



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

TIG suvirinimo panaudojimo atsparioms dilimui dangoms formuoti galimybių tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Rolandas Šertvytis
Projekto autorius

Doc. Regita Bendikienė
Vadovė



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

TIG suvirinimo panaudojimo atsparioms dilimui dangoms formuoti galimybių tyrimas

Baigiamasis magistro projektas
Gamybos inžinerija (6211EX015)

Rolandas Šertvytis

Projekto autorius

Doc. Regita Bendikienė

Vadovė

Doc. Saulius Baskutis

Recenzentas



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Rolandas Šertvytis

**TIG suvirinimo panaudojimo atsparioms dilimui dangoms
formuoti galimybių tyrimas**
Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Rolando Šertvyčio, baigiamasis projektas tema „TIG suvirinimo panaudojimo atsparioms dilimui dangoms formuoti galimybių tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)



Kaunas technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Studentui – Rolandas Šertvytis

1. Projekto tema –

TIG suvirinimo panaudojimo atsparioms dilimui dangoms formuoti galimybių tyrimas

(Lietuviškai)

The Research of TIG Welding Process Possibilities to be Used as Hardfacing Technology

(Angliškai)

2. Projekto tikslas ir uždaviniai –

Tyrimo tikslas – ištirti TIG metodo pritaikomumą dilimui atsparioms dangoms formuoti.

Uždaviniai:

1. Parinkti TIG suvirinimo proceso parametrus.
2. Parinkti tinkamą miltelių cheminę sudėtį dangos formavimui TIG metodu.
3. Atlikti TIG metodu suformuotos dangos mikrostruktūros ir kietumo tyrimus.
4. Nustatyti TIG metodu suformuotos dangos atsparumą abrazyviniam dilimui.
5. Atlikti TIG metodu suformuotos dangos XRD ir EDS analizę.
6. Palyginti TIG metodu suformuotą dangą su PTAW ir SAW metodais suformuotomis dangomis.

3. Pradiniai projekto duomenys –

Nėra

4. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos –

Standartinė įranga ir medžiagos: suvirinimo šaltinis AirLiquide SAF-FRO Combiwig 4000 AC/DC (Italija); WL20 volframo elektrodai (TBI Industries, Vokietija); 99,99% Argono apsauginės dujos (Gaschema, Lietuva); Castolin 16316, Castolin 16221, Cr3C2-Ni miltelinės medžiagos, bandinys iš S235 plieno.

Projekto autorius

(Vardas, Pavardė)

(parašas)

(data)

Vadovė

(Vardas, Pavardė)

(parašas)

(data)

Krypties studijų programų
vadovė

(Vardas, Pavardė)

(parašas)

(data)

Autoriaus Šertvytis, Rolandas. TIG suvirinimo panaudojimo atsparioms dilimui dangoms formuoti galimybių tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovė doc. Regita Bendikienė; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: danga, TIG, karbidai, PTAW, abrazyvinis dilimas, SEM, XRD.

Kaunas, 2020. 60 p.

Santrauka

Baigiamojo magistro projekto tikslas – ištirti TIG metodo pritaikomumą dilimui atsparioms dangoms formuoti.

Siekiant užsibrėžto tikslo atlikta mokslinių publikacijų analizė, suformuota TIG metodu abrazyviniam dilimui atspari danga, atlikti mikrostruktūros ir kietumo tyrimai. Gauti rezultatai palyginti su kitomis dilimui atspariomis dangomis, kurios buvo suformuotos lankiniu suvirinimu plazmos srautu ir suvirinimu po fluso sluoksniu.

Tyrimo metu gauti rezultatai leidžia teigti, kad TIG metodo pritaikymas abrazyviniam dilimui atsparioms dangos formuoti yra perspektyvi technologija. Tai mobilus ir ekonomiškai nebrangus metodas, kuris nereikalauja didelių investicijų ir leidžiantis dirbti su plačiu medžiagų diapazonu. Suformuotos abrazyviniam dilimui atsparios dangos mechaninės savybės nedaug skyrėsi nuo plazma suformuotų dangų rezultatų. Trijų kūrų abrazyvinio dilimo tyrimo metu gauti rezultatai leido daryti prielaidą, kad TIG metodu gauta danga šiam dilimui yra atsparesnė nei plazma ar suvirinimu po fluso sluoksniu gautos dangos.

Nors metodas perspektyvus, jo platesnį panaudojimą praktikoje riboja nepakankamas atliktų tyrimų kiekis, sudėtinga rasti informacijos kokius rezultatus šis metodas duoda ir kuriose srityse jį tikslinga taikyti.

Sertvytis, Rolandas. The Research of TIG Welding Process Possibilities to be Used as Hardfacing Technology. Master's Final Degree Project / supervisor assoc. prof. Regita Bendikienė; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: coating, TIG, carbides, PTAW, abrasive wear, SEM, XRD.

Kaunas, 2020. 60.

Summary

The final master's project aim is to investigate the possibilities of applying the TIG method for hardfacing technology.

To achieve the aim of the final master's project the analysis of the scientific publications was carried out, the resistant to abrasive wear coating was made, the tests of microstructure and hardness were done. The results were compared with other coatings which were made by plasma transferred arc welding and submerged arc welding.

During the tests, the results revealed the possibility of the TIG method to be used as the technology for the hardfacing. It is a mobile, perspective and economical method for hardfacing and it doesn't need high investment in order to start to use it. It is possible to use a wide range of hardfacing materials as well.

The hardfacing coatings made by the TIG method have the same properties as the coatings made by plasma transferred arc welding. Three-body abrasive wear test results showed, that the resistance of coatings to wear made by the TIG method was higher than coatings formed by PTAW. The SAW coatings were the weakest during the tests.

Despite the fact of the perspective of the method it is not used widely. The reason is the lack of tests and information about how to use it and what kind of results it can produce.

Turinys

| | |
|--|----|
| Paveikslų sąrašas..... | 9 |
| Įvadas | 11 |
| Tyrimo aktualumas | 13 |
| 1. Literatūros apžvalga | 15 |
| 1.1. Technologijos formuojančios dangas aplydimu | 15 |
| 1.1.1. MMAW metodo taikymas | 16 |
| 1.1.2. PTA metodo taikymas | 16 |
| 1.1.3. Plakiravimas lazeriu | 17 |
| 1.1.4. SAW metodo taikymas..... | 19 |
| 1.2. TIG metodo pritaikymo galimybės dangų formavime | 20 |
| 1.2.1. TIG (GTAW) metodo taikymas..... | 22 |
| 1.3. TIG suvirinimo proceso parametrų pasirinkimas..... | 25 |
| 1.3.1. Suvirinimo poliškumas | 26 |
| 1.3.2. Suvirinimo įtampa..... | 27 |
| 1.4. Volframo elektrodai | 27 |
| 1.5. Apsauginės dujos | 29 |
| 1.6. Medžiagų naudojamų formuoti atsparias dilimui dangas pasirinkimas ir rūšys..... | 31 |
| 1.7. Legiruojantys elementai naudojami dangų formavime | 32 |
| 1.8. Medžiagų rūšių tipai..... | 32 |
| 1.9. Medžiagos tipo įtaka dangos formavimo procesui | 32 |
| 2. Tyrimo metodika..... | 34 |
| 2.1. Naudota suvirinimo įranga dangoms formuoti | 34 |
| 2.2. Cheminė miltelių ir bandinio sudėtys..... | 34 |
| 2.3. Mikrošlifų paruošimas tyrimams | 35 |
| 2.4. Dangų mechaninių savybių tyrimas | 36 |
| 2.5. Atsparumo dilimui testavimo metodas..... | 37 |
| 2.6. Dangų cheminių elementų analizė | 39 |
| 3. Eksperimentinė dalis ir rezultatų apibendrinimas..... | 40 |
| 3.1. Dangų formavimas | 40 |
| 3.2. Gautų dangų rezultatai..... | 41 |
| 3.2.1. T-SS-R danga..... | 46 |
| 3.2.2. T-Ni-R danga | 49 |
| 4. Išvados..... | 54 |
| Literatūros sąrašas..... | 56 |
| Priedai | 61 |

Lentelių sąrašas

| | |
|--|----|
| 1 lentelė. Parametrai supresuotų miltelių perlydimui GTAW metodu..... | 24 |
| 2 lentelė. TIG suvirinimo parametrų įtaka šilumos dydžiui | 26 |
| 3 lentelė. Volframo elektrodo geometriniai parametrai, rekomenduojami paruošimo kampai ir taikytinos srovės | 29 |
| 4 lentelė. S355 plieno cheminė sudėtis..... | 34 |
| 5 lentelė. Matricių deriniai..... | 35 |
| 6 lentelė. Dviejų ir trijų kūnų dilimo bandymo parametrai | 38 |
| 7 lentelė. Pagrindo metalo elementinė sudėtis | 46 |
| 8 lentelė. T-SS-R dangos elementinė sudėtis..... | 47 |
| 9 lentelė. T-Ni-R dangos pagrindo metalo elementinė sudėtis | 50 |
| 10 lentelė. T-Ni-R dangos elementinė sudėtis | 51 |

Paveikslų sąrašas

| | |
|---|----|
| 1 pav. Tipiniai dangų panaudojimo pavyzdžiai | 15 |
| 2 pav. Dangos, suformuotos aplydant nano medžiaga dengtu elektrodu, mikrostrukūra | 16 |
| 3 pav. Dangos suformuotos PTA metodu | 17 |
| 4 pav. Dangos formavimas iš miltelių lazeriu..... | 17 |
| 5 pav. Danga suformuota lazeriu | 18 |
| 6 pav. Lazerinis dangos formavimas su indukcinio pakaitinimu | 18 |
| 7 pav. SAW technika ir veikimo principas | 19 |
| 8 pav. Kelių vielų panaudojimas dangoms formuoti..... | 20 |
| 9 pav. Principinė GTAW veikimo schema | 21 |
| 10 pav. GTAW metodu suformuotos daugiasluoksnės dangos mikrostrukūra | 21 |
| 11 pav. Dilimui atsparios dangos ir pagrindo adhezija | 21 |
| 12 pav. GTAW metodu suformuotos dangos iš miltelių struktūra | 22 |
| 13 pav. Vielos padavimas į suvirinimo vonelę | 23 |
| 14 pav. Dangos formavimas su GTAW ir supresuotais milteliais | 24 |
| 15 pav. GTAW metodu suformuotos dangos pavyzdžiai..... | 25 |
| 16 pav. TIG metodo dangoms formuoti principinė schema | 26 |
| 17 pav. TIG poliškumo įtaka suvirinimo vonelės formai..... | 27 |
| 18 pav. Volframo elektrodo principinė paruošimo schema..... | 28 |
| 19 pav. Argono ir Ar-He įtaka suvirinimo siūlei virinant TIG metodu..... | 30 |
| 20 pav. Argono ir Ar – He apsauginių dujų aplinkoje gautos siūlės..... | 30 |
| 21 pav. Argono dujų apsauginės zonos forma priklausomai nuo dujų debito (šaltasis ir karštasis variantai)..... | 31 |
| 22 pav. Argono debito įtaka suvirinimo siūlės pločiui ir gyliui..... | 31 |
| 23 pav. Vikerso matavimo metodo principinė schema..... | 36 |
| 24 pav. Vikerso piramidės deimantinio indentoriaus įspaudas..... | 37 |
| 25 pav. Kietumo matavimo įrenginys Indentec 5030KV (Zwick/Roell, Germany) | 37 |
| 26 pav. Dviejų kūnų abrazyvinio dilimo bandymo schema:..... | 38 |
| 27 pav. Trijų kūnų abrazyvinio dilimo bandymo schema: | 39 |
| 28 pav. TIG, PTAW, SAW metodais suformuotų dangų Vikerso kietumas | 42 |
| 29 pav. TIG, PTAW ir SAW metodais suformuotų dangų dviejų kūnų bandymo dilimo rezultatai | 43 |
| 30 pav. TIG, PTAW ir SAW metodais suformuotų dangų trijų kūnų testo dilimo rezultatai | 44 |
| 31 pav. Nesustiprintų dangų dilimo rezultatai atlikus dviejų kūnų dilimo testą..... | 44 |
| 32 pav. Sustiprintų dangų dilimo rezultatai jas suformavus TIG, SAW, PTAW metodais | 45 |
| 33 pav. Sustiprintų dangų dilimo rezultatai atlikus trijų kūnų testą..... | 45 |
| 34 pav. T-SS-R pagrindinio metalo SEM ir EDS analizės rezultatai..... | 46 |
| 35 pav. T-SS-R suformuotos dangos SEM ir EDS analizės rezultatai..... | 47 |
| 36 pav. T-SS-R elementinės sudėties tyrimas EDS metodu..... | 47 |
| 37 pav. T-SS-R dangos paviršiaus XRD analizė..... | 48 |
| 38 pav. Elementinės sudėties pasiskirstymas T-SS-R dangos ir jos pagrinde (skersinis pjūvis)..... | 49 |
| 39 pav. T-Ni-R dangos pagrindo SEM ir EDS analizės rezultatai..... | 50 |
| 40 pav. T-Ni-R dangos SEM ir EDS analizės rezultatai | 50 |
| 41 pav. T-Ni-R dangos elementinės sudėties tyrimas EDS metodu..... | 51 |
| 42 pav. T-Ni-R dangos paviršiaus XRD analizė..... | 52 |
| 43 pav. Elementinės sudėties pasiskirstymas pagrinde ir T-Ni-R dangoje (skersinis pjūvis). | 53 |

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

TIG – Suvirinimas nelydžiuoju volframo elektrodu inertinių apsauginių dujų aplinkoje (Tungsten Inertic Gas Welding);

GTAW – Suvirinimas nelydžiuoju volframo elektrodu inertinių apsauginių dujų aplinkoje (Gas Tungsten Arc Welding);

PTAW – Lankinis suvirinimas plazmos srautu (Plasma Transferred Arc Welding);

SAW – Suvirinimas po fluso sluoksniu (Submerged Arc Welding);

HVOF – Didelio greičio deguonies ir degių dujų technologija dangoms dengti (High Velocity Oxygen Fuel Spraying);

SEM – Skenuojanti elektroninė mikroskopija;

EDS – Rentgeno spindulių energijos dispersijos spektroskopija;

XRD – Rentgeno spinduliuotės difrakcinė analizė.

Įvadas

Abrazyvinis dilimas yra viena dažniausių įrankių dėvėjimosi priežasčių. Šio dilimo pasekmės ypač ryškios kelių tiesimo, kalnakasybos, naftos, statybos pramonės sektoriuose. Dylant detalei, keičiasi jos geometriniai matmenys, konstrukciniai parametrai, o tai ženkliai sutrumpina tarnavimo laikotarpį.

XX amžiuje Didžiosios Britanijos mokslininkai pabandė įvertinti kokius nuostolius pramonė patiria dėl dilimo procesų. Vėliau jų pavyzdžiu pasekė Kanada, Vokietija ir JAV. Amerikiečių atlikti tyrimai miškininkystės, žemės ūkio, kalnakasybos srityse parodė, kad per metus ši šalis patiria 748 milijonus dolerių nuostolį tik dėl abrazyvinio dilimo pasekmių.

Norint išvengti šių nepageidaujamų pasekmių, naudojami specialūs lydiniai, kurie nors ir didina atsparumą dilimui, tačiau kartu tuo pačiu didina ir galutinio produkto kainą. Siekiant išvengti gaminio kainos didėjimo, bet kartu pagerinti jo mechanines savybes yra ieškoma alternatyvių metodų problemai spręsti. Pastaruoju metu didelis dėmesys skiriamas dilimui atsparių dangų formavimui. Taip siekiama suteikti gaminiui geresnes savybes nekeičiant pačios gamybos kaštų.

Metalų paviršius galima sustiprinti termocheminiais, termomechaniniais būdais, taip pat aplydant ar apipurškiant medžiagomis, kurios pasižymi geresnėmis atsparumo abrazyviniam dilimui savybėmis. Dangų formavimo metodo pagrindas yra dilimui atsparių medžiagų sluoksnio „užnešimas“ ant medžiagos paviršiaus, kuri šių savybių neturi. Tokia technologija leidžia sukurti abrazyviniam dilimui atsparius gaminius nedidinant jų kainos.

