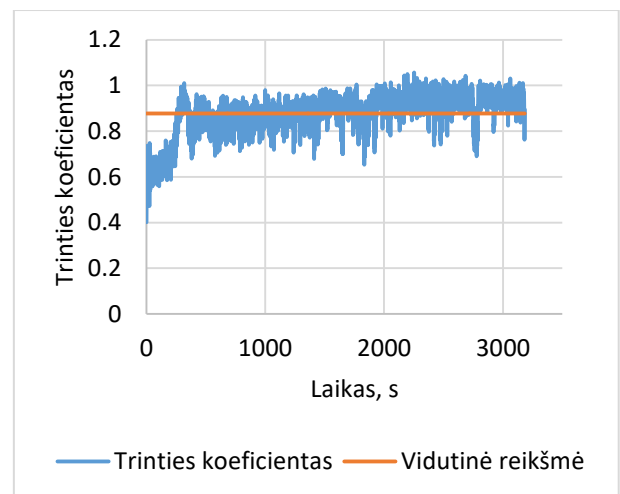
18 pav. Purkštų dangų kietumo priklausomybė nuo šlako kiekio dangoje

3.3.4 Purkštų dangų tribologinių savybių rezultatai

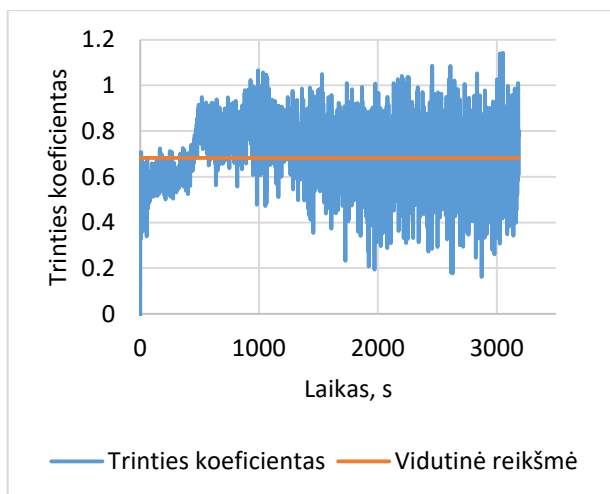
Atlikus tyrimą matoma, kad didžiausias trinties koeficientas gautas P5 dangoje (0,877). Kitų koncentracijų dangose gauti mažesni trinties koeficientai (P2,5 – 0,627; P10 – 0,683; P20 – 0,783). Palyginus su P0 danga, rezultatai lieką panašūs, t. y. su šlaku formuojamos dangos trinties koeficientas yra aukštesnis negu iš vien nikelio lydinio formuotai dangai. Matavimų rezultatai pavaizduoti 19 paveiksle.



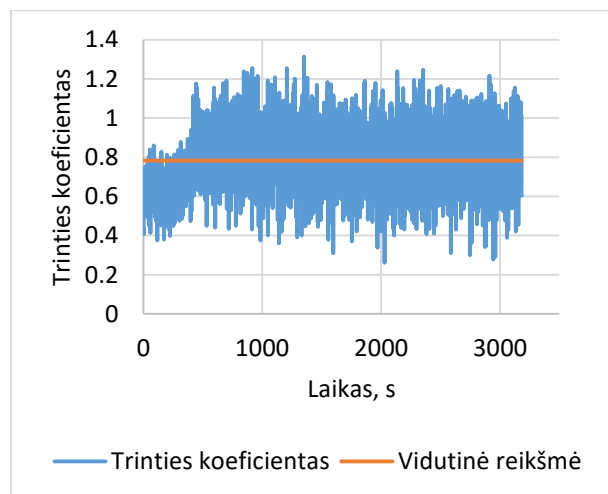
a) P2,5 dangos trinties koeficientas



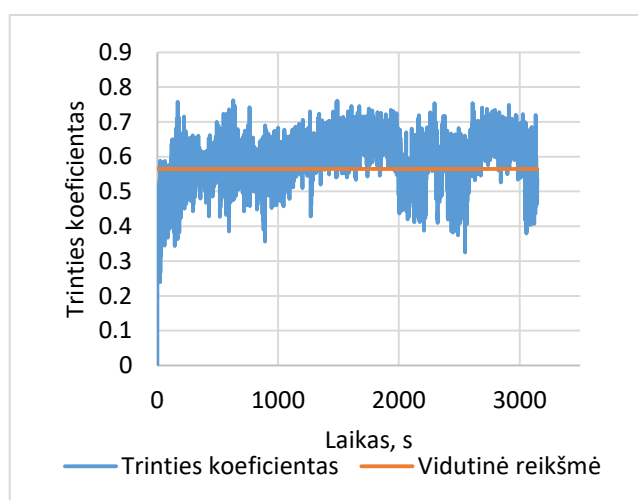
b) P5 dangos trinties koeficientas



c) P10 dangos trinties koeficientas

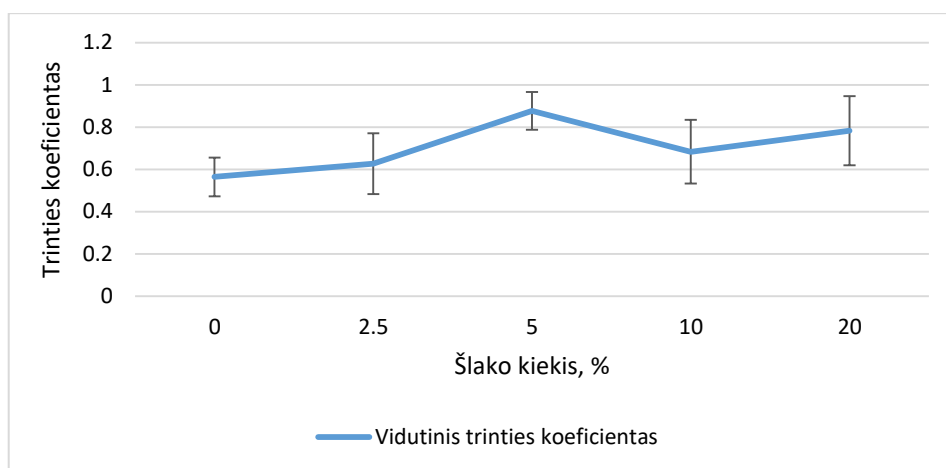


d) P20 dangos trinties koeficientas



e) P0 dangos trinties koeficientas

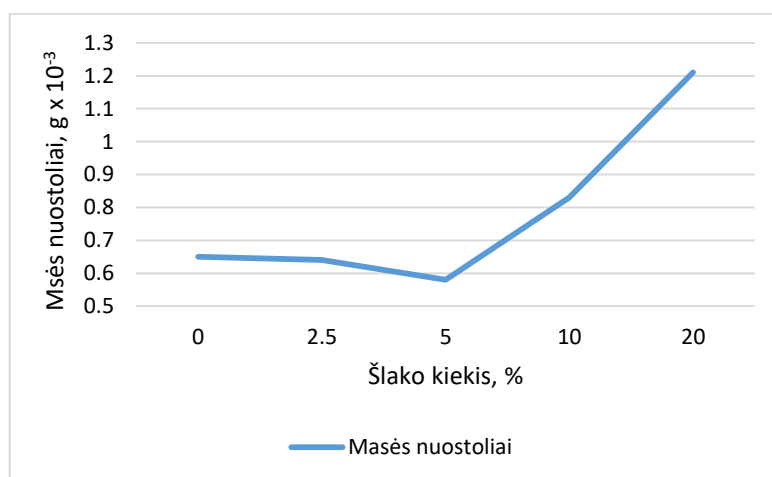
19 pav. Purkštų dangų trinties koeficientai



20 pav. Purkštų dangų trinties koeficiento priklausomybė nuo šlako kiekio

Bandinių masių nuostoliai po tribologinių bandymų pateikti 21 paveiksle. Pastebima, kad esant 2,5% šlako kiekiui masės nuostoliai išlieka panašūs su nikeliu. Padidinus šlako kiekį iki 5%, pastebima, kad masės nuostoliai sumažėjo 11 %, t.y. pastebimas teigiamas poveikis ir tai parodo, kad danga yra atsparesnė dilimui, negu vien nikelio lydinio danga. Toliau didinant šlako

kiekį pastebimas nuoseklus nuostolių didėjimas. Tai galima sieti su didesniais rutuliniais tarpais ir prastesne kohezija su metaline matrica.



21 pav. Purkštų dangų masės nuostolių priklausomybė nuo šlako kiekio

3.3.5 Apibendrinimas

Purkštų dangų mikrostruktūros tyrimais nustatyta, kad perlydant purkštas dangas krosnyje 6 min. 1150 °C temperatūroje, šlako intarpai visiškai išsilydo ir susikristalizuoja į rutulinės formos daleles, dalis smulkių šlako dalelių susijungia ir suformuoja stambesnius interpus. Stambesnių šlako interpų kiekis didesnis daugiau šlako turinčiose dangose (5 % ir 10 %). Esant tokiai gautų dangų struktūrai, šlako priedo teigiamas poveikis kietumui ir atsparumui dilimui nustatytas tik 5 % šlako turinčiose dangose. Šių dangų kietumas yra ~14 % didesnis, o masės nuostoliai po sausos trinties bandymo ~11 % mažesni palyginus su vien iš nikelio lydinio pagaminta danga. Tikėtina, kad mažesnis šlako kiekis neturi pastebimo efekto šioms savybėms, o esant didesniai šlako kiekiui, susiformuoja daugiau stambių šlako interpų, kurie, lokaliai veikiant indentoriui, lengviau suskyla ir ištrupa. Tikėtina, kad perlydymo parametrų koregavimas (temperatūros mažinimas ir / ar išlaikymo trumpinimas) leistų išvengti visiško šlako dalelių išsilydimo ir jų koalescencijos, užtikrinant tokiu būdu struktūrą su smulkesniais ir tolygiau pasiskirsčiusiais šlako tarpais. Tai galėtų turėti teigiamo poveikio dangų mechaninėms savybėms. Struktūros tolygumas galėtų padidėti taip pat naudojant smulkesnės frakcijos šlaką. Esant 20% šlako dangoje, Ni lydinio tūrio nebeužtenka ištisinei metalinei matricai suformuoti ir dangoje per daug trapios šlako fazės; tokių dangų mechaninės savybės prastos – kietumas ir atsparumas dilimui labai žemi. Tribologijos bandymai parodė panašius rezultatus kaip ir laisvai krosnyje formuotų dangų, t. y. naudojant šlaką kaip priedą dangose padidėja dangos trinties koeficientas poroje su plieniu.

Išvados ir rekomendacijos

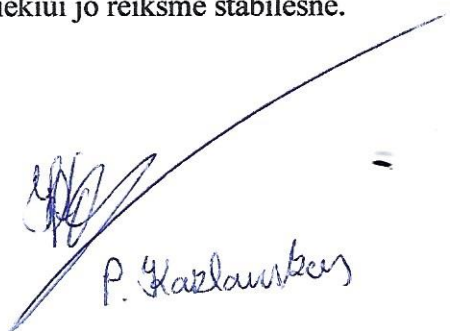
1. Kol kas nėra sukurto būdo efektyviai ir ekologiškai panaudoti visas mineralinės vatos gamybos metu susidaranti atlieka ir naujų sprendimų poreikis šioje srityje didelis.

2. Ištyrus mineralinės vatos gamybos metu susidarantį šlaką, lydalo likučius bei latako nuosėdas, nustatyta jų elementinė ir fazinė sudėtis bei įvertintos kitos savybės: pagrindinė šlako fazė yra diopsidas, tai atitinka nustatytą jo elementinę sudėtį; lydalas yra amorfinis, jo elementinė sudėtis panaši į šlaką; lydalas smulkinamas lengviau – t. y. šlakas kietesnis; latako nuosėdų pagrindinė fazė yra grafitas. Smulkinant ir sijoiant atliekas gaunamos homogeniškos netaisyklingos formos dalelių frakcijos, tinkamos dangoms purkšti.

3. Tyrimais nustatyta, kad latako nuosėdose yra ~90 % anglies grafito formos. Atsižvelgiant į tai, kad grafitas yra žinomas kaip labai geromis kietojo tepalo savybėmis pasižyminti medžiaga, galima bandyti taikyti šią atlieką savitėpėms apsauginėms dangoms, siekiant pagerinti tribologines savybes. Tikslinga atlikti atitinkamus eksperimentinius tyrimus, kadangi šiuo metu tokių duomenų nėra.

4. Atsižvelgiant į nustatytas tirtų atliekų savybes bei literatūroje turimus duomenis, galima teigti, kad kietas, daugiausia iš diopsido susidedantis šlakas galėtų būti naudojamas ten, kur šiuo metu taikomas diopsidas, pvz., kaip tribologines savybes pagerinantis priedas aliuminio oksido sukepintiems gaminiais. Taip pat, tikslinga atlikti tyrimus, siekiant įvertinti šlako priedo poveikį aliuminio oksido purkštų dangų savybėms, kadangi šiuo metu tokių tyrimų nėra atlikta.

5. Šiame darbe atliktais eksperimentiniais tyrimais nustatyta, kad nedideli šlako priedai (iki 5 % masės) ~ 13 % padidina purkštų perlydomųjų nikelio matricos kompozitinių dangų kietumą ir ~11 % sumažina masės nuostolius sausos trinties metu. Mažesnis šlako kiekis neturi pastebimo poveikio savybėms, esant didesniai šlako kiekiui kietumas sumažėja o masės nuostoliai didėja. Trinties koeficientas turi tendenciją tolygiai didėti didinant šlako kiekį, tačiau esant optimaliam 5 % šlako kiekiui jo reikšmė stabilesnė.