Plačiausiai nagrinėjami metodai abrazyviniam dilimui atsparioms dangoms formuoti yra lankinis suvirinimas plazmos srautu (PTAW), suvirinimas lydžiuoju glaistytu elektrodu (MMA), suvirinimas nelydžiuoju volframo elektrodu inertinių apsauginių dujų aplinkoje (GTAW), didelio greičio deguonies ir degiųjų dujų technologija dangoms dengti (HVOF), suvirinimas po flusio sluoksniu (SAW). Tačiau šių procesų metu sudėtinga išvengti defektų dangoje ar jos jungtyje su pagrindu. Formuojant dangą gali atsirasti įtrūkiai, poros ir kitokio pobūdžio defektai. Visgi populiariausi praktikoje SAW, PTAW, rečiau taikomas GTAW būdas dilimui atsparios dangos ant norimo gaminio paviršiui formuoti.

Pastarasis metodas pasižymi tokiomis dideliu prilydomos medžiagos kiekio efektyvumu, lengvu pritaikomumu ir mobilumu, nėra brangus ir puikiomis galimybėmis dirbti su plačiu spektru medžiagų. Paprastai GTAW yra taikomas sujungti dvi metalo detales neišardoma jungtimi panaudojant koncentruotą šilumos įvestį. Esminis šio proceso reikalavimas yra nelydžių volframo elektrodą ir suvirinimo vonelę laikyti apsauginių dujų zonoje. GTAW technologija yra rečiau taikoma dangoms formuoti, nes nėra atlikta pakankamai tyrimų, kurių rezultatai pagrįstų šio metodo taikymą dangas.

Įvertinus, kad daugelis defektų atsiranda dėl skirtingo terminio plėtimosi koeficiento, kuris metalus sujungiant suvirinimu, iššaukia didelius vidinius įtempimus bei įvairių defektų atsiradimą, rekomenduojama kruopščiai parinkti proceso metu taikomus parametrus [1], užtikrinant paviršių sustiprinančių miltelių įvedimą į pagrindo paviršinį sluoksnį. Taip pat labai svarbu tinkamai paruošti dengiamo gaminio paviršių, siekiant jungties vietoje išvengti defektų, susidarančių dėl esamų nešvarumų.

Projekto tikslas – ištirti TIG metodo pritaikomumą dilimui atsparioms dangoms formuoti.

Uždaviniai:

1. Parinkti TIG suvirinimo proceso parametrus.
2. Parinkti tinkamą miltelių cheminę sudėtį dangos formavimui TIG metodu.
3. Atlikti TIG metodu suformuotos dangos mikrostruktūros ir kietumo tyrimus.
4. Nustatyti TIG metodu suformuotos dangos atsparumą abrazyviniam dilimui.
5. Atlikti TIG metodu suformuotos dangos XRD ir EDS analizę.
6. Palyginti TIG metodu suformuotą dangą su PTAW ir SAW metodais suformuotomis dangomis.

Tyrimo aktualumas

Metalų paviršinis sluoksnis dengiamas norint pakeisti jo mechanines, fizikines bei chemines savybes, suteikti didesnę atsparumą išorės veiksniams ar tiesiog pagerinti estetinį vaizdą.

Metalinių paviršių modifikavimas yra taikomas siekiant prailginti konkrečių mazgų ilgaamžiškumą ar tarnavimo laikotarpį. Paviršinės dangos formavimas yra viena iš technologijų leidžiančių padengti paprastų metalų paviršių specialias savybes turinčiomis dangomis, o tai ženkliai pagerina gaminio savybes.

Metalo gaminių nuostoliai ir defektai sukelti dėvėjimosi apdirbamoje pramonėje yra milžiniški. Norint to išvengti dalis mechanizmų yra padengiami specialiomis dangomis prieš pradėdant juos naudoti [2].

Dėvėjimasis yra vienas iš esminių punktų apsprendžiančių bet kurio komponento gyvavimo ciklą. Metalinės detalės praranda savo patvarumą ar patikimumą, ne todėl, kad fiziškai įskyta, bet dėl natūralaus dėvėjimosi proceso. Tai lemia matmenų ir funkcionalumo praradimą.

Egzistuoja skirtingi dėvėjimosi tipai. Dažniausiai sutinkami šie: abrazyvinis, smūginis abrazyvinis, kavitacinis, oksidacinis, erozinis, korozinis ir kt. Detalės dažniausiai veikia ne vienas, o keli dėvėjimosi tipai. Norint to išvengti yra kuriamos technologijos, įvedamos naujos medžiagos, kuriose susidarę nauji faziniai deriniai atsparūs dilimui. Yra ir kitas metodas, kuris leidžia esamas medžiagas patobulinti legiruojant jas specialiais elementais [3].

Šiuolaikinei pramonei yra labai svarbu, kad detalės tarnautų kuo ilgiau. Ieškoma būdų, kaip sustiprinti detalių atsparumą abrazyviniam ir smūginiam dilimui [4].

Esminiai įrenginio mazgai, pvz., traiškytuvai karjeruose, yra veikiami intensyvaus abrazyvinio dilimo. Norint išvengti brangaus ir dažno remonto bei prastovų, šie mazgai yra dengiami specialiomis dangomis, kurios užtikrina jų tarnavimo laiko padidėjimą. Šis metodas yra paklausus daugelyje pramonės šakų: kalnakasyje, metalo gavyboje, naftos gavyboje, elektrinėse, maisto ir kitose šakose. Šiomis dienomis ši technologija taikoma ir aviacijoje, ginkluotės gamyboje, netgi medicinoje [5].

Paviršiaus inžinerija yra vertinga ir aktuali tuo, kad tai puikus įrankis leidžiantis suprasti kaip visumą paviršiaus dangas ir pagrindines metalo savybes, kurios negali būti pasiektos taikant tik vieną metodą.[6]

Paviršiaus modifikavimas formuojant paviršines dangas yra taikomas pramonės šakose. Ši technologiją yra aktuali:

- detalių gamyboje;
- mechanikoje;
- transporte;
- gamyboje;
- optikos gamyboje;
- laisvalaikio industrijoje;
- kitose šakose.

Dažniausiai keliami reikalavimai formuojamoms dangoms yra:

- apsauga nuo korozijos;
- apsauga nuo dėvėjimosi;
- biosuderinamumas;

- aukšta adhezija;
- ilgaamžiškumas
- tvirtumas [7].

Visa tai galima pasiekti taikant paviršiaus dangų formavimo technologijas.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Technologijos formuojančios dangas aplydimu

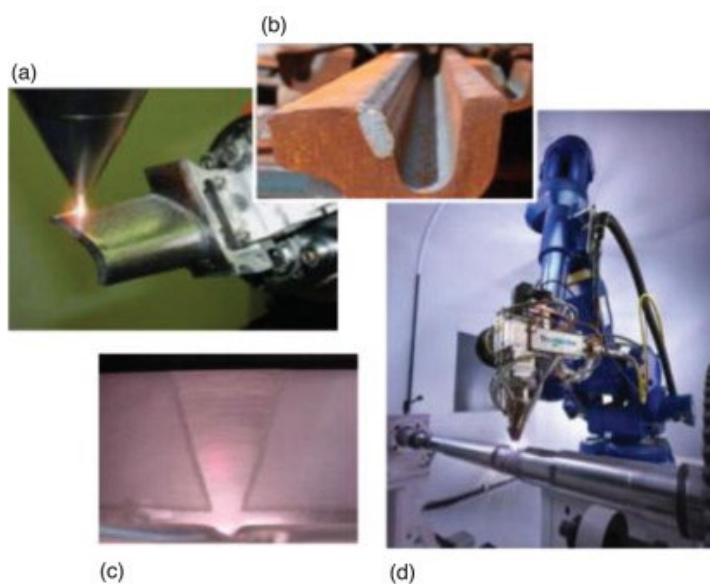
Paviršiaus inžinerija arba dangų inžinerija savyje talpina platų spektrą procesų ir metodų.

Vienais metodais galima formuoti dangas, kurių storis nuo 0,001 iki 1 mm. Šiame diapazone galima keisti cheminę sudėtį, savybes, nepaveikiant giliau esančių sluoksnio (pagrindo) savybių. Tai itin plonos dangos.

Kiti metodai leidžia formuoti dangas nuo 1 mm iki 20 mm storio. Šiuo atveju naudojamas apvirinimas ir kiti plakiravimo metodai. Tokios dangos naudojamos pramonės šakose kur būtinos storos ir tvirtos dangos [7, 6].

Dangos pagal paskirtį gali būti skirstomos į 4 stambias grupes:

- Dilimui atsparios dangos.
- Paviršiaus plakiravimas. Dažniausiai skirta mažangliam plienui apsaugoti nuo korozijos;
- Atstatymas. Tai išdilusių detalių remontui ir atstatymui iki gamintojo numatytų matmenų;
- Skirtingų metalų sujungimas. Skirta tarpusavyje nesuvirinamiems metalams sujungti.



1 pav. Tipiniai dangų panaudojimo pavyzdžiai [6]: a) detalės atstatymas; b) dilimui atsparios dangos užnešimas; c) skirtingų medžiagų sujungimas; d) paviršiaus padengimas korozijai ir dėvėjimuisi atsparia danga

Dangos formavimas taikant suvirinimo procesus, remiasi pridėtinės medžiagos (dažniausia pridėtinio metalo) pernešimu ant pagrindo, kad būtų gautos norimos savybės.

Tačiau procesų pasirinkimas yra platus ir kiekvienas turi savų privalumų lyginant su kitais. Dažniausiai yra naudojami šie:

- GTAW (TIG);
- PAW;
- PTA;
- SAW;

- MMA;
- Ir keletas kitų [6].

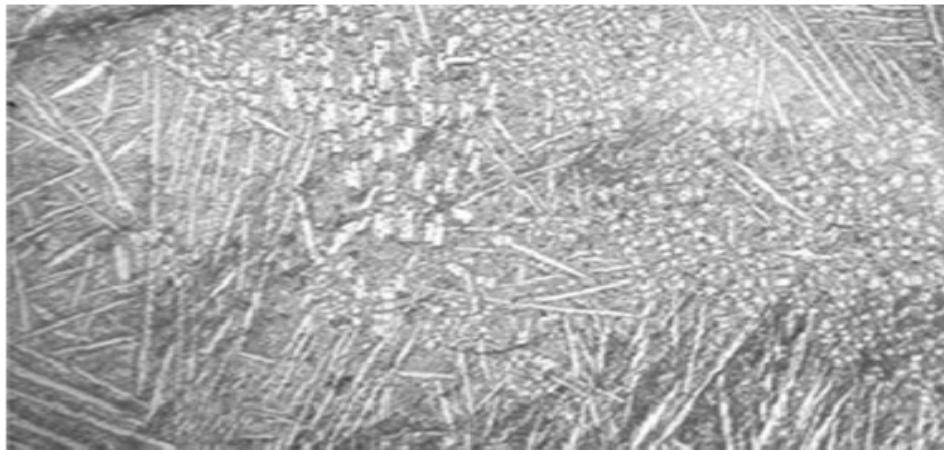
Pagrindinis veikimo principas – elektros lanko išlydis lydo pagrindo paviršių ir pridėtinę medžiagą, o šį procesą nuo aplinkos poveikio dažniausiai saugo apsauginės dujos.

1.1.1. MMAW metodo taikymas

Norint gauti tinkamą kietmetalio dangą, reikia labai tiksliai parinkti suvirinimo parametrus, siekiant išvengti nepageidaujamų įtrūkimų ir jungties vietos susilpnėjimo [8]. Optimalių parametru dangos formavimo procesui parinkimas šiuo metodu yra labai sudėtingas. Dažniausia remiamasi operatorių patirtimi ir standartų nuorodomis.

Tyrime buvo panaudotas ZUPER 400I 3 fazių IGBT inverterinio tipo suvirinimo šaltinis. Naudojama pridėtinė medžiaga – 4 mm diametro elektrodas padengtas nano- kompozitu (NanoCarb 110). Elektrodas buvo veikiamas tiesioginio poliškumo srove [8].

Gauta struktūra pavaizduota 2 paveiksle.



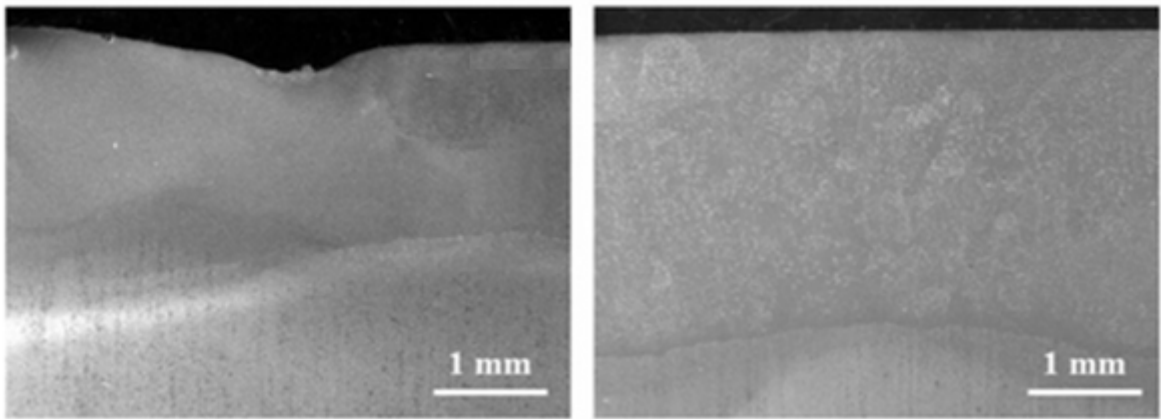
2 pav. Dangos, suformuotos aplydant nano medžiaga dengtu elektrodu, mikrostrukūra [8]

Siekiant sumažinti deformacijos laipsnį, buvo formuojamas ne storesnis nei 3 mm dangos storis[8].

1.1.2. PTA metodo taikymas

Kitas populiarus dangų formavimo procesas yra PTA. Šis metodas naudojamas formuoti kietus darbinus įrankių plieno paviršius. Dengiant didelio anglingumo plienus ir norint išvengti trūkimų, pagrindą būtina pakaitinti prieš „užnešant“ atsparią dilimui dangą.

Plazmos lankas veikia aukšta temperatūra taip suformuodamas metalurginį ryšį. Šiuo metodu galima lengvai formuoti storas dangas iš medžiagų, kurių lydymosi temperatūra yra labai aukšta. Tačiau dėl įtrūkimų atsiradimo galimybės, pačios dangos kokybė yra sunkiau valdoma, ypač jei pridėtinė medžiaga turi keramikos dalelių. Bendruoju atveju dangos kokybė priklauso nuo pasirinktų legiravimo elementų ir pernešimo metodo [9].



3 pav. Dangos suformuotos PTA metodu [9]

Kaip minėta anksčiau, proceso parametrai kiekvienam atvejui yra individualūs ir parenkami eksperimentiniu metodu.

Nepaisant to, kad PTA metodu formuotos dangos yra ilgalaikės ir atsparios dilimui, tačiau šis metodas neužtikrina be-defektinės dangos gavimo. Tai susiję su dideliais temperatūriniais įtempiais, kuriuos dangos skystas metalas patiria pradėdamas aušti ir kristalizuotis. Vienas iš būdų sumažinti įtrūkimų kiekį yra pakeisti naudojamas medžiagas į naujas, kurios neleisėtų tokiems defektams susiformuoti.

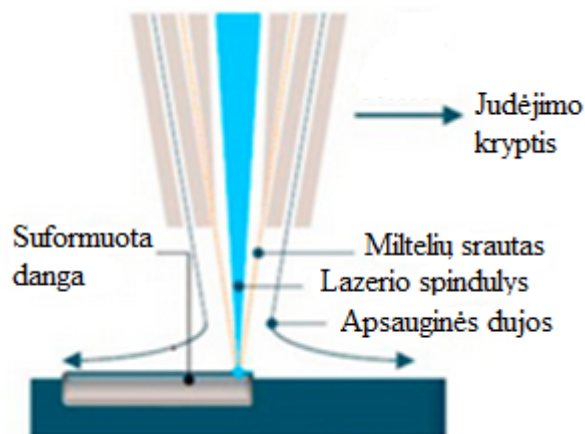
1.1.3. Plakiravimas lazeriu

Dangų formavimas lazeriu daugelį šių problemų išsprendžia. Tai greitas ir efektyvus metodas paviršių modifikavimui [10].

Šiuo metodu dangos dažniausiai formuojamos iš miltelių ir defektai pasitaikantys PTA technologijoje čia sutinkami rečiau [11].