P. Kazlauskas

Literatūros sąrašas

1. AP-42: *Compilation of Air Emissions Factors, Volume 1: Stationary point and area sources (5-oji laida)* (2009). Prieiga per internetą: <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors>
2. Balkevičius, V., Christauskas, J., Gailius, A., Špokauskas, A. ir Siaurys V. (2007). Analysis of some properties of model system from lowmelting illite clay and fibrous mineral wool waste. *Material Science- Poland*, 25(1), 209–217.
3. Bougoul, S., Ruy, S., de Groot, F. ir Boulard, T. (2005). Hydraulic and physical properties of stonewool substrates in horticulture. *Scientia Horticulture*, 104(4), 391–405.
4. Changsha DECO Equipment Co., Ltd. (n.d.). *Vertical Lab Planetary Ball Mill*. Prieiga per internetą: <http://f03.s.alicdn.com/kf/HLB1zd7CHpXXXXXbapXX.PRXFXXXC.pdf>
5. Cheng, A., Lin, W-T. ir Huang, R., (2011). Application of rock wool waste in cement-based composites. *Material & Design*, 32(2), 636–642.
6. Corning, O. (1998). *Briquetting Enables Efficient Recycling of Rock Mineral Wool Process Residues – a System for Recycling Mineral Wool Process Residues Back through a Cupola Melting Furnace*. Prieiga per internetą: <https://p2infohouse.org/ref/23/22862.pdf>
7. Davis, J.R. (2004). *Handbook of Thermal Spray Technology*. Olandija: Thermal Spray Society Training Committee.
8. Dearnley, P.A. (1988). Wear Resistant Surfaces in Engineering – A Guide to their Production Properties and Selection. *Surface Engineering*, 4(1), 28–29.
9. Fauchais, L., Heberlein, J. ir Boulos, I. (2014). *Thermal Spray fundamentals. From Powder to Part*. Niujorkas: Springer Science & Business Media.
10. Flame spray technologies. (2016). *Thermal Spray Technology*. Prieiga per internetą: <https://www.fst.nl/downloads/>
11. Fotovvati, B., Namdari, N. ir Dehghanghadikolaei A. (2019). On Coating Techniques for Surface Protection: A Review. *Journal of manufacturing material process*, 3(1), 28.
12. Gao, L., Bian, X., Tian, Y. ir Fu, C. (2009). Effect of Co on microstructure and interfacial properties of Fe-based laser cladding. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 16(4), 84–88.
13. Gedeon, M. (2011). Nickel as a Coating Material. *Technical tidbits*. Prieiga per internetą: <https://materion.com/-/media/files/alloy/newsletters/technical-tidbits/issue-no-34---nickel-as-a-coating-material.pdf>
14. Grainger, S. ir Blunt, J. (1998). *Engineering coatings – design and application* (2-oji laida). Kembridžas: Woodhead Publishing Ltd.

15. Holbek, K. (1981). *Process for the production of mineral wool products*. JAV patentas nr. 4,287,142.
16. Hoornweg D. ir Bhada-Tata P. (2012). *What a waste: A global review of solid waste management*. Vašingtonas: Urban Development & Local Government Unit.
17. Hoornweg, D., Lam, P. ir Chaudry, M. (2005). *Waste management in Chine: Issues and Recommendations*. Prieiga per internetą: <http://documents.worldbank.org/curated/en/237151468025135801/pdf/332100CHA0Waste1Management01PUBLC1.pdf>
18. Yu, M. ir Li, W. (2018). Metal matrix composite coatings by cold spray. Iš P. Cavaliere *Cold-Spray Coatings* (p. 297–318). Šveicarija: Springer International Publishing.
19. Kerienė, J. (2014). *Chemija: vadovėlis*. Vilnius: Technika.
20. Kinnunen, P., Yliniemi, J., Talling, B. ir Illikainen, M. (2016). Rockwool waste in fly ash geopolymer composites. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 19, 1220–1227.
21. Kizinievič, O., Balkevičius, V., Pranckevičienė, J. ir Kizinievič, V. (2014). Investigation of the usage of centrifuging waste of mineral wool melt (CMWW), contaminated with phenol nad formaldehyde, in manufacturing of ceramic products. *Waste Management*, 34(8), 1488–1494.
22. Krishna, R.S., Mishra, J., Meher, S., Das, K.S., Mustakim, M.S. ir Singh, S.K. (2020). Industrial solid waste management through sustainable green technology: Case study insights from steel and mining industry in Keonjhar, India. *Materials today: proceedings*. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.949>
23. Kubiliūtė, R., Kaminskas, R. ir Kazlauskaitė, A. (2018). Mineral wool production waste as an additive for Portland cement. *Cement and concrete composites*, 88, 130–138.
24. Kuzma, T. (2011). *Vibromechaniškai veikiamų perlydymo metu purkštinių dangų tyrimas*. Baigiamasis magistro darbas. Prieiga per internetą: <https://vb.vgtu.lt/object/elaba:1906334/>
25. Lietuvos standartizacijos departamentas. (2018). *Metallic materials — Vickers hardness test — Part 1: Test method*. LST EN ISO 6507-1. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas.
26. Liu, C., Zhang, J., Sun, J. ir Zhang, X. (2007). Tribological properties of pressureless sintered alumina matrix ceramic materials improved by diopside. *Journal of the European Ceramic Society*, 28(1), 199–204.
27. Maminski, M.L., Krol, M.E., Jaskołowski, W. ir Borysiuk, P. (2011). Wood-mineral wool hybrid particleboards. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 69(2), 337–339.

28. Oerlikon Metco. (2016). *Material product data sheet. Nickel and Cobalt based self-fluxing alloy powders*. Prieiga per internetą: https://www.oerlikon.com/ecomaXL/files/metco/oerlikon_DSMTS-0026.7_Self-Fluxing.pdf&download=1
29. Ohberg, T.I. (1966). *Smelting of finely ground raw materials for the production of mineral wool*. Švedijos patentas nr. SE 205247.
30. Papadopoulos, A.M. (2005). State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. *Energy and Buildings*, 37(1), 77-86.
31. Paroc Group Oy Ab. (2004). *Waste injection into the stone wool melting furnace*. Prieiga per internetą: https://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=laymanReport&fil=LIFE02_ENV_FIN_000328_LAYMAN.pdf
32. Pranckevičienė, J. (2011). *Mineralinės vatos gamybos atliekų poveikis sukepusios keramikos savybėms*. Daktaro disertacija. Vilnius: Technika.
33. Pranckevičienė, J., Balkevičius, V. ir Špokauskas, A. (2010). Investigation on properties of sintered ceramics out of low-melting illite clay and additive of fine-dispersed nepheline syenite. *Materials Science*, 16(2), 231–235.
34. Recover Inc. (2017). *Industrial waste management: waste stream statistics*. Prieiga per internetą: <https://recoverusa.com/industrial-waste-management/>
35. S235JR steel grade, mechanical properties, chemical composition grade equivalent. (2014). Prieiga per internetą: <http://www.b2bmetal.eu/en/pages/index/index/id/141/>
36. Skarvelis, P. ir Padamitriou, G.D. (2008). Plasma transferred arc composite coatings with self-lubricating properties, based on Fe and Ti sulfides: Microstructure and tribological behaviour. *Surface & Coatings Technology*, 203(10-11), 1384-1394.
37. Stonys, R., Kuznetsov, D., Krasnikovs, A., Škamat, J., Baltakys, K., Antonovič, V. ir Černašėjus, O. (2016). Reuse of ultrafine mineral wool production waste in the manufacture of refractory concrete. *Journal of Environmental Management*, 176, 149-156.
38. Vantsi, O. ir Karki, T. (2014). Mineral wool waste in Europe: a review of mineral waste quantity and current recycling methods. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 16(1), 62-72.
39. Višniakas, I. (2003). *Medžiagotyra II. Laboratorinių darbų metodikos nurodymai*. Vilnius: Technika.
40. Wang, K., Chang, B., Lei, Y., Fu, H. ir Lin, Y. (2017). Effect of Cobalt on microstructure and wear resistance of Ni-based alloy coating fabricated by laser cladding. *Metals – Open Access Metallurgy Journal*, 7(12), 551.

41. Zhenzhou CY scientific Instrument Co., Ltd. (2016). *High Efficiency All-Direction 2L Lab Planetary Ball Grinding Mill Machine*. Prieiga per internetą: <https://cykylabequipment.en.made-in-china.com/product/IXvnzBldbgUY/China-High-Efficiency-All-Direction-2L-Lab-Planetary-Ball-Grinding-Mill-Machine.html>
42. Болгов В. Ю. и Балабанов В. И., (2011). *Автомобильные присадки и добавки*. Москва: Эксмо.