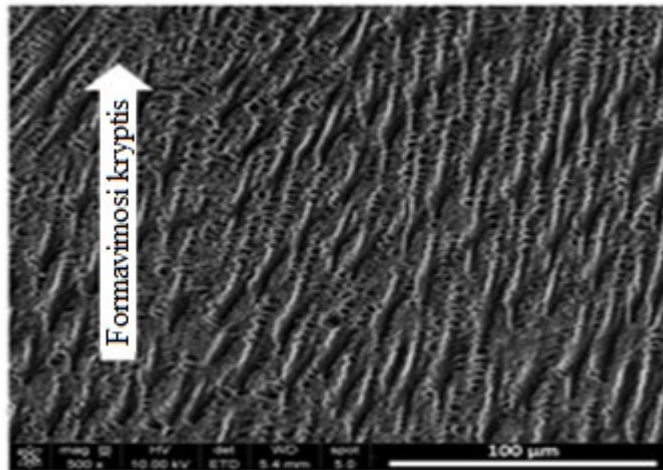
Tačiau priklausomai nuo formuojamos dangos sudedamųjų medžiagų, įtrūkimai galimi ir šiuo atveju.

Dangos formavimo lazeriu principinė schema parodyta 4 paveiksle.



4 pav. Dangos formavimas iš miltelių lazeriu [12]

Lazeriu suformuotos dangos pavyzdys (Stellite 21) 5 paveiksle.



5 pav. Dangas suformuota lazeriu [12]

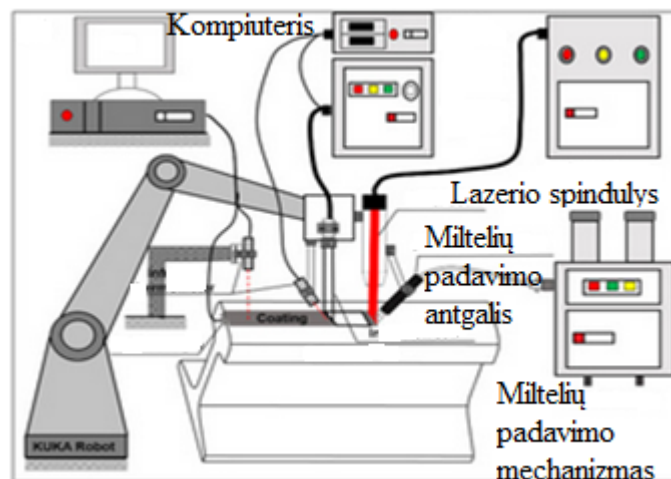
Ši technologija gali būti taikoma ir susidėvėjusių detalių atstatymui iki gamyklinių parametrų.

Vienas didžiausių šios technologijos privalumų yra jos energetinis tankis, mažas terminis poveikis aplinkiniam metalui (terminio poveikio zona), mažas deformavimo lygis, aukštas adhezijos lygis [12].

Tačiau dengiant dangas ant metalų, kurie turi didesnę anglies kiekį, TPZ linkusi formuoti martensitinę struktūrą.

Norint to išvengti, metalą reikia pakaitinti iki tam tikro temperatūros ir tik tada formuoti dangas. Tas itin aktualu jei dangos formuojamos ant geležinkelio bėgių [13].

Tam išvengti suformuotas indukcinis pašildymo metodas. Ši technologija pranašesnė lyginant su senąja tuo, kad metalo pernešimo kiekis padidėjo, bet ir sulėtintas skystos vonelės aušimo greitis, kas leidžia išvengti martensitinės struktūros formavimosi bei įtrūkimų atsiradimo [14].



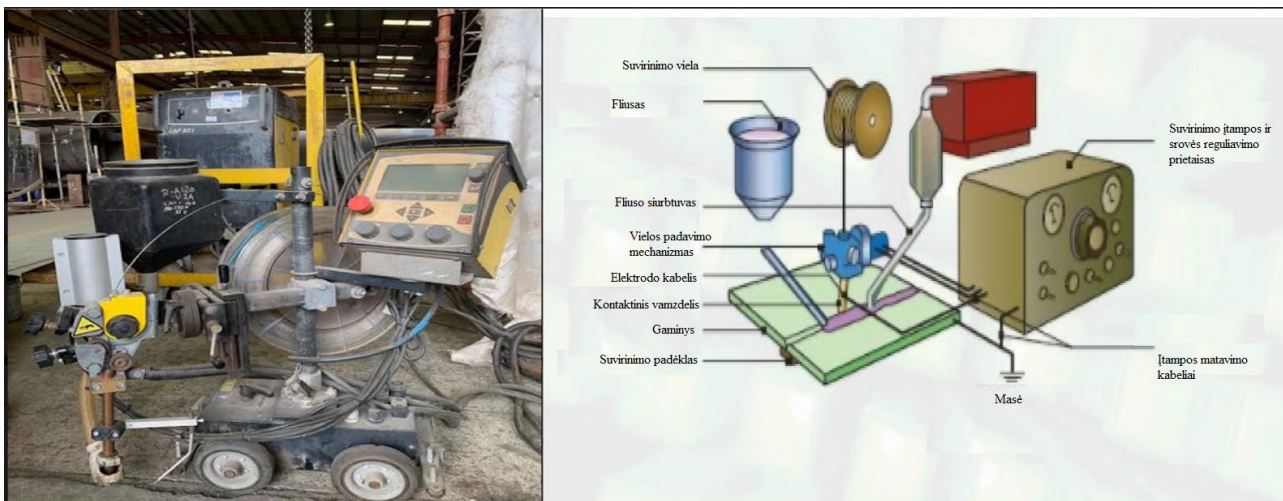
6 pav. Lazerinis dangos formavimas su indukciniu pakaitinimu [14]

Norint visiškai valdyti formuojamos dangos mikrostruktūrą, šis metodas taikomas prieš pradėdant dengimą ir po dengimo. Tai įgalina užtikrinti maksimalią įmanoma dangos kokybę [14].

1.1.4. SAW metodo taikymas

Storoms dangoms formuoti naudojamas SAW metodas. Tai našus ir efektyvus būdas dangų užnešimui ant didelių plotų.

Šiuo metodu elektros lankas yra panaudojamas išlydi ir sujungti metalo paviršiams su pridėtinu metalu – viela. Šiuo atveju apsauginių dujų vietoje yra naudojamas apsauginis flusas, kuris kartu saugo ir nuo kenksmingos elektrolanko spinduliuotės.



7 pav. SAW technika ir veikimo principas [15]

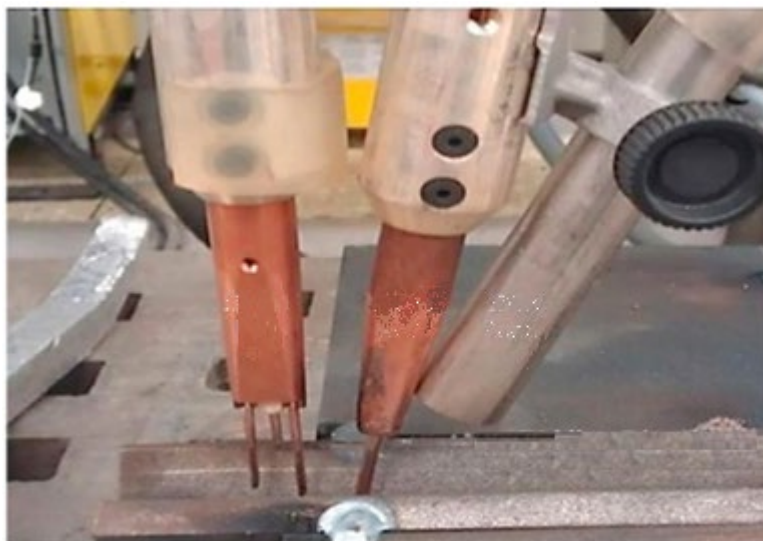
Svarbiausi parametrai, kurie turi įtakos proceso kokybei, yra:

- Suvirinimo srovės dydis. Didesnė suvirinimo srovė sąlygoja gilesnį įvirinimą ir susilydimą;
- Suvirinimo įtampa. Šiuo atveju svarbūs yra ne tik suvirinimo proceso įtampa, bet ir atviros grandinės įtampa. Tai sąlygoja įvirinamumo gylį ir siūlės formą;
- Suvirinimo vielos iškyša. Šis parametras tiesiogiai daro įtaką suvirino srovės kitimui.
- Suvirinimo greitis. Šis parametru galima keisti įvirinimo gylį ir siūlės formą [15].

Holub ir Dunovsky nagrinėjo kokį efektą duoda daugiasluoksnėms apvirinimo dangoms skirtingos panaudotos suvirinimo vielos [16].

Vertinant tai, kad SAW turi aukštą šilumos įvedimo koeficientą, galima naudoti daugiau nei vieną pridėtinio metalo vielą. Tai sudaro galimybes suvirinimo sluoksnių sumažinimui ir medžiagos prilydymo kiekio padidinimui.

Tačiau, dėl didelės šilumos įvesties, sudaro sąlygas susiformuoti didelei suvirinimo voneli, kurioje skystas metalas labai lėtai aušta. Tai suformuoja storas auštančias struktūras, kurios aušimo pabaigoje nepasižymi geromis mechaninėmis savybėmis ir turi stambiagrūdę struktūrą. Tai gali būti priežastis nuovargio įtrūkimų atsiradimui. [17]



8 pav. Kelių vielų panaudojimas dangoms formuoti [17]

Visi šie metodai turi savų privalumų. SAW technologija yra naši ir efektyvi, bet tinkama tik tam tikros formos gaminiams. Lazerio technologija labai tiksli, bet gali būti naudojama tik konkrečioje vietoje ir tik tam tikromis sąlygomis. Jos mobilumo trūkumas ir finansinis brangumas daro ją nelanksčia. MMAW metodas lankstus, tačiau dėl didelių deformacijų ir sudėtingo dengiamojo sluoksnio valdymo negali būti visur pritaikomas.

1.2. TIG metodo pritaikymo galimybės dangų formavime

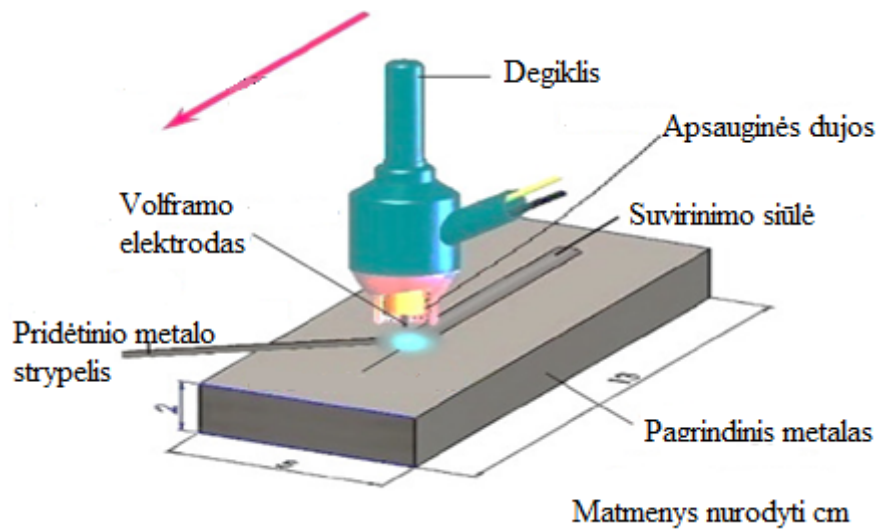
Šiomis dienomis dangų formavimui naudojama keletas metodų, kaip termo-apipurškimas, plakiravimas lazeriu ir elektrolankinis apvirinimas.

Elektrolankinio apvirinimo grupėje pats populiariausias metodas formuoti dilimui atsparioms dangoms yra GTAW būdas [18]

Šio metodo privalumai yra:

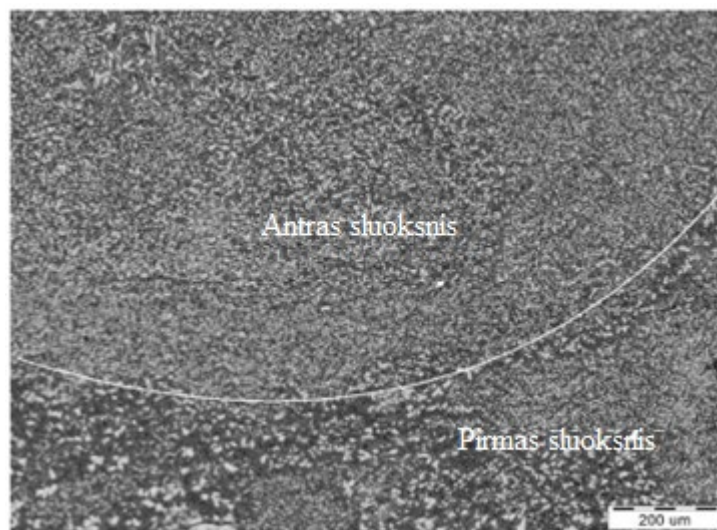
- Didelis prilydomo metalo kiekis;
- Dangų formavimas su metalurginių ryšiu;
- Didelis pritaikomumas,
- Technologinis tinkamumas;
- Pigumas
- Tinkamumas naudoti su įvairiomis medžiagomis [19]

Principinė GTAW technologijos schema parodyta 9 paveiksle.

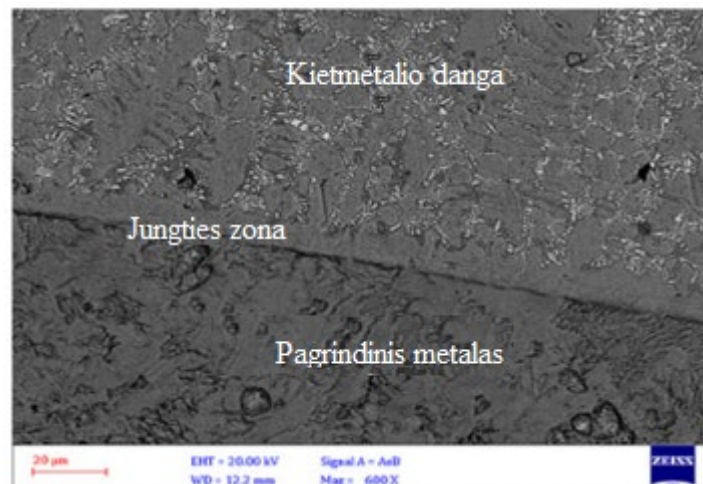


9 pav. Principinė GTAW veikimo schema [18]

Formuojant dangas keliais sluoksniais, dangos mikrostruktūra skiriasi sluoksnių ribose. Pavyzdys parodytas 10 paveiksle.



10 pav. GTAW metodu suformuotos daugiasluoksnės dangos mikrostruktūra [18]



11 pav. Dilimui atsparios dangos ir pagrindo adhezija [18]

Dangos kokybiškumas ir adhezija su pagrindu matoma 11 paveiksle. Ypatingai ryški dangos ir pagrindo ribos linija.

Dangų formavimas iš miltelinių medžiagų suteikia procesui daugiau lankstumo siekiant norimos struktūros sluoksnio. Tai įgalina pasiekti reikiamų miltelių pasirinkimo galimybę bei jų maišymo tarpusavyje galimybės [20].

GTAW metodo taikymas formuojant dilimui atsparias dangas iš miltelinių medžiagų turi šiuos privalumus lyginant su kitais procesais:

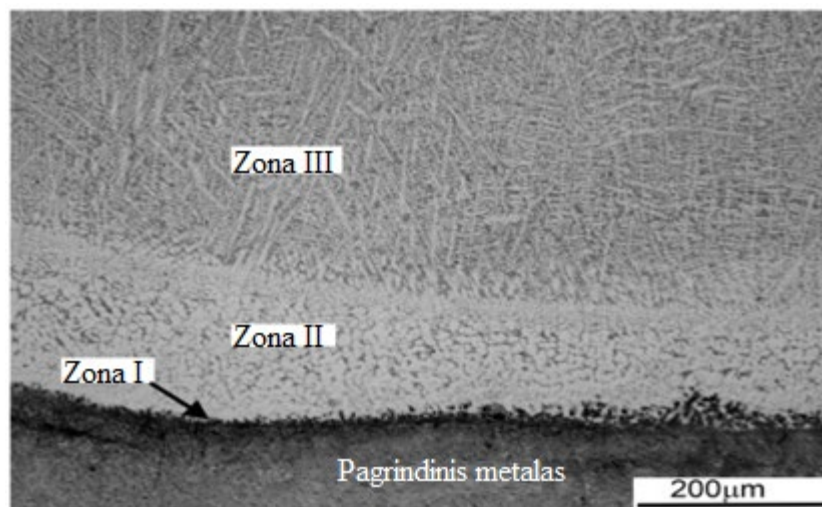
- Grynos dangos formavimas. Danga suformuojama tik iš elementų, kurie buvo parinkti. Apauginės dujos apsaugo nuo atmosferos poveikio.
- Mažas persimaišymo laipsnis su pagrindo paviršiumi [21].