Priedai

MINERALINĖS VATOS GAMYBOS ATLIEKŲ TYRIMAS IR JŲ TAIKymo APSAUGINĖMS DANGOMS GAMINTI ĮVERTINIMAS

Paulius KAZLAUSKAS¹, Jelena ŠKAMAT¹

¹*Mechanikos ir medžiagų inžinerijos katedra Mechanikos fakultetas, Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva*

Santrauka. Šiame darbe, siekiant įvertinti galimybę utilizuoti mineralinės vatos gamybos atliekas gaminant apsaugines dangas, atlikti gabalinių mineralinės vatos gamybos atliekų tyrimai ir eksperimentinis kompozitinių Ni lydinio matricos dangų formavimas. Darbo tikslas – nustatyti mineralinės vatos gamybos atliekų savybes ir jų, kaip užpildo, poveikį apsauginių dangų savybėms. Darbe taikomi analitiniai ir eksperimentiniai tyrimo metodai. Taikant malimą ir sijoimą paruoštos 3 tipų gabalinių atliekų (šlako, lydalo likučių, latako nuosėdų) miltelių skirtingos frakcijos, ištirta jų morfologija, nustatytos elementinė bei fazinė sudėtys. Naudojant nikelio lydinio ir atliekų miltelius, paruošti mišiniai eksperimentinėms dangoms formuoti. Parengta eksperimentinių dangų formavimo metodika ir atlikti dangų formavimo bandymai. Dangų savybės įvertintos taikant mikrostruktūros tyrimą, kietumo matavimus, tribologinį bandymą. Nustatyta, kad nedideli šlako priedai (iki 5% masės) ~ 13% padidina purkštų perlydomųjų nikelio matricos kompozitinių dangų kietumą ir ~11% sumažina masės nuostolius sausos trinties metu. Mažesnis šlako kiekis neturi pastebimo poveikio savybėms, esant didesniai šlako kiekiui kietumas sumažėja o masės nuostoliai didėja. Trinties koeficientas turi tendenciją tolygiai didėti didinant šlako kiekį, tačiau esant optimaliam 5% šlako kiekiui jo reikšmė stabilesnė. Tyrime buvo įvertinta mineralinės vatos gamybos metu susidarančių atliekų, pritaikymo kompozitinėms purkštinėms dangoms gaminti validumas bei nustatytas atliekos (šlako) poveikis kompozitinių nikelio matricos dangų struktūrai ir savybėms.

Reikšminiai žodžiai: Kompozitinės dangos, mineralinės vatos gamybos atliekos, perdirbimas, termininis purškimas, liepsninis purškimas, nikelis.

Įvadas

Visose pramonės įmonėse po gamybos proceso susidaro įvairių atliekų, kurias būtina tinkamai sutvarkyti ir, svarbiausia, tai padaryti aplinkai saugiu būdu. Gamybinėmis atliekomis laikomos medžiagų (žaliavų), pusgaminių ir kitų materialinių išteklių, susidarančių produkcijos gamybos (darbų atlikimo, paslaugų teikimo) procese, likučiai, visiškai arba iš dalies praradę pirmines vartojimo savybes – chemines ar fizines. Pramoninių atliekų kiekis didėja nerimą keliančiu greičiu, o įvairių pramoninių atliekų šalinimas sąvartynuose nebėra įmanomas. Mineralinė vata – bendras terminas akmens, šlako ir stiklo vatai – yra labiausiai paplitusi izoliacinė medžiaga pasaulyje, kuri, priklausomai nuo rūšies, gaminama iš stiklo, uolienu (bazalto, dolomito) arba metalurginių šlakų lydalo. Išlydytas mišinys paverčiamas į pluoštą, naudojant didelio greičio sukimą. Mineralinės vatos gamybos proceso metu susidaro atliekų ir šalutinių produktų: mineralinės vatos nuopjovos, nuosėdos filtruose, centrifugavimo atliekos (neišplaušinto lydalo dalelės (karoliukai) ir į atliekas patekę mineralinės vatos plaušeliai), lydymo metu atsiskiriantis geležies lydalas, šlakas, lydalo likučiai ir kt. Spėjama, kad EU27 šalyse 2020 m. mineralinės vatos atliekų bus apie ~2,5 milijonų tonų. Dalį šių atliekų pavyksta sėkmingai grąžinti į mineralinės vatos gamybos procesą arba panaudoti kaip žaliavą gaminant kitus produktus. Tačiau didelė dalis atliekų iki šiol konservuojama sąvartynuose. Pagrindiniai sunkumai, kylantys bandant perdirbti mineralinės vatos atliekas bei panaudoti jas kitų produktų gamybai, yra susiję su gaunamų žaliavų grynumu bei mineralinės vatos atliekų poveikiu sveikatai (pvz., fenolio ir

formaldehidų buvimu sudėtyje). Taip pat reikia įvertinti ir ekonominius rodiklius, tokius kaip transportavimo, perdirbimo kaštai, darbo jėgos kaštai bei aplinkosaugos kaštai. Šiuo metu nuolat ieškoma naujų sprendimų mineralinės vatos atliekoms perdirbti ir panaudoti įvairiems produktams gaminti, mažinant tokiu būdu atliekų (tarp jų ir kenksmingų) kaupimąsi ir su juo susijusį neigiamą poveikį gamtai ir žmonių sveikatai. Šiame darbe siekiama įvertinti mineralinės vatos gamybos atliekų panaudojimo dangų technologijose perspektyvumą (Papadopoulos, 2005; Kizinievič, Balkevičius, Pranckevičienė ir Kizinievič, 2014; Vantsi ir Karki, 2014; Krishna et al., 2020; Recover Inc., 2017).

Skirtingų dangų formavimui yra sukurta daug įvairių metodų ir naudojama daug įvairių medžiagų. Padengimo tikslas dažniausiai yra apsaugoti detalę nuo įvairių mechaninių bei cheminių pažeidimų. Apsauginės dangos leidžia sumažinti detalių paviršių irimą dėl įvairių tipų korozijos bei dilimo, tokiu būdu padidinant įrangos resursą ir sumažinant kaštus, susijusius su įrangos stabdymu bei remontu. Taikant padengimo technologijas taip atliekamas detalių restauravimas – ekonominis efektas ypač didelis, kai remontuojamos ypatingos, vienetinės detalės, kurių gamyba yra ypač brangi. Pagrindinės medžiagos, taikomos apsauginių dangų gamybai, tai metalai ir jų lydiniai, oksidinė ir neoksidinė keramika bei kompozitai šių medžiagų pagrindu. Plačiai pritaikomos yra metalo matricos kompozitinės dangos, kuriose plastiška metalinė matrica užtikrina gerą sukibimą su substratu, dangos tįsumą, antikoroazines savybes (kai reikia) bei paskirsto kietas daleles, užtikrinančias atsparumą dilimui, arba, pavyzdžiui, kietojo tepalo savybėmis pasižyminčias daleles, užtikrinančias geras

tribologines savybes. Tokiems tikslams gali būti naudojamos atitinkamomis savybėmis pasižyminčios pramoninės atliekos, kurių nėra galimybės perdirsti arba grąžinti atgal į gamybą (Fotovvati, Namdari ir Dehghanghadikolaei, 2019; Yu ir Li, 2018).