S. Buytoz tyrė kokį poveikį dangos struktūrai daro šilumos įvedimo kiekis taikant GTAW metodą.

Milteliai ant pagrindo nėra pilami laisvąja forma ar kitokiu būdu tiekiami (kaip PTA ar lazerio plakiravimo atveju). Dažniausiai milteliai sumaišomi su rišikliu ir suformuojama pasta arba mechaniškai supresuojami į plokšteles [20].

Norint išlydyti taip paruoštą miltelinę medžiagą, reikalinga bent 120 – 200 A suvirinimo srovė.

Gaunamos tokio tipo struktūros kaip parodyta 12 paveiksle.



12 pav. GTAW metodu suformuotos dangos iš miltelių struktūra [20]

Apibendrinant šis metodas iš ekonominės pusės yra pats pigiausias ir efektyviausias. Tačiau kaip ir kiekviena technologija turi savo trūkumų. Vienas iš paminėtų yra suvirinimo zonos metalo elementų koncentracijos sumažėjimas. Formuojant dilimui atsparias dangas reikia atidžiai pasirinkti suvirinimo parametrus, kad šilumos įvedimo kiekis į pagrindą būtų minimalus, o pagrindo paviršiaus tankio sumažėjimas kiek įmanoma mažesnis. Tačiau be šio efekto neįmanoma pasiekti gero metalurginio ryšio. Kuo mažesnis šis poveikis, tuo dangos struktūra tankesnė ir turinti tankesnę dendritinę mikrostruktūrą [22].

1.2.1. TIG (GTAW) metodo taikymas

Norint formuoti lengviau valdomos struktūros dangas, yra bandoma pritaikyti TIG metodą.

Šis metodas vis dažniau taikomas dilimui atsparioms dangoms formuoti dėl proceso valdymo galimybių, o ypač suvirinimo vonelės kontrolės.

Dilimas yra vienas iš labiausiai nepageidaujamų veiksnių, kurių dangų inžinerija siekia minimizuoti. Atsparumas dilimui – tai rezultatas tinkamai pasirinkto derinio tarp tvirtumo ir kietumo [23].

Formuojant paviršines dangas, dažniausiai dangos milteliai ir plonas pagrindo sluoksnis yra išlydomi vienu metu ir po truputi aušdami kristalizuojasi bei suformuoja gero sukibimo dangas su reikiamomis savybėmis.

Norint visapusiškai valdyto procesą pirmiausia bandyta GTAW procesui pritaikyti automatinį pridėtinio metalo tiekimą į suvirinimo vonelę. Atsirado linijinis ryšys tarp elektros lanko energijos ir vielos padavimo greičio.[24]

D.B. Zhao padarė prielaidą, kad pulsuojanči suvirinimo srovė ir automatinis vielos padavimas reikalauja tiksliai nustatyti ir stebėti pulsacijos dažnį.

2018 metais atrasta technika, kuri leido osciliuoti paduodamą vielą [25].



13 pav. Vielos padavimas į suvirinimo vonelę [25]

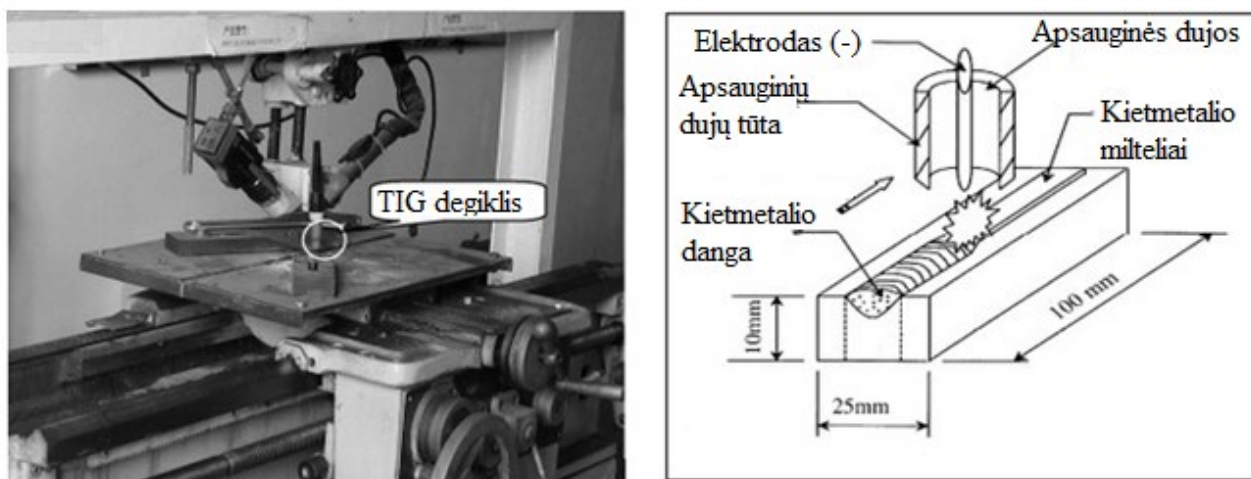
Tačiau šie metodai neužtikrina dangos grynumo, kadangi kartu į formuojamą paviršinę struktūrą yra įnešamas kitos rūšies pridėtinis metalas. Tai išsprendžia miltelių panaudojimas. Tačiau jų dozavimas į būsimos dangos vietą yra problematiškas.

Tačiau gauti rezultatai parodė, kad ant paprasto mažanglio plieno suformuota danga yra labai gerų parametrų. Jos dilimo greitis prie mažų slydimo greičių buvo minimalus.

S. Buytoz nagrinėjo GTAW suvirinimo parametrų įtaką (formuojamos dangos iš SiC) mikrostruktūrai [26].

Taikant šį metodą paviršių paruošimas dangos dengimui yra kaip ir PTA ar SAW. Tikslas yra nuvalyti nuo nešvarumų ir paviršinių oksidų.

Tam, kad būtų suformuota vienalytė danga, naudojami milteliai turi būti homogeninės frakcijos. Tuo tikslu naudojami specialūs malūnai [24].



14 pav. Dangos formavimas su GTAW ir supresuotais milteliais [26]

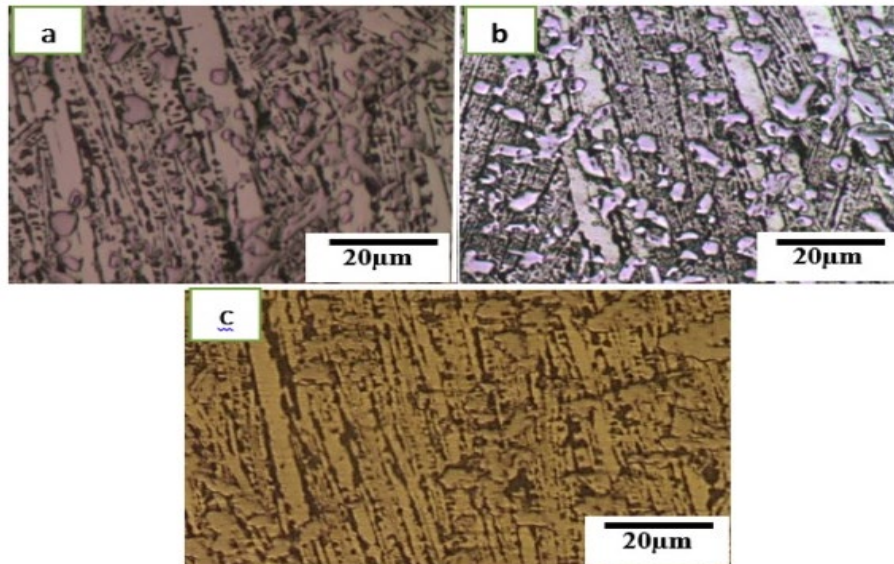
Gauti milteliai supresuojami į plytelės formas ir priklijuojami prie dengiamo paviršiaus. Plytelės storis apie 2 mm. Naudojama srovė yra 200 A. Tada plytelės, naudojant GTAW metodą, yra sulydomos su pagrindo paviršiumi [24].

Naudojami parametrai šiam procesui:

1 lentelė. Parametrai supresuotų miltelių perlydimui GTAW metodu [24]

| Procesas | GTAW (TIG) |
|---------------------|-------------|
| Dujos | Ar |
| Dujų debitas | 10 l/min |
| Elektrodas | WT20 |
| Elektrodo diametras | 2,4 |
| Įtampa (V) | 18 |
| Srovė (A) | 200 |
| Suvirinimo greitis | 4 cm/ min |

Tai leidžia suformuoti kietmetalių dangas, kurių pavyzdžiai parodyti 15 paveiksle.



15 pav. GTAW metodu suformuotos dangos pavyzdžiai [24]:

a) FTC b) FTCV3 c) FTCV5

Taikant šį metodą aušimo greitis yra labai didelis. Kristalizavimosi sąlygos yra kiek nutolusios nuo pusiausvyros sąlygų, bet fazių diagramų taikymas gali būti naudingas renkantis parametrus [24].

1.3. TIG suvirinimo proceso parametru pasirinkimas

Šilumos įvesties padidinimas leidžia suformuoti reikalingos formos suvirinimo siūlę, gilesnę suvirinimo vonelę, taip pat leidžia išvengti trūkių paviršiniame sluoksnyje bei jungiamojo sluoksnio dalyje [27].

Suvirinimo srovė tiesiogiai veikia šilumos įvesties dydį į suvirinamą detalę. Taip pat svarbus faktorius yra suvirinamos medžiagos markė, jos storis, suvirinimo greitis [28].

Šilumos įvesties dydis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\text{Šilumos įvestis} = \frac{0,48 \times \text{srovė} \times \text{įtampa}}{\text{suvirinimo greitis}} \quad [29]$$

Naudojant nuolatinę suvirinimo srovę ir elektrodą prijungiant prie neigiamo poliaus gaunamas lengvai valdomas įvirinimo gylis ir siaura suvirinimo siūlė.

Taikant Džiaulio dėsnį, šilumos įvesties dydis yra tiesiogiai proporcingas suvirinimo srovės dydžiui, medžiagos varžai ir laikui. Tai išreiškiama tokia formule:

$$H = I^2 \times R \times t;$$

Čia H – šilumos įvestis, I – suvirinimo srovė, R – varža, t – laikas [30].

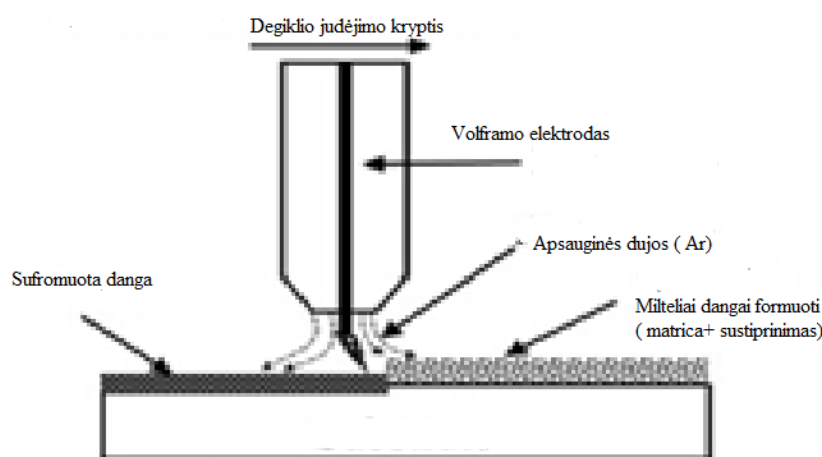
Suvirinimo srovės dydį lemia volframo elektrodo skersmens dydis, apsauginių dujų rūšis ir suvirinimo poliškumas.

Naudojant 40A suvirinimo srovę jungtyje tam tikrose vietose gali atsirasti poros. Taikant 100A suvirinimo srovę galimas paviršinių įtrūkimų atsiradimas [31].

2 lentelė. TIG suvirinimo parametrų įtaka šilumos dydžiui

| Naudojama srovė, A | Įtampa, V | Fiksuojamą temperatūrą, C |
|--------------------|-----------|---------------------------|
| 40 | 9,5 | 900 |
| 60 | 11 | 960 |
| 80 | 12 | 1060 |
| 100 | 12 | 1200 |

Principinė TIG metodo taikymo dilimui atsparioms dangoms formuoti schema pateikta 16 paveiksle.



16 pav. TIG metodo dangoms formuoti principinė schema [32]

Pastebimas aukštos srovės neigiamas poveikis volframo elektrodo eksploatacijai. Jei suvirinimo srovė netinkamai didinama neatsižvelgiant į volframo elektrodo skersmenį – didėja elektrodo galiuko paviršiaus išdegimas ir prarandamas lanko stabilumas. Tokį patį efektą turi ir nepertraukiamas suvirinimas. Kuo šis laiko tarpas didesnis, tuo labiau išdega volframo elektrodo galiuko paviršius. Tai gali būti rimta kliūtis toliau tęsti suvirinimo procesą [33].

Haidaras savo darbuose teigia, kad volframo elektrodo formos pokytis tiesiogiai priklauso nuo galiuko įkaitimo temperatūros, kurią lemia elektros lanko plazma ir varžinė šiluma volframo elektrode [34].

Elektros lanko ilgis (dar vadinamas elektros lanko tarpeliu) yra atstumas tarp volframo elektrodo galiuko iki virinamos medžiagos paviršiaus. Šiam parametru turi įtakos suvirinimo srovė, elektros lanko stabilumas ir detalės forma. Suvirinimo tarpelis pagal gamintojų rekomendacijas elektros lankui yra taikomas 2,5 mm [28].

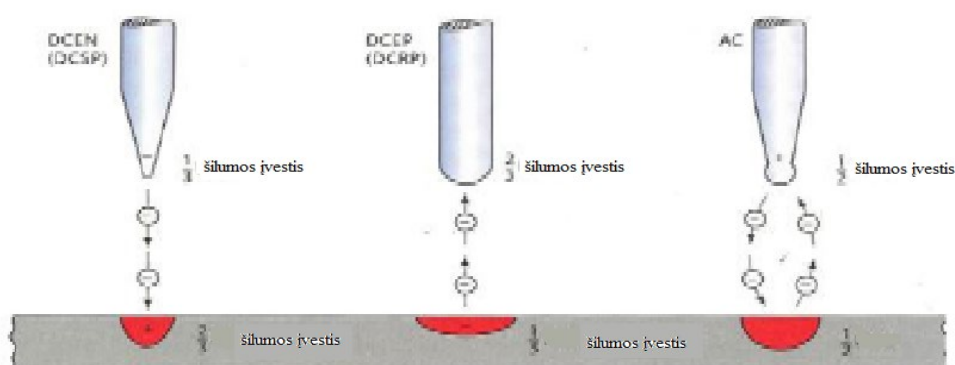
1.3.1. Suvirinimo poliškumas

Taikant TIG metodą galimi trys suvirinimo poliškumo variantai – naudojant nuolatinę srovę ir neigiamą elektrodą (DCEN), nuolatinę srovę ir tiesioginį poliškumą (DCEP) bei kintamąją srovę

(AC). Naudojant nuolatinės srovės suvirinimo metodą taikomas DCEN poliškumas. Šiuo atveju volframo elektrodas gauna 30 % įvedamos šilumos kiekio, o likusieji 70 % nukreipiami į suvirinamą medžiagą. Rezultatas yra siaura ir gilaus įvirinimo siūlė dėl didelio šilumos įvesties kiekio į pagrindinį suvirinimo metalą [30].

Taikant DCEP gaunama negilaus įvirinimo ir plati suvirinimo siūlė. Didžioji dalis šilumos tenka volframo elektrodai, tai sąlygoja greitesnį jo sudegimą. Šis būdas dažniausiai taikomas lengvoms medžiagoms (Al ir Mg) naudojant mažas sroves [28].

AC poliškumas taikomas tik Al ir Mg lydinių suvirinimui. Šiuolaikiniuose suvirinimo šaltiniuose yra galimybė reguliuoti šilumos kiekio proporcijas elektrodo ir suvirinamos medžiagos atžvilgiu.



17 pav. TIG poliškumo įtaka suvirinimo vonelės formai [28]

1.3.2. Suvirinimo įtampa

Tai potencialų skirtumas tarp volframo elektrodo ir suvirinamos medžiagos paviršiaus. Šis parametras gali būti pastovus arba reguliuojamas priklausomai nuo suvirinimo šaltinio.

Suvirinimo įtampai didėjant elektros lanko ilgis didėja, t.y. elektros lanko šerdis plėtėja, ir atvirkščiai.

Tačiau įvirinimo gylis mažėja didėjant suvirinimo įtampai. Naudojant rankinį suvirinimą nelydžiuoju elektrodu apsauginių dujų aplinkoje (GTAW) yra sudėtinga išlaikyti nekintančią suvirinimo įtampą dėl elektros lanko tarpelio svyravimų. Suvirinimo įtampa turi atvirkštinį efektą pernešamam išlydyto metalo kiekiui. Didėjant įtampai šis parametras mažėja [35].

1.4. Volframo elektrodai

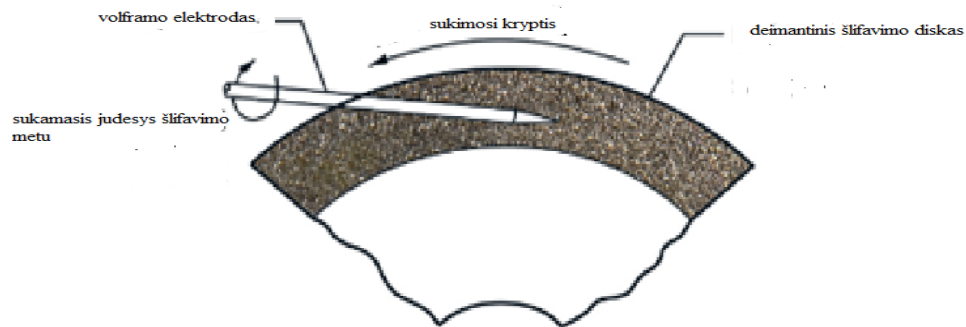
Teisingas volframo elektrodo paruošimas bei rūšies pasirinkimas turi įtakos suvirinimo kokybei [36].

Išmatavus skirtingų volframo elektrodų temperatūrą iškart ties kūgio pabaiga, nustatyta, kad $\text{La}_2\text{O}_3\text{-W}$ turėjo mažiausią temperatūrą ir formos pokytį; $\text{ZrO}_2\text{-W}$ elektrodas elgėsi atvirkščiai. Nepaisant šio fakto, daugelis rekomenduoja naudoti būtent šį elektrodą virinant nuolatine srove.

Pasirenkant tinkamą elektrodo paruošimo kampą, būtina įvertinti visą eilę veiksnių:

- Elektrodo tarnavimo laikas;
- Elektros lanko uždegimas;
- Įvirinimo gylis;
- Elektros lanko plotis [36].

Volframo elektrodai paruošiami suvirinimui laikantis griežtų reikalavimų. Visų pirma jie gali būti šlifuojami tik išilgai elektrodo strypelio. Šlifavimui rekomenduojama naudoti deimantinius šlifavimo akmenis, kad gautas paviršius būtų kuo glotnesnis.



18 pav. Volframo elektrodo principinė paruošimo schema [36]

Kokiu kampu elektrodas bus nušlifuotas lemia norimas pasiekti įvirinimo gylis ir elektros lanko forma.

Volframo elektrodai nušlifuoti buku kampu turi šias savybes:

- Ilgesnis tarnavimo laikas;
- Galima naudoti didesnes suvirinimo sroves;
- Leidžia pasiekti didesnę įvirinimo gylį;
- Siauresnį elektros lanką.

Elektrodai nušlifuoti smailiu kampu pasižymi šiomis savybėmis:

- Trumpu tarnavimo laiku;
- Plačiu elektros lanku;
- Didesniu elektros lanko tankiu [36].

Volframo elektrodų šlifavimo kampai ir suvirinimo srovės nurodytos 2 lentelėje.

3 lentelė. Volframo elektrodo geometriniai parametrai, rekomenduojami paruošimo kampai ir taikytinos srovės

| Elektrodo skersmuo | Elektrodo galiuko skersmuo | Kampas | DCEN suvirinimo srovė, A |
|--------------------|----------------------------|--------|--------------------------|
| 1,00 mm | 0,125 mm | 12 | nuo 2 iki 15 |
| 1,00 mm | 0,25 mm | 20 | nuo 5 iki 30 |
| 1,6 mm | 0,5 mm | 25 | nuo 8 iki 50 |
| 1,6 mm | 0,8 mm | 30 | nuo 10 iki 70 |
| 2,4 mm | 0,8 mm | 35 | nuo 12 iki 90 |
| 2,4 mm | 1,1 mm | 45 | nuo 15 iki 150 |
| 3,2 mm | 1,1 mm | 60 | nuo 20 iki 200 |
| 3,2 mm | 1,5 mm | 90 | nuo 25 iki 250 |

Norint įsitikint, kad volframo elektrodas yra paruoštas tinkamai, rekomenduojama jį išbandyti būsimo darbo sąlygomis.

Naudojant plonesnio skersmens elektrodą lengviau uždegti elektros lanką. Tokių elektrodų trūkumas yra greitas dėvėjimasis lyginant su storesnio diametro elektrodais. Priežastis – volframo elektrodo galiuko paviršiaus išdegimas, o tai sąlygoja elektros lanko nestabilumą. Tokį patį poveikį turi ir netinkamo skersmens elektrodo parinkimas taikomai suvirinimo srovei [36].

1.5. Apsauginės dujos

Svarbus vaidmuo tenka ir apsauginėms dujoms, kurios naudojamos suvirinimo metu [37]. Taikant GTAW metodą apsaugai naudojamos tik inertinės dujos, rečiau inertinių dujų ir aktyvių dujų mišiniai (Ar + H).

Apsauginių dujų tipas tiesiogiai daro poveikį elektros lanko savybėms. GTAW metodui naudojamos apsauginės dujos pasižymi šiais bendrais bruožais:

- Užtikrina elektros lanko efektyvumą;
- Užtikrina lydymosi efektyvumą.

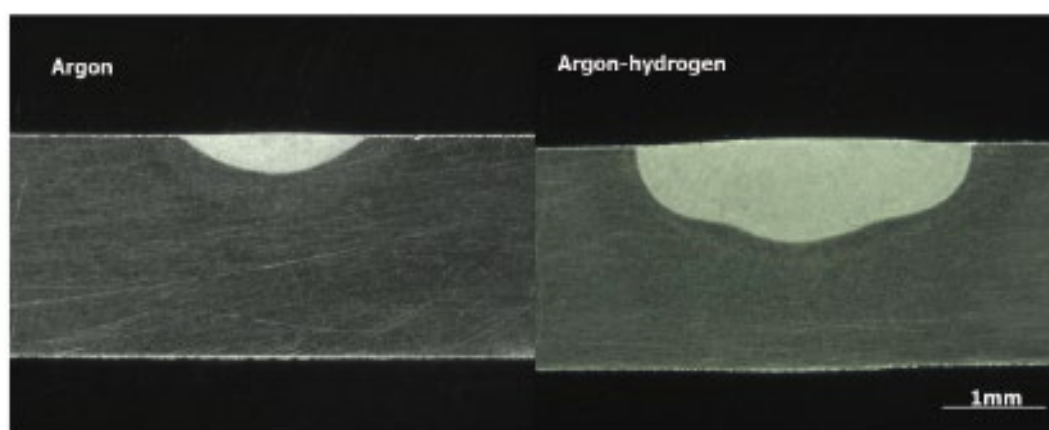
Priklausomai nuo apsauginių dujų srauto ir sudėties anksčiau paminėtus parametrus galima koreguoti. Pagrindinis apsauginių dujų tikslas lieka nepakitęs – apsaugoti skysto metalo vonelę nuo išorinių atmosferos veiksnių [37].

Į apsauginių dujų sudėtį įmaišius H₂, He, N₂, O₂ galima keisti terminį laidumą, elektros laidumą, jonizavimo energiją, o tai tiesiogiai veikia elektros lanko išlydį ir lydymosi efektyvumą [37]. Tai pasiekama nekeičiant pagrindinių suvirinimo parametrų – suvirinimo srovės dydžio, suvirinimo greičio, volframo elektrodo skersmens.

| Dujų debitas L/min | Argonas | | Argonas + Vandeniis | |
|--------------------|-----------------|--------------------------|---------------------|--------------------------|
| | Nuolatinė srovė | Nuolatinė srovė + pulsas | Nuolatinė srovė | Nuolatinė srovė + pulsas |
| 10 | | | | |
| 15 | | | | |
| 20 | | | | |
| 25 | | | | |

19 pav. Argono ir Ar-He įtaka suvirinimo siūlei virinant TIG metodu [37]

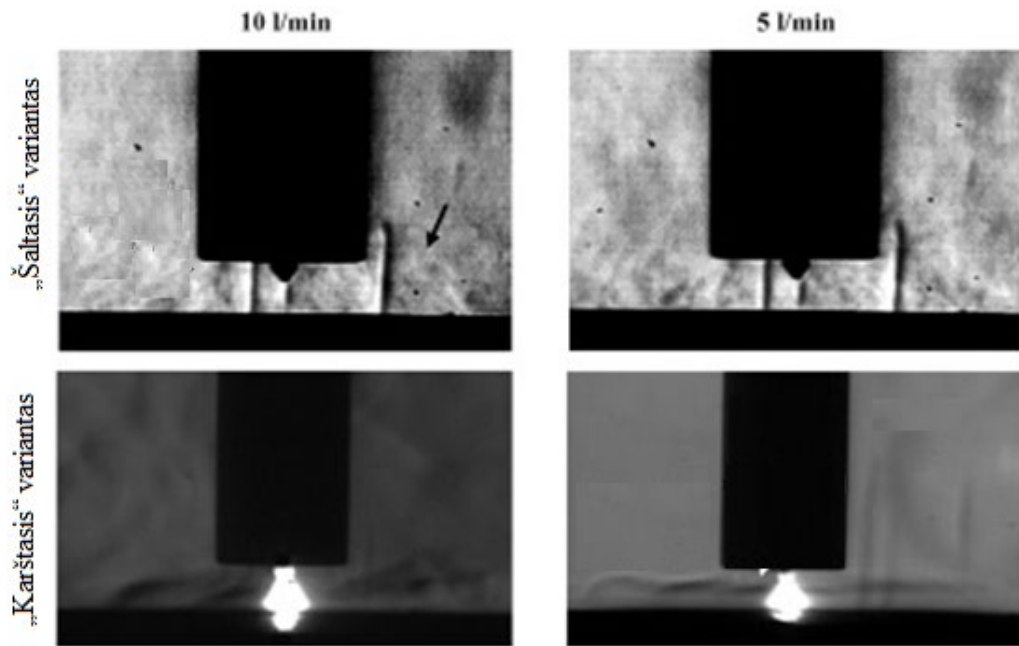
Įvirinimo gylis su Ar-He mišiniu yra beveik 3 kartus didesnis nei naudojant tik Ar dujas. Argono dujų apsauginėje aplinkoje įvirinimo gylis siekia 0.604 mm, o Ar-He – 1,574 mm. Suvirinimo siūlės plotis 2 kartus didesnis naudojant Ar-He dujas nei gryną Ar [37].



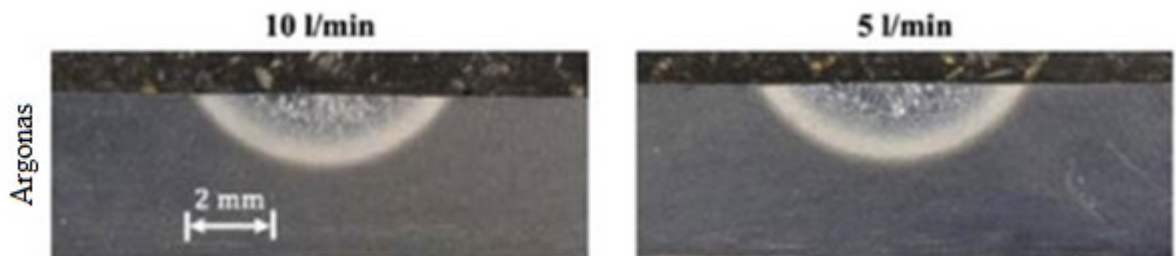
20 pav. Argono ir Ar – He apsauginių dujų aplinkoje gautos siūlės [37]

Didėjant apsauginių dujų srautui įvirinimo gylis ir siūlės plotis mažėja. Kitimo žingsnis yra 0,1 mm apsauginių dujų debitui kintant 5 litrais/min. Šis pokytis siūlės parametrams esminės įtakos neturi. [37]. Tačiau formuojant dilimui atsparias dangas į jį reikia atsižvelgti.

Apsauginių dujų debitas, šiuo atveju argono, keičia apsauginės zonos virš suvirinimo vonelės formą. Tai priklauso ir nuo naudojamos suvirinimo srovės stiprumo, bet šiam parametru lemiamą įtaką turi apsauginių dujų debitas [38].



21 pav. Argono dujų apsauginės zonos forma priklausomai nuo dujų debito (šaltasis ir karštasis variantai) [38]



22 pav. Argono debito įtaka suvirinimo siūlės pločiui ir gyliui [38]

Didėjant apsauginių dujų debitui, dujų apsauginė zona tampa mažiau stabili suvirinimo proceso metu. Stabiliausias apsauginis dujų sluoksnis gaunamas naudojant 5 litrų per minutę argono srautą. 5 litrų per minutę srauto užtenka visiškai apsaugoti suvirinimo vonelę nuo išorinio atmosferos poveikio [38].

1.6. Medžiagų naudojamų formuoti atsparias dilimui dangas pasirinkimas ir rūšys

Dilimui atsparios dangos formavimui gali būti naudojamos beveik visos kieto tipo metalinės ir keramininės medžiagos, kurios tenkina iškeltus reikalavimus. Tačiau kiekviena medžiaga turi tik jai būdingą poveikį galiniam rezultatui, o jų deriniai gali formuoti visai kitokią mikrostruktūrą [39].

Dažniausiai keliami reikalavimai dangų medžiagoms turi tenkinti šiuos kriterijus:

- Paviršiaus defektų atsiradimas;
- Kietumas;
- Mikrostruktūros parametrai;
- Mechaninės savybės [39].

Formuojant kompozitines medžiagas, į minkštą matricą įdedant kietos medžiagos dalelių, atsparumas dilimui padidėja. Šiuo atveju karbidai tolygiai pasiskleidžia per visą suvirinimo metalą, o tai padidina suvirinto metalo tvirtumą.

1.7. Legiruojantys elementai naudojami dangų formavime

Dažnai naudojami elementai, kurie stipriai linkę formuoti karbidinius junginius. Tokie elementai yra:

- Nb;
- Ti;
- V;
- Zr.

Jie reaguoja su anglimi ja absorbuodami ir sumažindami jos kiekį matricoje [40].

Vanadis skatina formotis smulkiagrūdei dangos struktūrai, mažindamas karbidų dydį, kas sąlygoja didesnę kietumą ir atsparumą dilimui.

Dažnai naudojami miltelių mišiniai sudaryta iš dviejų ir daugiau elementų. Naudojant Fe-Ti, Fe-V ir C miltelių mišinį GTAW procesu galima dengti AISI 1020 anglinį plieną. Tokio mišinio panaudojimas yra efektyvesnis nei tik kažkurio vieno elemento. Feritotitanas ir feritovanadis yra daug veiksmingesnis, nes formuoja kompleksinius karbidus, nei tik panaudojus titano karbidus kaip pagrindą dangos kietumui [40, 24].

Taip pat yra analizuojamas tokių derinių kaip Fe-Cr-C-M panaudojimas dangoms formuoti.

1.8. Medžiagų rūšių tipai

Nors dažniausiai dangoms formuoti naudojami milteliai, tačiau yra ir kitokios formos medžiagų, kaip :

- Viela;
- Elektrodai;
- Pridėtiniai metalo strypeliai.

Kokio tipo medžiagos bus naudojamos ir ar technologiškai įmanoma jas panaudoti apsprendžia projekto tikslas ir turimos įrangos galimybės.

Į tai reikia atsižvelgti prieš projektuojant patį technologinį procesą, kadangi naudojamos medžiagos forma stipriai veikia šilumos įnešimo kiekį bei temperatūrines deformacijas [41].

1.9. Medžiagos tipo įtaka dangos formavimo procesui

Atlikti tyrimai leidžia teigti, kad dangas formuojant iš miltelinių medžiagų, jų išlydymui energijos kiekio reikia didesnio nei vielos išlydymui.