Terminis purškimas yra bendras terminas, vartojamas apibūdiant medžiagų padengimo procesus, kurių metu padengimui naudojama medžiaga įkaitinama ir išpurškiama, tokiu būdu formuojant dispersinių dalelių srautą. Sraute dalelės yra įgreitinamos ir nukreipiamos į paruoštą paviršių, su kuriuo susidūrus, subliūška ir suformuoja tiškalus. Įvykus susidūrimui, susidaro ryšys tarp tiškalių. Taip susidaro atitinkamo storio danga. Pagrindinis terminio užpurškimo privalumas yra tas, kad šiam procesui gali būti naudojamas itin platus medžiagų pasirinkimas (Davis, 2004; Dearnley, 1988).

Šiame darbe yra siekiama ištirti, ar galima pritaikyti mineralinės vatos gamybos metu susidaranti atliekas kompozitinėms dangoms kurti.

Tyrimo metodika

Remianti literatūros analize ir informacija, gauta konsultuojantis su mineralinės vatos gamybos įmonės atstovu, tyrimams buvo atrinktos 3 tipų atliekos (šlakas, lydalo likučiai ir lydalo nuleidimo latakų nuosėdos), jos buvo susmulkintos, susijotos, ištirtos jų elementinė sudėtis, fazinė sudėtis ir gautų frakcijų dalelių morfologija.

Iš jų pasirinkta viena atlieka tolesniems tyrimams atlikti – šlakas. Panaudojant šlaką ir perlydomojo Ni lydinio miltelius, paruošti miltelių mišiniai dangoms formuoti. Dangos formuojamos naudojant liepsninį purškimą. Buvo ištirtos dangų mikrostruktūros, kietumas, atlikti tribologiniai bandymai.

Atliekų tyrimo metodika

Darbe buvo tirtos 3 tipų gabalinės mineralinės vatos gamybos atliekos – šlakas, lydalo likučiai ir lydalo nuleidimo latakų nuosėdos. Pirmiausia atliekos plaktuku buvo susmulkintos į mažesnius gabalus, toliau buvo malamos su planetiniu rutuliniu malūnu DECO-PBM-AD-2L.

Malimo metu įrenginio galva sukosi 500 aps./min, o planetinis diskas 80 aps/h. Malimo trukmė sudarė 10 min. Iš 200 g atliekų gabaliukų buvo gauta apie 100 g iki tinkamo dydžio sutrintų miltelių, kurie toliau buvo sijojami į frakcijas. Sijojimui naudojamas įrenginys „Haver EML 200 digital T“, kurio veikimo principas: įrenginys vibruoja pagal nustatytą amplitudę ir intervalą, tuo metu žaliava krenta per mažėjančius sietelius. Taip yra atskiriamos stambesnės dalelės nuo mažesnių. Tyrimo metu buvo sijojama 10 min. Amplitudė buvo 9, pagal įrenginio skalę. Vibravimo intervalas buvo 9 s. Naudojami sietai: 125 µm, 90 µm, 63 µm, 45 µm.

Po sijojimo, buvo atlikti šlako, lydalo bei latakų nuosėdų morfologijos, elementinės bei fazinės sudėčių tyrimai.

Purškštų dangų tyrimo metodika

Liepsniniu purškimu buvo formuojamos 5 skirtingos dangos. Dangoms formuoti buvo naudojami šlakas (frakcija tarp 45 µm ir 63 µm) ir nikelio lydinio mišiniai. Nikelio lydinys ir šlakas buvo sumaišomi tam tikru santykiu, gautas mišinys užpurškstas ant substratų, naudojant liepsninio purškimo metodą ir robotizuotą purškimo stendą. Toliau, siekiant perlydyti užpurkštą dangą, atliktas užpurkštų bandinių kaitinimas krosnyje.

Substrato paruošimo bei purškimo parametrai pateikti 1 lentelėje.

1 lentelė. Liepsninio purškimo parametrai
Table 1. Flame spraying parameters

Substrato paruošimas	Nušratuotas ir nuriebalintas
Purškimo atstumas	150 mm
Purškimo liepsna	0,8 bar C ₂ H ₂ / 3,8 bar O ₂
Substrato pakaitinimas	250-270 °C
Purškimo greitis / ėjimai	230 mm/s / 5
Užpurkšto sluoksnio storis	1 – 1,3 mm

Dangos buvo formuojamos ant tokių pat plokštelių kaip ir krosnyje formuojamų dangų. Nikelio lydinys, toks pat kaip ir naudotas krosnyje formuotoms dangoms (Metco 12C). Formuotos dangos ir jų žymenys pateikti 2 lentelėje.

2 lentelė. Purškimu formuotų dangų sudėtis bei žymenys (Metco 12C – likusi dalis)

Table 2. Coatings formed by flame spraying composition and marking (Metco 12C – other part)

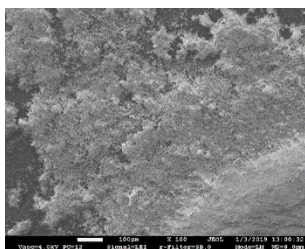
Bandinio žymuo	P0	P2,5	P5	P10	P20
Šlako kiekis, % pagal masę	0	2,5	2	10	20

Užpurkštų dangų perlydymas atliktas krosnyje „Elektros krosnis W-50“. Perlydymo parametrai: temperatūra: 1150 °C; išlaikymo laikas – 6 min. Po perlydymo, dangoms buvo atlikti tokie pat tyrimai kaip ir krosnyje formuotoms dangoms.

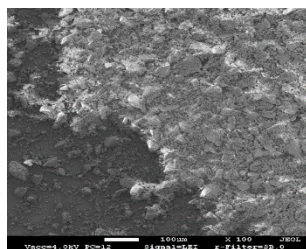
Smulkintų MVG atliekų dalelių morfologija ir elementinė sudėtis

SEM tyrimo metu buvo gauti šlako, lydalo bei latakų nuosėdų įvairių frakcijų vaizdai (1 pav.). Lydale bei šlake galima pastebėti, kad dalelės yra susmulkintos į daugiakampes netaisyklingos formos stambesnes daleles, kurios yra aplipusios

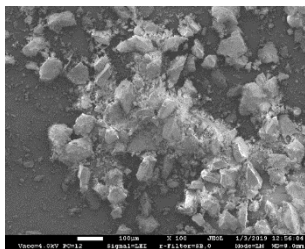
smulkesnėmis dalelėmis. Taip pat matoma, kad šlako ir lydalo frakcijose <45 µm labai daug smulkių dalelių masės, kuri sulipina į bendrą masę ir stambesnes daleles. Šios smulkios masės yra frakcijoje tarp 45 ir 63 µm; taip pat kažkiek jos yra ir dar stambesnėje frakcijoje iki 90 µm. Tikėtina, kad pritaikius papildomą sijojimą (prailginus sijojimo laiką), šią smulkią frakciją galima būtų atskirti. Stambesnes lydalo frakcijas (nuo 90 µm) sudaro švarios netaisyklingos formos dalelės; šių frakcijų šlako dalelėse stebimas nedidelis kiekis ant paviršiaus prilipusių smulkių dalelių. Latakų nuosėdų frakcijose nesimato smulkių frakcijų nuosėdų ant didesnės frakcijos dalelių. Smulkios frakcijos dalelės nesulipusios.