Lyginant vienasluoksnes dangas iš miltelinių medžiagų ir vielos, gauti duomenis patvirtina, kad miltelinės dangos pagrindai yra labiau deformuojami dėl aukštos temperatūros. Miltelinės dangos

absorbuoja energiją, todėl joms reikia didesnės temperatūros nei kieto pavidalo medžiagoms. Tai kartu lemia ir skystos vonelės gylį pagrindo atžvilgiu [41].

Taikant miltelines medžiagas danga gaunama šiurkštesnio paviršiaus. Naudojant suvirinimo vielas paviršiaus išgaunamas lygesnis, bet elementų pasirinkimo ir dangos grynumo išgavimo galimybės stipriai apribojamos

2. Tyrimo metodika

2.1. Naudota suvirinimo įranga dangoms formuoti

AirLiquide SAF-FRO Combiwig 4000 AC/DC (Italy) TIG inverterinio tipo suvirinimo šaltinis buvo naudojamas dilimui atsparioms dangoms formuoti. Šaltinio techninės charakteristikos yra: suvirinimo srovės diapazonas nuo 5A iki 350A, elektros tinklo maitinimo įtampa 400V, 50Hz.

Apsauginių dujų Jumbo lęšiukas, Jumbo apsauginė keramika (gamintojas TBI, Vokietija) užtikrino optimalius suvirinimo kokybinius rezultatus. Nelydaus volframo elektrodo WL20 (gamintojas TBI, Vokietija), kurio skersmuo 2,4 mm panaudojimas užtikrino stabilų elektros lanką ir neleido atsirasti pašalinėms priemaišoms. Suvirinimo parametrai: suvirinimo srovė – 55A, suvirinimo įtampa – 19V, suvirinimo greitis – 1,4 mm/s.

Išlydytai vonelei apsaugoti nuo išorinio aplinkos poveikio naudotos inertinės apsauginės dujos – 99,997% grynumo Argonas (tiekiąs Gaschema, Lietuva) tiekiamas 10 l balionuose (slėgis 200 bar). Apsauginių dujų slėgiui reguliuoti naudotas reduktorius Hercules (Vokietija), skirtas Argono/Angliarūgštės dujoms. Tiekiamų dujų srauto intervalas nuo 0 l/min iki 30 l/min.

2.2. Cheminė miltelių ir bandinio sudėtys

Austenitiniai plienai plačiai taikomi dangų formavimui mechanikos ir inžinerijos srityse. Tokių plienų privalumas yra žema kaina, didelis cheminis pastovumas ir geras atsparumas dėvėjimuisi. Priklausomai nuo taikomo dangos formavimo metodo ši danga turi ir trūkumų.

Y. Chen savo darbuose teigia, kad atomizuotas austenitinio plieno daleles pernešant ant dengiamos medžiagos paviršiaus, šios dalelės stipriai oksiduojasi. Tai skatina įtrūkimų atsiradimą [42].

Austenitinės struktūros formavimuisi lemiamos įtakos turi elementas nikelis (Ni). Ni kiekis lydinyje svarbus mikrokietumui, priemonė įtrūkių formavimuisi dangoje stabdyti, atsparumui dilimui ir korozijai bei oksidavimuisi didinti. Pasirenkant austenitinio plieno sudėtį su tinkamu kiekiu Ni, galima suformuoti dangą atsparią ne tik dilimui, bet ir korozijai [43].

Formuojant dilimui atsparią dangą iš austenitinio plieno sustiprinimui naudojami chromo karbidai. Jie pasižymi geromis mechaninėmis savybėmis (kietumas, stiprumas), mažu tankiu ir cheminiu stabilumu [44].

Labai geros dangos savybės gaunamos naudojant Cr₃C₂-NiCr mišinio miltelius. Tokia danga pasižymi aukšta lydymosi temperatūra, kietumu ir stiprumu, atsparumu aukštos temperatūros korozijai (iki 900 °C) [45, 46].

Normalizuotas konstrukcinis plienas S355 (EN 10025) buvo pasirinktas kaip pagrindas ant kurio bus formuojama danga. Šio plieno cheminė sudėtis nurodyta 3 lentelėje. Danga dengiama ant ruošinių, kurių skerspjūvio išmatavimai yra 10 × 10 mm ir storis 5 mm.

4 lentelė. S355 plieno cheminė sudėtis

| Elementas | C | Mn | P | S | Si | Fe |
|---------------|------|------|------|------|------|--------------|
| Kiekis, wt. % | 0,22 | 1,60 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | likusi dalis |

Tyrimui buvo panaudotos dviejų skirtingų sudėčių matricos:

- Castolin 16316 (paprastas austenitinis nerūdijantis plienas EN 1.4436 9 EN-X3CrNiMo17-13-3), elementų dalis wt.%: C – 0.03, Cr – 17.5, Ni – 13, Mo – 2.7, likusi dalis Fe);
- Castolin 16221 (Ni pagrindo lydinys, elementų dalis wt.%: C – 0.2, Cr – 4, B – 1, Si – 2,5, daugiausia Fe – 2, Al – 1, likusi dalis Ni), frakcijos dydis 100 + 325 μm (4 lentelė).

SAW metodu suformuotos dangos matricoje yra 0,1 % mažaanglio plieno dėl papildomai naudojamo pridėtinio metalo. Gauti sustiprinimai naudojami miltelius $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ni}$ (80 wt.% Cr_3C_2 , 20 wt.% Ni), 99,5% grynumo Cr, kurio frakcijos dydis yra 6,65 μm ir 99,7 % grynumo Ni, kurio frakcijos dydis 2,4 μm , ir 99,7 wt.% grynumo anglis, kurios frakcijos dydis 6,45 μm , buvo sumalta, tada plastifikuota ir sukepinta vakuuminėje aplinkoje esant 1100 °C [47, 48].

5 lentelė. Matricų deriniai

| Bandinio kodas | Dangos formavimo būdas | Matricos sudėtis | Stiprinimas |
|----------------|--------------------------------------|--|-----------------------------------|
| S-SS | Suvirinimas po fliuo sluoksniu (SAW) | 99,9 Castolin 16316 + 0,1 suvirinimo viela | n/a |
| S-Ni | | 99,9 Castolin 16221 + 0,1 suvirinimo viela | n/a |
| S-SS-R | | 99,9 Castolin 16316 + 0,1 suvirinimo viela | $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ni}$ |
| S-Ni-R | | 99,9 Castolin 16221 + 0,1 suvirinimo viela | $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ni}$ |
| P-SS | Suvirinimas plazmos srautu (PTAW) | Castolin 16316 | n/a |
| P-Ni | | Castolin 16221 | n/a |
| P-SS-R | | Castolin 16316 | $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ni}$ |
| P-Ni-R | | Castolin 16221 | $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ni}$ |
| T-SS | Tungsten inert gas welding (TIG) | Castolin 16316 | n/a |
| T-Ni | | Castolin 16221 | n/a |
| T-SS-R | | Castolin 16316 | $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ni}$ |
| T-Ni-R | | Castolin 16221 | $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ni}$ |

Siekiant įsitikinti TIG technologijos tinkamumu dilimui atsparių dangų formavimui, palyginimui pasirinkti du metodai SAW ir PTAW bei ta pati tiek matricos tiek sustiprinimo sudėtis. Procesų parametrai parinkti remiantis matricos ir sustiprinimo kombinacija. Bandinių paviršiai prieš dangos užnešimą kruopščiai nuvalomi nuo oksidų (rūdžių), purvo, riebalų. Matmenys parinkti pagal dilimo bandymo mašinos parametrus.

2.3. Mikrošlifų paruošimas tyrimams

Nedidelių matmenų ir svorio detales ar bandinius po paviršiaus paruošimo galima patalpinti ant mikroskopo staliuko. Tačiau jeigu matmenys ir svoris reikšmingi ir ant detalės sunku gauti plokščią paviršių, būtina iš detalės išpjauti specialų bandinuką, dažnai vadinamą templetu. Didžiausią reikšmę rezultatams turi vietos išrinkimas, iš kurios reikia išpjauti pavyzdį, ir paviršiaus parinkimas, kurį reikia paruošti kaip mikrošlifą. Šis pasirinkimas priklauso nuo to, kokie bus atliekami tyrimai, koks tyrimo tikslas ir kokios detalės formos. Tiriant mikrostruktūrą dažnai išpjaujami keletas bandinių (templetų) taip, kad būtų galima nustatyti struktūros pokyčius einant nuo paviršiaus į vidų,

kartu tai padeda nustatyti metalo apdirbimo poveikį keliems metalo sluoksniams. Siekiant gauti plokščią bandinio paviršių, kai matmenys yra gana maži, bandinį patalpiname į spaustuvus. Dažniausiai jie būna sudaryti iš dviejų plokščių, kurių tarpusavio atstumas reguliuojamas varžtais. Kitas galimas įtvirtinimo būdas yra bandinio įtvirtinimas į plastmasės/ specialios dervos ruošinį. Įtvirtintus bandinį galima pradėti šlifavimą. Po šlifavimo abrazyvinės dalelės pašalinamos oru arba nuplaunamos vandeniu. Poliravimu pašalinami po šlifavimo likę smulkūs nelygumai.

Gali būti naudojami šie poliravimo būdai:

- Mechaninis poliravimas atliekamas ant besisukančio disko, kuris apklijuotas arba ant jo užtempta poliravimo medžiaga (fetras, aksomas ir pan.), ant kurios pastoviai tiekama abrazyvinė medžiaga iš labai mažyčių dalelių (chromo oksido, aliuminio oksido, geležies oksido ir t.t.). Šias medžiagas išmaišo vandenyje, o po to jomis sudrėkinamas poliravimo diskas. Pastarasis turi būti visą laiką drėgnas, o bandinys prie jo turi būti spaudžiamas labai nedidele jėga. Disko sukimosi greitis 400 – 600 aps./min, kai diametras yra 250 mm. Poliravimas laikomas baigtu, kai paviršius tampa veidrodis, ir net per mikroskopą neįžiūrėsime nelygumų.
- Cheminis – mechaninis poliravimas atliekamas tuo pačiu poliravimo disku, ant kurio kartu su abrazyvinėmis dalelėmis įmaišoma cheminių medžiagų, kurios pagreitina apdirbimą.
- Elektrocheminis poliravimas atliekamas bandinį įmerkiant į elektrolito vonelę prigludžiant bandinį prie teigiamo poliaus. Katodas dažniausiai būna nerūdijančiojo plieno plokštelė.

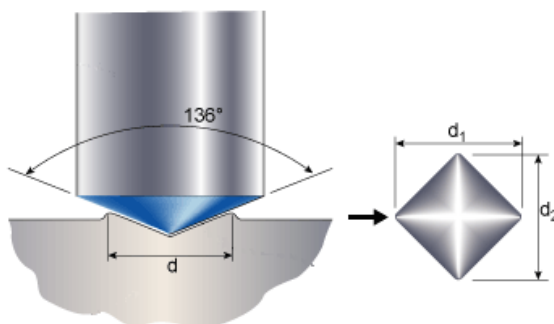
2.4. Dangų mechaninių savybių tyrimas

Pagrindinis medžiagų kietumo matavimo metodo tikslas yra nustatyti ar pasirinkta medžiaga yra tinkama numatytam tikslui.

Dabartiniai kietumo matavimo metodai yra skirstomi į makrokietumo ir mikrokietumo matavimus. Makrokietumas matuojamas indentorių veikiant didesne nei 1 kg mase, o mikrokietumas kada indentorius veikiamas iki 1 kg dydžio mase. Pastarasis metodas taikomas ypatingai mažoms detalėms ar ploniems metalo lakštams.

Mikrokietumui matuoti taikomi metodai:

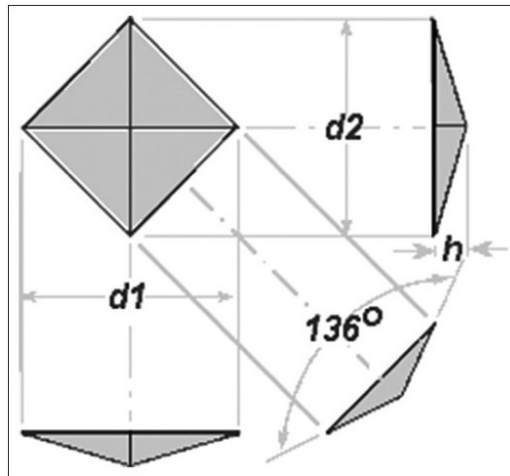
- Knupo;
- Vickerso deimantinė piramidė.



23 pav. Vickerso matavimo metodo principinė schema[49]:

d- įspaudo skersmuo, d1 ir d2- atstumas tarp įspaudo priešingų kampų

Tyrime mechaninės dangos savybės įvertintos taikant Vikerso paviršiaus kietumo matavimo metodą (HV 30). Kaip indentorius naudojama kvadrato formos deimantinė prizmė su 136° kampu tarp priešingų paviršių.



24 pav. Vikerso piramidės deimantinio indentoriaus įspaudas[49]:

d_1 , d_2 - atstumai tarp priešingų įspaudų kampų, h – įspaudų gylis

Naudotas kietumo matavimo įrenginys Indentec 5030KV (Zwick/Roell, Germany) su apkrova 294,3 N (30 kgf) ir 10 s išlaikymu. Atlikta po 10 kietumo matavimų kiekvieno bandinio dangoje. Kiekvieno bandinio rezultatai susumuoti ir apskaičiuotas kietumo rezultatų vidurkis.



25 pav. Kietumo matavimo įrenginys Indentec 5030KV (Zwick/Roell, Germany) [50]

Remiantis gautais rezultatais atikta lyginamoji dangų mechaninių savybių analizė.

2.5. Atsparumo dilimui testavimo metodas

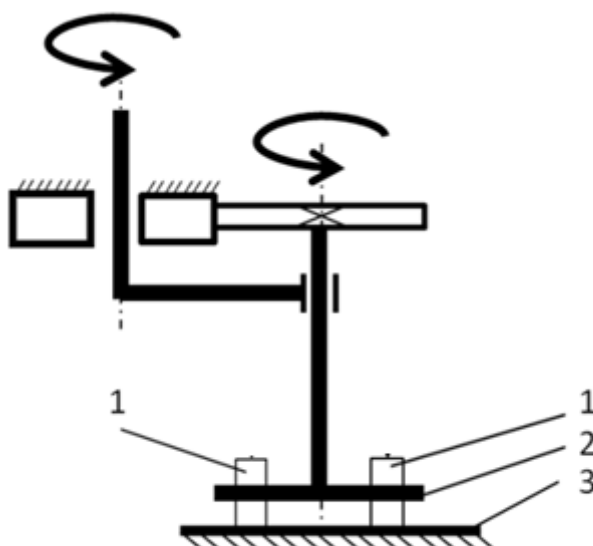
Gautų dangų atsparumas dilimui analizuotas dviem dilimo metodais: dviejų kūnų dilimas ir trijų kūnų dilimas. Buvo siekiama nustatyti suformuotoms dangoms tinkamiausią abrazyvinio dilimo pobūdį. Dilumo bandymo rezultatai patekti 5 lentelėje.

6 lentelė. Dviejų ir trijų kūnų dilimo bandymų parametrai

| Bandymo metodas | Taikytas standartas | Apkrova, N | Sukimosi greitis, 1/s | Linijinis greitis, m/s | Trukmė, s | Abrazyvo rūšis | Abrazyvo dalelių dydis, mm |
|-----------------|-----------------------|------------|-----------------------|------------------------|-----------|--------------------------------|----------------------------|
| Dviejų kūnų | ASTM G132 | 5 | 1,05 | 0,4 | 3600 | Al ₂ O ₃ | 0,08 – 0,1 |
| Trijų kūnų | ASTM G65, procedūra A | 130 | 3,6 | 2,4 | 1800 | SiO ₂ | 0,2 – 0,3 |

Bandiniai dviejų kūnų ir trijų kūnų dilimo bandymams buvo paruošti $6 \times 6 \times 20$ mm ir $10 \times 20 \times 50$ mm matmenų, atitinkamai bandymo tipui. Bandymų principinės schemas pateiktos 8 ir 9 paveiksluose.