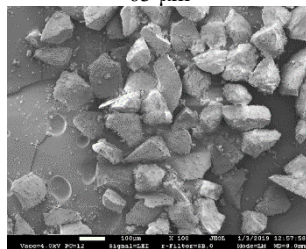
a) lydalas, frakcija iki 45 µm



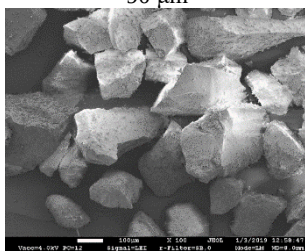
b) lydalas, frakcija nuo 45 iki 63 µm



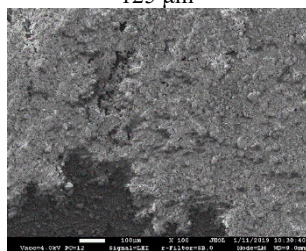
c) lydalas, frakcija nuo 63 iki 90 µm



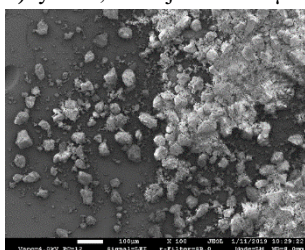
d) lydalas, frakcija 90 µm iki 125 µm



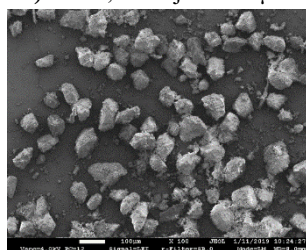
e) lydalas, frakcija virš 125 µm



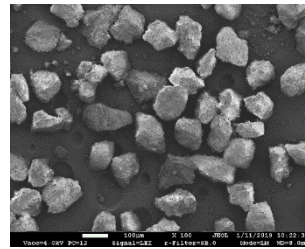
f) šlakas, frakcija iki 45 µm



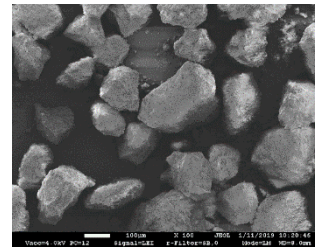
g) šlakas, frakcija nuo 45 iki 63 µm



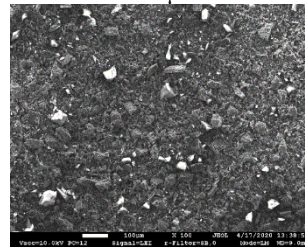
h) šlakas, frakcija nuo 63 iki 90 µm



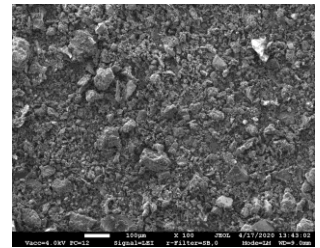
i) šlakas, frakcija nuo 90 iki 125 µm



j) šlakas, frakcija virš 125 µm



k) l. nuosėdos, frakcija iki 45 µm



l) l. nuosėdos, frakcija nuo 45 iki 63 µm

1 pav. Smulkintų MVG atliekų skirtingų frakcijų morfologija

Fig. 1. Morphology of different fractions of shredded MWMW

XRF tyrimo metu buvo nustatyta šlako, lydalo bei latakų nuosėdų cheminė sudėtis. Šlako cheminė sudėtyje matome, kad pagrindinis elementas yra deguonis, kurio yra 42,43 %. Taip pat, didelę dalį sudaro kalcis (14,10 %) su siliciu (17,79 %). Po jų, jau 10 % nebesiekia aliuminis (8,37 %), magnis (5,86 %), geležis (7,57 %), natriis (1,47 %), titanis (1,34 %). Yra matomos vario, cinko, kalio, chromo pėdsakai nesiekiantys 1 %. Lydale, taip pat kaip ir šlake, pagrindinis elementas yra deguonis (43,32 %). Panaši tendencija yra ir su kalciumu (14,10 %) ir siliciu (17,77 %) turinčiais daugiau 10 % kiekio sudėtyje. Mažesnę dalį, mažiau nei 10 %, sudaro natriis (1,40 %), magnis (6,06 %), aliuminis (8,49 %), geležis (6,29 %), titanis (1,23 %). Lydalo sudėtyje galima rasti ir kalio, chromo, vario ir cinko pėdsakų, kurių yra mažiau nei 1 %. Latakų nuosėdų pagrindinis elementas yra anglis, kuri sudaro 90 % visos medžiagos kiekio. Taip pat, yra nedaug geležies (4,62 %), aliuminio (1,09 %), silicio (2,31 %).

3 lentelė. Šlako cheminė sudėtis
Table 3. Slag chemical composition

O, %	Na, %	Mg, %	Al, %
42,43	1,47	5,86	8,37
Ca, %	Ti, %	Cr, %	Fe, %
13,79	1,34	0,12	7,57
Si, %	K, %	Cu, %	Zn, %
17,79	0,7	0,01	0,03

4 lentelė. Lydalo cheminė sudėtis
Table 4. Melt chemical composition

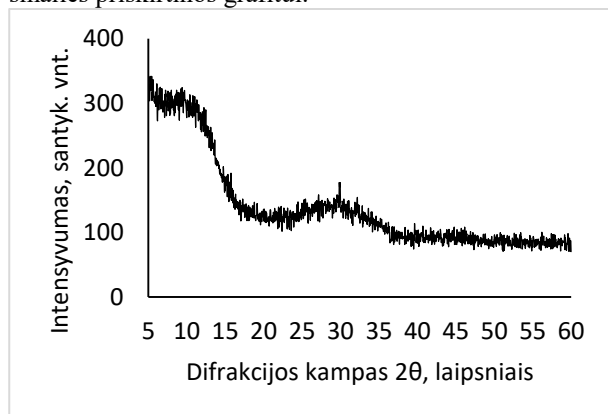
O, %	Na, %	Mg, %	Al, %
43,32	1,40	6,06	8,49
Ca, %	Ti, %	Cr, %	Fe, %
14,10	1,23	0,06	6,29
Si, %	K, %	Cu, %	Zn, %
17,77	0,65	0,01	0,02

5 lentelė. Latako nuosėdų cheminė sudėtis
Table 5. Gutter sediment chemical composition

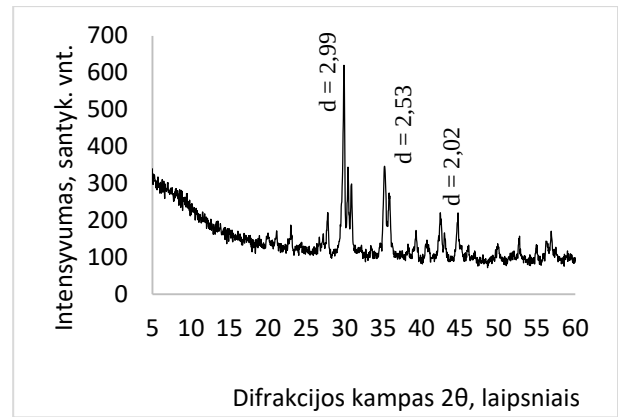
C, %	Na, %	Mg, %	Al, %
90,1	0,141	0,269	1,09
Ca, %	Ti, %	Cr, %	Fe, %
0,779	0,075	0,008	4,62
Si, %	K, %	Cu, %	Zn, %
2,31	0,198	0,015	0,024

MVG atliekų fazinės sudėties tyrimo rezultatai

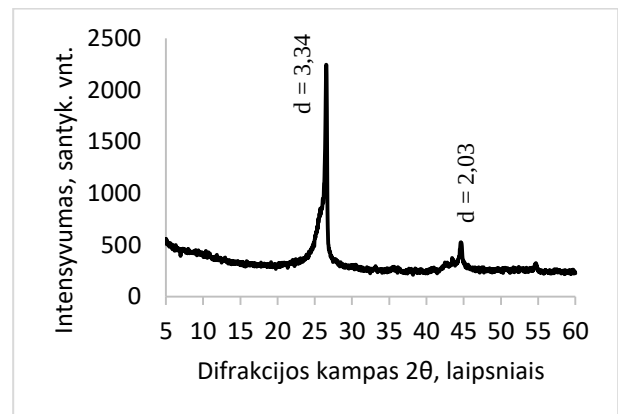
Lydalo rentgeno difrakcijos kreivėje nėra smailių ir susidaręs nelinijinis signalo fonas su iškilimu tarp ~22 ir ~37 laipsnių byloja, kad lydalas yra amorfinis (2 pav.). Šlako difrakcijos kreivės visos pagrindinės smailės gali būti priskirtos diopsidui (pagrindinė formulė: $MgCaSi_2O_6$; sudėtyje gali būti Al, Fe, Ti, Na, Mg, kt.), t. y. šlako pagrindinę dalį sudaro diopsido fazė. Latako nuosėdų kreivėje visos aptiktos smailės priskirtinos grafitui.