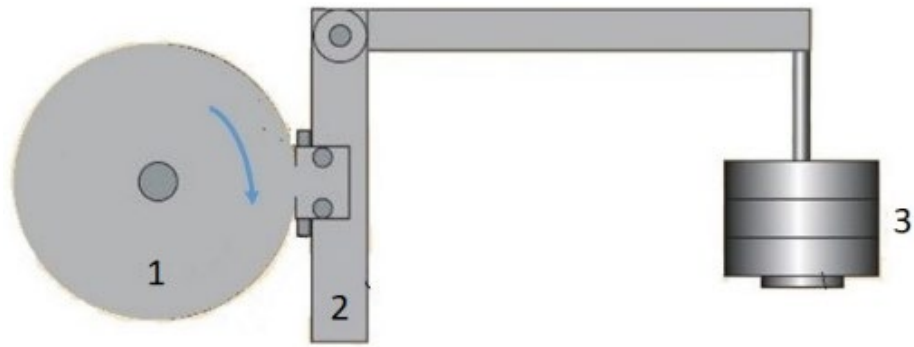
Bandiniai dviejų kūnų abrazyvinio bandymo metu (26 pav.) prispaudžiami prie abrazyvo 5 N apkrova. Dilimo bandiniai sukasi apie laikiklio ašį 63 r/min greičiu.



26 pav. Dviejų kūnų abrazyvinio dilimo bandymo schema:

1 – dilimo bandiniai, 2 – laikiklis, 3 abrazyvas

Masės nuostoliai buvo registruojami po 10 minučių (~ 240 m dilimo kelio) sveriant 0,0001 g tikslumu. Elektrokorundas/baltasis aliuminio oksidas buvo naudojamas kaip abrazyvas, kuris buvo keičiamas po 5 minučių dilimo (~ 120 m dilimo kelio).



27 pav. Trijų kūnų abrazyvinio dilimo bandymo schema:

1 – abrazyvinis diskas, 2 bandinių laikiklis, 3 – svoris

Trijų kūnų abrazyvinio dilimo metu bandinys spaudžiamas prie besisukančio abrazyvinio disko, bandymas atitinka ASTM G 65 standartą.

2.6. Dangų cheminių elementų analizė

Suformuotų dangų mikrostruktūros buvo analizuojamos naudojant (SEM/EDX ZEISS EVO MA10 su EDS detektoriumi Bruker XFlash 6/10) elektroninį skenuojantį mikroskopą.

Gautos dangos mikrostruktūros cheminės sudėties analizei naudota rentgeno spindulių energinės dispersijos spektroskopija bei rentgeno spinduliuotės difrakcinė analizė (XRD) (AXS D5005 (Bruker, Germany)) su Cu K α spinduliuavimo šaltiniu. Matavimo žingsnis – 0,04°.

Šis metodas pagrįstas pirminių elektronų sąveika su tiriamosios medžiagos elektronais. Sistemą sudaro Bruker Xflash® 4030 rentgeno spindulių energijos dispersijos detektorius, signalų procesorius, valdiklis ir ESPRIT duomenų analizės programinė įranga. EDS silicio slinkties detektorius užtikrina 133eV energijos skiriamąją gebą esant 100000 cps duomenų kaupimo spartai. Didžiausias galimas duomenų kaupimo greitis 1000000 cps. Aktyvus plotas, kurį gali aprėpti detektorius, yra 30 mm². Galima detektuoti elementus pradedant Boru ir baigiant Americiu.

Didelis detektoriaus plotas ir greita veika leidžia šį detektorių naudoti kintamojo slėgio mikroskopuose, tiriant ir nelaidžius bandinius esant mažoms elektronų srovėms. EDS yra valdomas per 32 bitų grafinę vartotojo sąsają Microsoft Windows XP operacinės sistemos aplinkoje. Joje yra įdiegtas valdiklis, kuris atlieka SEM skenavimo valdymą, SEM detektoriaus parodymų nuskaitymą ir EDS detektoriaus valdymą bei duomenų įvedimą ir/ar išvedimą į signalus apdorojantį įrenginį.

3. Eksperimentinė dalis ir rezultatų apibendrinimas

3.1. Dangų formavimas

GTAW metodu formuojant abrazyviniam dilimui atsparią dangą naudojant kietmetalio miltelius, yra labai svarbu tinkami parametrai bei darbo aplinka.

Proceso metu suvirinimo parametrai yra sąlyginiai nedideli, todėl yra labai svarbu, kad darbo vietoje nebūtų oro srovių judėjimo. Tai ypač aktualu dėl nedidelio Argono apsauginių dujų srauto – 5 l/min. Didinant apsauginių dujų srautą susiduriama su miltelių nupūtumu nuo dengiamos medžiagos paviršiaus. Tokie parametrai leidžia dirbti sudėtingesnėmis darbo sąlygomis, bet dangos formavimas tampa sudėtingas. Padidinus apsauginių dujų srautą tik 5 l/min pastebimas smulkesnės frakcijos miltelių nupūtimas nuo pagrindo paviršiaus. Elektros lankas nespėja miltelių išlydyti ir danga nėra suformuojama.

Apsauginių dujų parametrus nustatant priešinga tvarka (mažinant) milteliai nenupučiami, tačiau išlydytos vonelės ir volframo elektrodo apsauga tampa nestabili. Parametrus sumažinus iki 3l/min, volframo elektrodas greitai užteršiamas lydomų miltelių dalelėmis, o išlydytų miltelių vonelėje atsiranda poros. Tai sąlygojo žemą dengiamos dangos kokybę. Miltelių lydymo procesas nestabilus ir sunkiai kontroliuojamas.

Per mažo apsauginių dujų srauto pasekmė yra ir nestabilus elektros lanko degimas bei sudėtingas pirminis jo uždegimas. Dėl pastarosios priežasties volframo elektrodo galiukas greitai išdega ir apsineša nuodegomis. Dėl šios priežasties darbo tęsti toliau negalima kol volframo elektrodas vėl neparuošiamas naudojimui pagal reikalavimus.

Suregulius apsauginių dujų srautą smulkios frakcijos miltelių nupūtimas gali atsirasti dėl netinkamo volframo elektrodo skersmens pasirinkimo. Dangos formavimui rekomenduojama naudoti 2,4 mm skersmens WL20 volframo elektrodą ir 55 A suvirinimo srovę.

Taikant šią suvirinimo srovę ir volframo elektrodą WL20 1,6 mm skersmens pastebėtas stiprus magnetinio lauko pūtimas. Elektros lanką uždegus ir suvirinimo parametram kylant iki nustatytos ribos (55A) pastebimas magnetinio lauko pūtimo didėjimas. Nuo pagrindo paviršiaus milteliai nupučiami pasiekus nustatytus suvirinimo parametrus. Naudojant tokius nustatymus dangą suformuoti iš miltelių yra labai sudėtinga, o gautos dangos kokybė yra nedidelė.

Plonesnio skersmens volframo elektrodas greičiau dėvisi, mažiau atsparus pašalinių medžiagų prikibimui prie jo paviršiaus, greičiau praranda galiuko paruošimo formą. Tai labai svarbu norint suformuoti aukštos kokybės dangą ir turėti galimybę visapusiškai kontroliuoti dangos formavimo procesą.

Dangos formavimo metu pastebėta, kad plonesnio skersmens volframo elektrodo panaudojimas palengvina elektros lanko pirminį uždegimą, gaunama siauresnė suvirinimo vonelė.

Proceso metu naudojant didesnio skersmens volframo elektrodą, gauti priešingi rezultatai. Bandymams panaudotas 3,2 mm skersmens WL20 volframo elektrodas. Apsauginių dujų srautas pasirinktas optimalus – 5 l/min, suvirinimo srovė 55A. Su šiais suvirinimo nustatymais yra labai sudėtinga uždegti pirminį elektros lanką. Uždegimo metu elektros lankas yra trūkinėjantis, išlydžio įtampa kintančio dydžio.

Dėl sudėtingo elektros lanko uždegimo pradžios, abrazyviniam dilimui atsparia danga dengiamas ruošinys gali būti apgadintas ir netinkamas tolesniam naudojimui.

Dengiamos medžiagos paviršius privalo būti kruopščiai nuvalomas nuo nešvarumų ir nuriebalinamas. Jeigu yra gamybos proceso metu atsiradusi oksido plėvelė ji irgi privalo būti pašalinama. Dengiamas metalo paviršius pageidautina, kad būtų „aktyvus“. Tai reiškia, kad kiek įmanoma ilgiau be apsauginės oksidų plėvelės.

Užpiltas miltelių sluoksnis ant dengiamo pagrindo paviršiaus yra optimaliausias 1,5–2 mm storio. Storesnis sluoksnis nesilaiko – nubyra nuo ruošinio. Plonesniam miltelių sluoksniui parinkti suvirinimo parametrai nėra tinkami – perlydomas pagrindo paviršius, dalis legiruojančių elementų išdega, o pagrindas perkaista.

Formuojant dangą naudojant optimalius suvirinimo parametrus labai svarbu suvirinimo degiklio vedimo kryptis ir posvyrio kampas dengiamos paviršiaus atžvilgiu. Geriausi rezultatai gaunami degiklį vedant nuo išlydytos vonelės. Tai sumažina šilumos įvestį į dengiamos medžiagos paviršių, didžioji dalis terminės energijos panaudojama miltelių išlydymui. Dangos formavimas lengvai valdomas ir gaunama aukštos kokybės danga.

Suvirinimo degiklio optimalus posvyrio kampas su dengiamos medžiagos paviršiumi yra 85° - 80°. Didžioji dalis energijos tenka miltelių lydymui. Pagrindo tik paviršutinė dalis yra išlydoma. Gilesni sluoksniai nepaveikiami. Milteliai yra išlydomi ir skystos fazės patenka ant dengiamos medžiagos paviršiaus kur suformuojamas neišardomas metalurginis ryšys auštant. Dėl šios priežasties procesas yra greitesnis, o tai sąlygoja mažesnę pagrindo įkaitimą. Dangos adhezija yra labai aukšta.

Jei suvirinimo degiklis yra laikomas statmenai dengiamam paviršiui, mažesnė dalis energijos tenka miltelių išlydymui, o didesnė dalis į pagrindo paviršių. Gilesni paviršiniai sluoksniai yra išlydomi, o miltelių lydymas yra lėtesnis. Toks suvirinimo degiklio laikymo kampas blogina matomumą suvirinimo/ lydymo zonoje. Dėl šios priežasties gali stipriai nukentėti formuojamos dangos kokybė.

Labai svarbu, kad suvirinimo šaltinio teigiamo poliaus jungtis turėtų gerą kontaktą su dengiamu pagrindu. Tai turi didelės įtakos elektros lanko stabilumui, lengvam pirminiam uždegimui.

3.2. Gautų dangų rezultatai

Mikrostruktūros analizė parodė, kad dangos be stiprinančiojo elemento turi Fe pagrindo (nerūdijantysis plienas) arba Ni pagrindo lydinių struktūrą. Cr₃C₂-Ni dalelių įtraukimas į dangos sudėtį davė skirtingus kiekvieno dangos atlikimo metodo rezultatus.

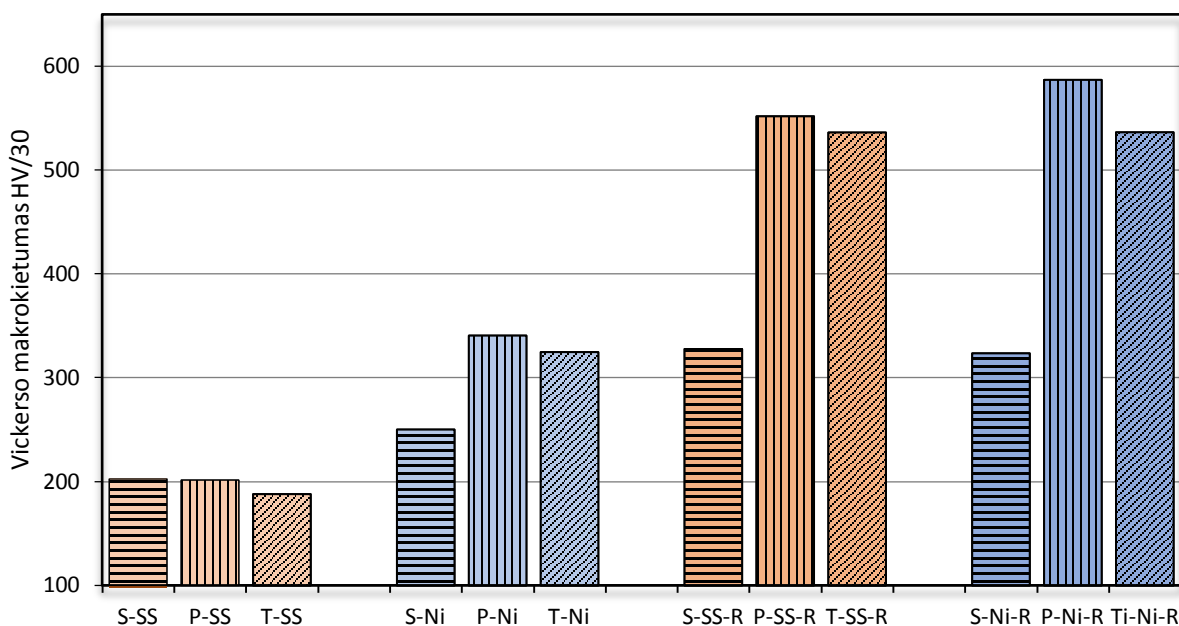
XRD analizė parodė Cr₇C₃, Cr₃C buvimą nerūdijančiojo plieno dangoje, o Ni pagrindo dangose dominuojantys karbidai yra Cr₃C₂ ir CrC [24]. Cr kietasis tirpalas α-Fe dominuoja plieno + nerūdijančiojo plieno + stiprinimas dangoje, tuo tarpu tik mažas kiekis likutinio austenito nikelio pagrindo dangoje (γ-Fe), bei pastebimas mažesnis kiekis Cr₃C karbidų.

PTAW metodu suformuotose dangose matomi Cr₃C₇ karbidai ir likutinis austenitas su Cr kietuoju tirpalu. Anglies išstipimas likutiniame austenite gali būti priežastis mažo antrinės fazės karbidų kiekio.

Cr_3C_2 ir CrC karbidai pastebėti S+Ni+R dangose, kuriose mažas likutinio austenito kiekis ($\gamma\text{-Fe}$). Skirtingai nei Ni pagrindo XRD grafikuose, antriniai karbidai pastebimi P-Ni-R metodu atliktoje dangoje.

SAW metodu suformuotoje dangoje stiprinančiosios dalelės yra visiškai ištirpusios dėl didesnės suvirinimo srovės. Tai lemia didesnę šilumos įvestį proceso metu ir kartu didesnę elementų ištirpimo kiekį. $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ni}$ dalelių kiekis yra ženkliai mažesnis nerūdijančiojo plieno dangose, o tai būdinga Fe pagrindo dangoms.

Kietumo matavimai Vickerso metodu patvirtino lauktą tendenciją – $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ni}$ dalelių įmaišymas kietumą padidino 1,2 – 1,6 karto SAW metodu suformuotoms dangoms, 1,7–2,7 karto – PTAW metodu suformuotoms dangoms ir 1,6–2,8 karto – TIG metodu suformuotoms dangoms. Panaši tendencija išliko taikant skirtingas technologijas (28 pav.).