2 pav. Lydalo difrakcinė kreivė
Fig. 2. XRD pattern of the melt



3 pav. Šlako XRD kreivė
Fig. 3. Slag XRD graph

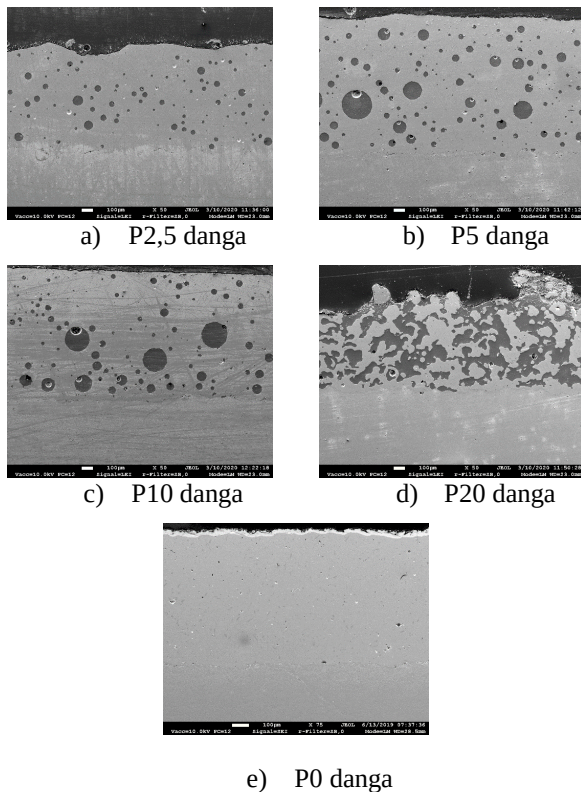


4 pav. Latako nuosėdų XRD kreivė
Fig. 4. Gutter sediment XRD graph

Purkštų dangų mikrostruktūra

Purkštų ir krosnyje perlydytų dangų mikrostruktūros parodytos 5 paveiksle. Purkštų dangų sulydymas su substratu yra geras, be žymių defektų sulydymo linijoje. Vien iš Ni lydinio pagamintos purškimo su perlydymu dangos mikrostruktūra nieko nesiskiria nuo dangos, gautos krosnyje perlydžius laisvai padėtus miltelius. Taikant po purškimo darbe nurodytus perlydymo parametrus, dangose su 2,5–10 % šlako susiformavo nikelio lydinio matricos su rutulinės formos šlako tarpais mikrostruktūra, kuri ženkliai skiriasi nuo struktūros, gautos perlydant krosnyje laisvai padėtą miltelių mišinį. Tokia taisyklinga rutulinė tarpų forma galėjo susiformuoti perlydymo metu išsilydant šlako tarpams ir kristalizuojantis jiems aušimo metu anksčiau, negu nikelinio lydinio apsilydžiusioms fazėms. Taip pat pastebėta, kad dangose su didesniu šlako kiekiu (P5 ir P10) susiformavo didesni rutuliniai tarpai, tikėtina, susijungiant šalia esantiems smulkesniems tarpams. P20 dangoje, kur nikelio lydinio tūrio nebeužtenka ištisinei metalinei matricai susiformuoti, struktūra kitokia. Čia struktūrą dalinai sudaro nikelio matricos su šlako tarpais plotai, dalinai – šlako matricos su nikelio lydinio tarpais plotai, taip pat atskiri šlako ir Ni lydinio ploteliai. Visose dangose matomi nedideli

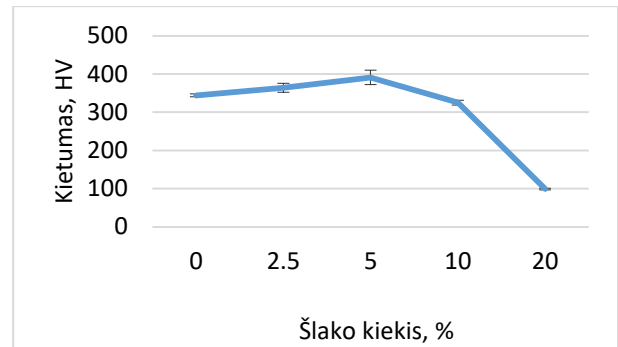
defektai – daugiausia nedidelės poros, kurios galėjo susiformuoti nespėjus pasišalinti dujoms iš išlydytų fazių.



5 pav. Purkštų dangų mikrostruktūra
Fig. 5. Sprayed coating microstructure

Purkštų dangų kietumo matavimų rezultatai

Kietumo matavimų rezultatai pavaizduoti 6 paveiksle. P2,5 bei P5 dangose pastebėta, kad kietumas yra didesnis negu nikelio lydinio. P10 ir P20 dangose pastebėta, kad kietumas mažesnis negu nikelio lydinio. P10 dangoje kietumas mažesnis, bet nežymiai (apie 20 HV). Didžiausias skirtumas buvo pastebėtas P20 dangoje. Gautas kietumas yra neadekvatus. Atkreipus dėmesį į prieš tai atliktas SEM nuotraukas, pastebima, kad P20 dangoje dalelės susilieja tarpusavyje, todėl kietumo matavimuose indenterius pataiko į atlieką ir ją suskaldo, kas iškraipo matavimų rezultatus.

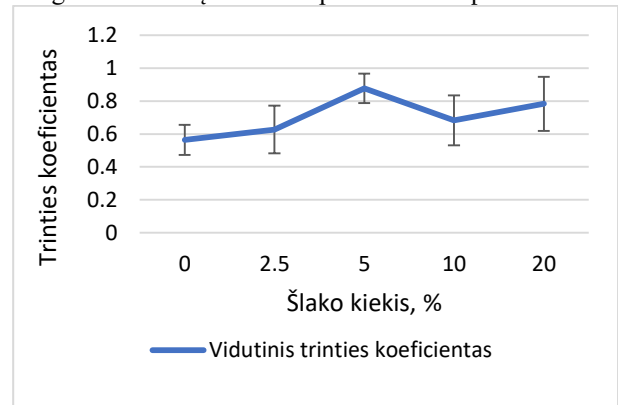


6 pav. Purkštų dangų kietumo priklausomybė nuo šlako kiekio dangoje

Fig. 6. Sprayed coating hardness dependence on slag quantity in the coating

Purkštų dangų tribologinių savybių rezultatai

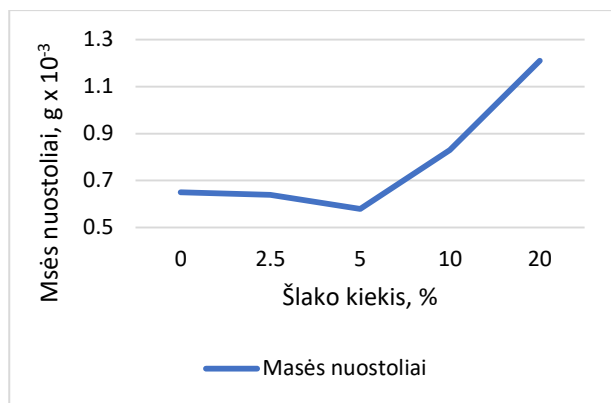
Atlikus tyrimą matoma, kad didžiausias trinties koeficientas gautas P5 dangoje (0,877). Kitų koncentracijų dangose gauti mažesni trinties koeficientai (P2,5 - 0,627; P10 - 0,683; P20 - 0,783). Palyginus su P0 danga, rezultatai lieką panašūs, t. y. su šlaku formuojamos dangos trinties koeficientas yra aukštesnis negu iš vien nikelio lydinio formuotai dangai. Matavimų rezultatai pavaizduoti 7 paveiksle.



7 pav. Purkštų dangų trinties koeficiento priklausomybė nuo šlako kiekio

Fig. 7. Sprayed coating friction coefficient dependence on slag quantity in the coating

Bandinių masių nuostoliai po tribologinių bandymų pateikti 8 paveiksle. Pastebima, kad esant 2,5 % šlako kiekiui masės nuostoliai išlieka panašūs su nikelio. Padidinus šlako kiekį iki 5 %, pastebima, kad masės nuostoliai sumažėjo 11 %, t.y. pastebimas teigiamas poveikis ir tai parodo, kad danga yra atsparesnė dilimui, negu vien nikelio lydinio danga. Toliau didinant šlako kiekį pastebimas nuoseklus nuostolių didėjimas. Tai galima sieti su didesniais rutuliniais intarpais ir prastesne kohezija su metaline matrica.



8 pav. Purkštų dangų masės nuostolių priklausomybė nuo šlako kiekio

Fig. 8. Sprayed coating mass loss dependence on slag quantity in the coating

Išvados

1. Ištyrus mineralinės vatos gamybos metu susidarantį šlaką, lydalo likučius bei latakų nuosėdas, nustatyta jų elementinė ir fazinė sudėtis bei įvertintos kitos savybės: pagrindinė šlako fazė yra diopsidas, tai atitinka nustatytą jo elementinę sudėtį; lydalas yra amorfinis, jo elementinė sudėtis panaši į šlaką; lydalas smulkinamas lengviau – t. y. šlakas kietesnis; latakų nuosėdų pagrindinė fazė yra grafitas. Smulkinant ir sijojant atliekas gaunamos homogeniškos netaisyklingos formos dalelių frakcijos, tinkamos dangoms purkšti.

2. Tyrimais nustatyta, kad latakų nuosėdose yra ~90 % anglies grafito formos. Atsižvelgiant į tai, kad grafitas yra žinomas kaip labai geromis kietojo tepalo savybėmis pasižyminti medžiaga, galima bandyti taikyti šią atlieką savitėpams apsauginėms dangoms, siekiant pagerinti tribologines savybes. Tikslinga atlikti atitinkamus eksperimentinius tyrimus, kadangi šiuo metu tokių duomenų nėra.

3. Atsižvelgiant į nustatytas tirtų atliekų savybes bei literatūroje turimus duomenis, galima teigti, kad kietas, daugiausia iš diopsido susidedantis šlakas galėtų būti naudojamas ten, kur šiuo metu taikomas diopsidas, pvz., kaip tribologines savybes pagerinantis priedas aliuminio oksido sukepintiems gaminams. Taip pat, tikslinga atlikti tyrimus, siekiant įvertinti šlako priedo poveikį aliuminio oksido purkštų dangų savybėms, kadangi šiuo metu tokių tyrimų nėra atlikta.

4. Šiame darbe atliktais eksperimentiniais tyrimais nustatyta, kad nedideli šlako priedai (iki 5 % masės) ~ 13 % padidina purkštų perlydomųjų nikelio matricos kompozitinių dangų kietumą ir ~11 % sumažina masės nuostolius sausos trinties metu. Mažesnis šlako kiekis neturi pastebimo poveikio savybėms, esant didesniai šlako kiekiui kietumas sumažėja o masės nuostoliai didėja. Trinties koeficientas turi tendenciją tolygiai didėti didinant šlako kiekį, tačiau esant optimaliam 5 % šlako kiekiui jo reikšmė stabilėsnė

Literatūros šaltiniai

- Papadopoulos, A.M. (2005). State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. *Energy and Buildings*, 37(1), 77-86.
- Kizinievič, O., Balkevičius, V., Pranckevičienė, J. ir Kizinievič, V. (2014). Investigation of the usage of centrifuging waste of mineral wool melt (CMWW), contaminated with phenol nad formaldehyde, in manufacturing of ceramic products. *Waste Management*, 34(8), 1488–1494.
- Vantsi, O. ir Karki, T. (2014). Mineral wool waste in Europe: a review of mineral waste quantity and current recycling methods. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 16(1), 62-72.
- Fotovvati, B., Namdari, N. ir Dehghanghadikolaei A. (2019). On Coating Techniques for Surface Protection: A Review. *Journal of manufacturing material process*, 3(1), 28.
- Yu, M. ir Li, W. (2018). Metal matrix composite coatings by cold spray. Iš P. Cavaliere *Cold-Spray Coatings* (p. 297–318). Šveicarija: Springer International Publishing
- Davis, J.R. (2004). *Handbook of Thermal Spray Technology*. Olandija: Thermal Spray Society Training Committee.
- Dearnley, P.A. (1988). Wear Resistant Surfaces in Engineering – A Guide to their Production Properties and Selection. *Surface Engineering*, 4(1), 28–29.
- Krishna, R.S., Mishra, J., Meher, S., Das, K.S., Mustakim, M.S. ir Singh, S.K. (2020). Industrial solid waste management through sustainable green technology: Case study insights from steel and mining industry in Keonjhar, India. *Materials today: proceedings*. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.949>
- Recover Inc. (2017). *Industrial waste management: waste stream statistics*. Prieiga per internetą: <https://recoverusa.com/industrial-waste-management/>

Investigation of Mineral Wool Production Waste and Evaluation of its Application for the Production of Protective Coatings.

P. Kazlauskas, J. Škamat

Abstract

The aim of the work is to determine the properties of mineral wool production waste and its effect as a filler on the properties of protective coatings. Analytical and experimental research methods are applied in the work. By milling and sieving, waste (slag) powders of different fractions were prepared. Using nickel and waste powder, mixtures were prepared to form experimental coatings. An experimental coating formation methodology was developed and coating formation tests were performed. The properties of the

coatings were evaluated using microstructural analysis, hardness measurements, tribological test. Experimental studies in this work have shown that small slag additives (up to 5% by weight) increase the hardness of sprayed nickel matrix composite coatings by ~ 13% and reduce weight loss by 11% during dry friction. A lower slag content has no noticeable effect on the properties, a higher slag content decreases the hardness and increases the weight loss. The coefficient of friction tends to increase steadily with increasing slag content, but at an optimal 5% slag content its value is more stable. The study evaluated the validity of waste generated during the production of mineral wool, its application to the production of composite spray coatings and determined the effect of waste (slag) on the structure and properties of composite nickel matrix coatings.

Keywords: Composite coatings, mineral wool production waste, recycling, thermal spraying, flame spraying, nickel.