28 pav. TIG, PTAW, SAW metodais suformuotų dangų Vickerso kietumas

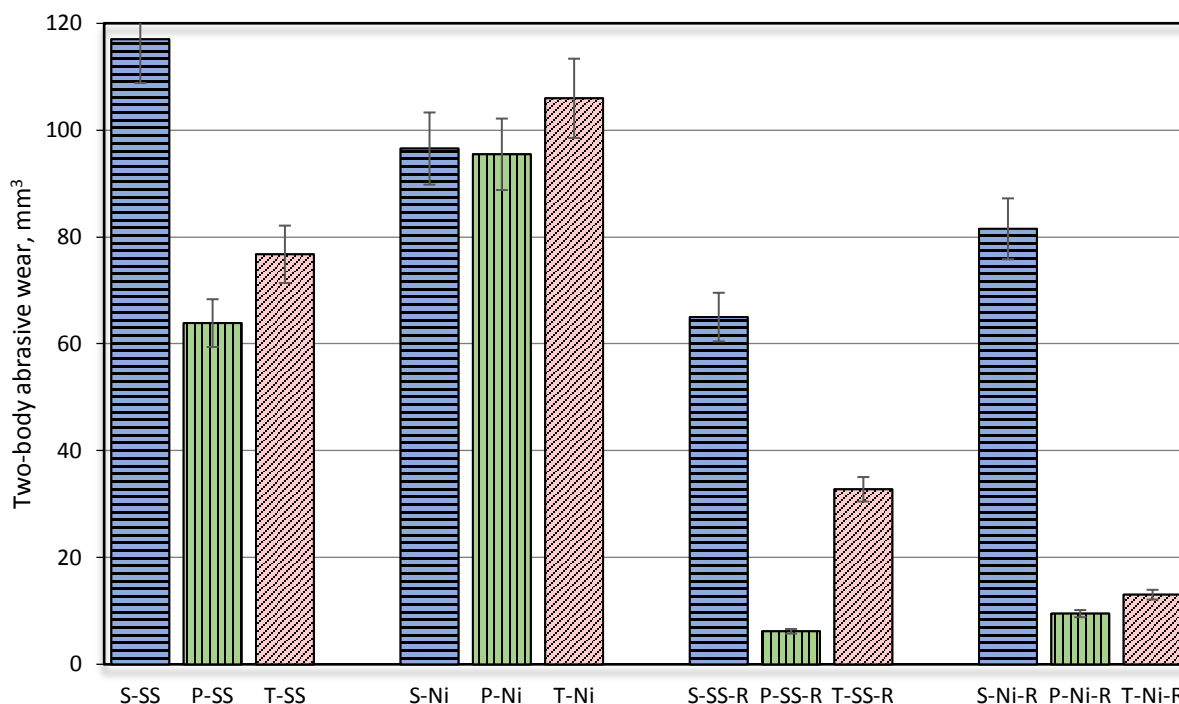
Pirmi šeši stulpeliai rodo dangos kietumo reikšmes be stiprinančiųjų elementų. Galima aiškiai matyti, kad taikytas dangos formavimo būdas neturi esminės įtakos kietumo reikšmėms pagal Vickersą naudojant nerūdijančio plieno matricą (1 grafiko pirmi trys stulpeliai). Taikomos technologijos įtaka dangos rezultatams pastebėta Ni pagrindu formuotoje matricoje (28 pav. antra trijų stulpelių serija).

Likusieji stulpeliai aiškiai parodo taikomos technologijos įtaką formuojamos dangos kietumo parametrui. PTAW ir TIG metodu suformuotos dangos yra kietesnės nei SAW būdu. Tai galima paaiškinti tuo, kad dangoje yra didesnis kiekis karbidų dalelių nei SAW metodu suformuotoje dangoje. SAW metodu formuojamoje dangoje stiprinantys elementai yra sulydomi. Remiantis gautais rezultatais, PTAW metodas dangoms formuoti yra optimaliausias.

Austenitinio nerūdijančio plieno matricą sustiprinus $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ni}$ (SS-R), galima pastebėti ženklų kietumo padidėjimą (nuo 201,4 iki 551,8 HV/30 naudojant PTAW ir nuo 187,9 iki 536,2 HV/30 taikant TIG) lyginant su sustiprinta Ni matricos danga (Ni + R) (nuo 340,6 iki 586,9 HV/30 taikant

PTAW, ir nuo 324 iki 536,4 HV/30 taikant TIG metodą). Nesustiprintos nerūdijančiojo plieno matricos kietumas yra mažesnis (nuo 187,9 iki 202,5 HV/30).

Dviejų kūnų dilimo bandymo rezultatai yra proporcingi kietumo rezultatams (29 pav.). Pirmieji 6 stulpeliai 10 paveiksle turi žemesnės kietumo reikšmes, ir gautas atsparumo dilimui rezultatas parodė tiesioginį ryšį. Nesustiprintos nerūdijančiojo plieno ir Ni dangos dilo greičiau (29 pav.). Sustiprintos dangos atsparumo dilimui rezultatai tiesiogiai siejosi su taikytu metodu dangai suformuoti. SAW metodu suformuotos S+SS+R ir S+Ni+R dangos dilo nuo 8 iki 10 kartų labiau nei PTAW dangos ir nuo 2 iki 6 kartų greičiau nei TIG metodu gautos dangos.



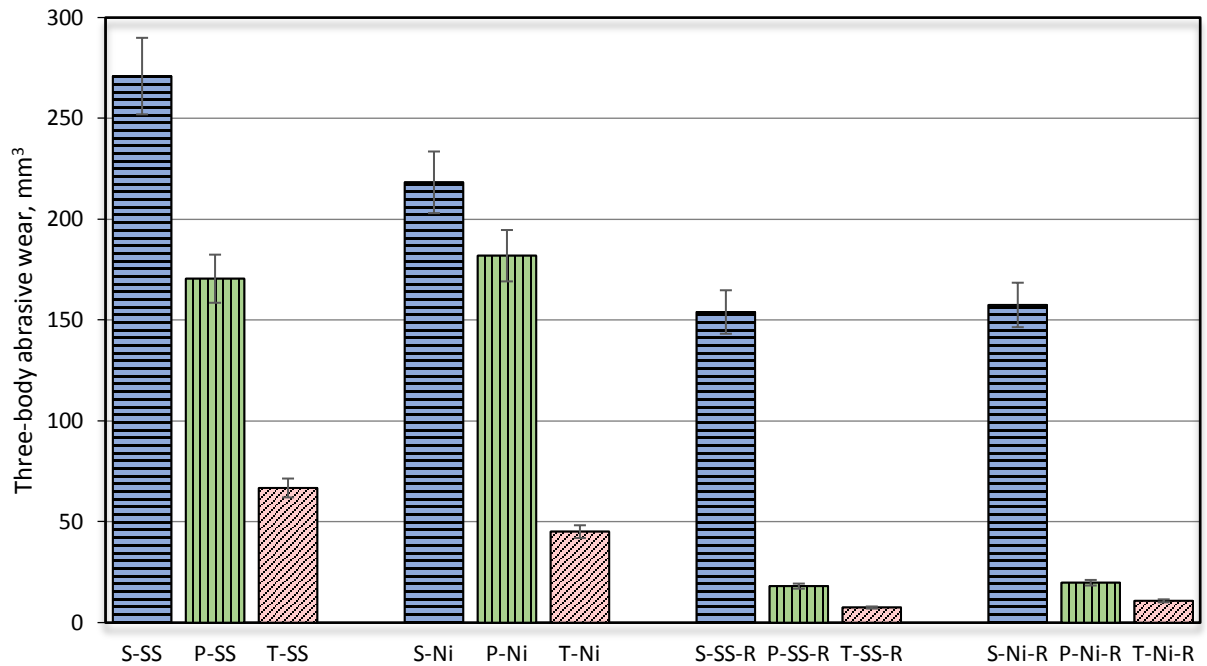
29 pav. TIG, PTAW ir SAW metodais suformuotų dangų dviejų kūnų bandymo dilimo rezultatai

Trijų kūnų dilimo testas parodė teigiamą Cr_3C_2 -Ni dalelių įtaką [51] Fe ir Ni pagrindo matricoms. Tai sumažino dilimą 1,4 – 1,8 karto SAW metodu formuotų dangų, 8,1 – 8,4 – PTAW metodu gautų dangų ir 4,1-9,0 metodu suformuotų dangų (3 grafikas).

PTAW ir SAW metodu suformuotos dangos iš sustiprino austenitinio nerūdijančiojo plieno ir Ni davė beveik vienodus trijų kūnų dilimo rezultatus. Tai leidžia teigti, kad šiuos metodus galima taikyti dangų formavimui, kurios išbandomos trijų kūnų dilimo metodu.

Atsparumo dilimui didėjimo tikėtasi geležies pagrindo dangoms (SS). Ypač tokių rezultatų laukta taikant PTAW metodą. Didesnis dangos suformuotos šiuo metodu atsparumas dilimui gali būti paaiškintas Cr_3C_2 -Ni dalelių dangoje egzistavimu. SS+R dangos mažas dilimas aiškinamas antrinio martensitinio virsmo reiškiniu [52, 53].

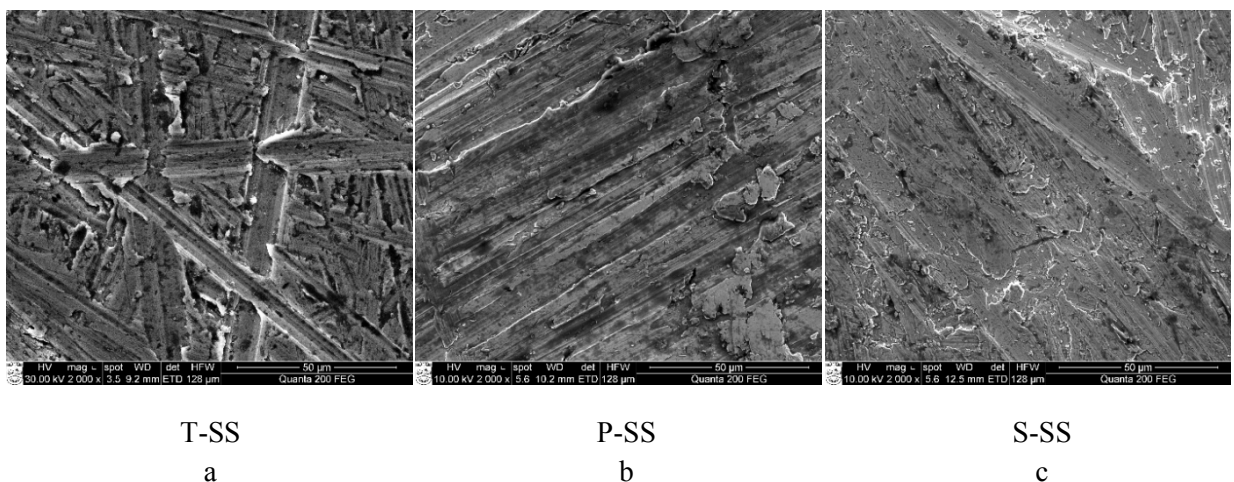
30 paveiksle aiškiai matoma, kad TIG metodu suformuota danga iš nesustiprintų nerūdijančiojo plieno ir Ni kompozitų pasižymėjo iš dalies mažu dilimu testuojant 3 kūnų dilimo metodu – T-SS nudilo $66,77 \text{ mm}^3$, o T-Ni $45,12 \text{ mm}^3$. Atsparumas dilimui Ni pagrindo dangos, sustiprinus ją Cr_3C_2 -Ni elementais, nebuvo toks žymus kaip nerūdijančiojo plieno dangų.



30 pav. TIG, PTAW ir SAW metodais suformuotų dangų trijų kūnų testo dilimo rezultatai

Geriausi atsparumo dilimui rezultatai bandant dviejų kūnų ir trijų kūnų dilimo metodais gauti testuojant austenitinio nerūdijančio plieno pagrindu, dangas sustiprinus Cr_3C_2-Ni elementais ir suformavus PTAW bei TIG metodais. Yra pranešimų, kad dilimo mechanizmas priklauso nuo mikrostruktūros ir ypač nuo antrinių fazių formavimosi. Optinė mikroskopinė analizė atlikta prieš dilimo bandymus ir po jų. Taip pat atlikta nudilusių paviršių SEM analizė.

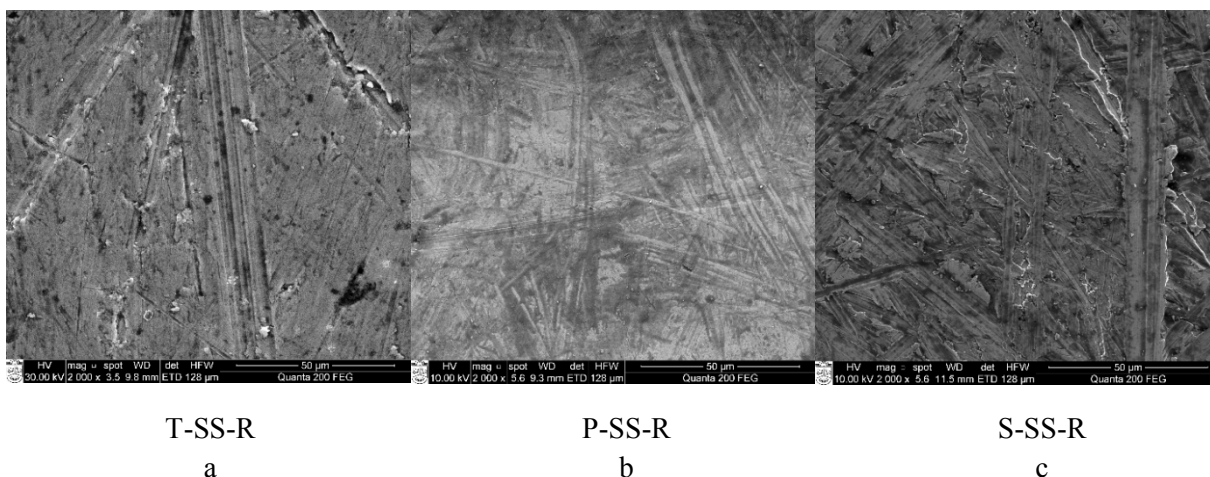
Nesustiprintos dangos suformuotos trimis būdais (SAW, PTAW, TIG) buvo testuojamos taikant dviejų kūnų abrazyvinio dilimo metodą. Gauti rezultatai pateikti 31 paveiksle.



31 pav. Nesustiprintų dangų dilimo rezultatai atlikus dviejų kūnų dilimo testą

Mikro-pjovimo ir mikro-raižymo dilimo derinys buvo pastebėtas SAW būdu suformuotoje dangoje atliekant dviejų kūnų dilimo testavimo metodą. (32 pav. c). Nustatytas dominuojantis dėvėjimosi mechanizmas PTAW dangose yra mikro-pjovimas (32 pav. b), o dangose suformuotose TIG

metodu – sujungti mikro–pjovimo ir mikro–braižymo su dominuojančiu pjovimo mechanizmu (32 pav. a).

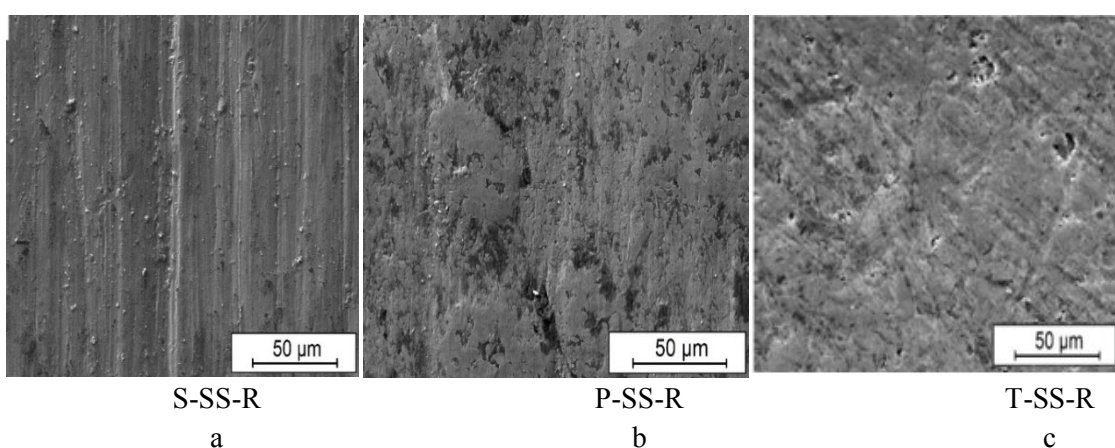


32 pav. Sustiprintų dangų dilimo rezultatai jas suformavus TIG, SAW, PTAW metodais

Sekliausi dilimo grioveliai nustatyti dangose, suformuotose PTAW metodu. Tai patvirtina geriausi atsparumo dilimui rezultatai (30 pav.). Tai gali būti paaiškinta faktu, kad dangoje yra didesnis kiekis pirminių karbidų [54]. Nenustatyta jokių trapiųjų įtrūkimų, o tai patvirtina šios technologijos tinkamumą formuoti dilimui atsparias dangas.

Trijų kūnų dilimo metodo testas, atlikus SEM analizę, parodė bendrą dilimo mechanizmą visom dangom suformuotoms trimis technologijomis (TIG, PTAW, SAW) – mikro–pjovimas. Gilesnės žymės pastebėtos SAW metodu suformuotoje dangoje, kadangi šios dangos kietumas yra pats mažiausias, o dilimas pats didžiausias lyginant su kitais dviem metodais suformuotomis dangomis (33 pav. a).

PTAW ir TIG dangų paviršiaus lygesnis dilimas gali būti aiškinamas tuo, kad sulėtinamas abrazyvų judėjimas ir jų įsiskverbimas į matricą (33 pav. b ir c).

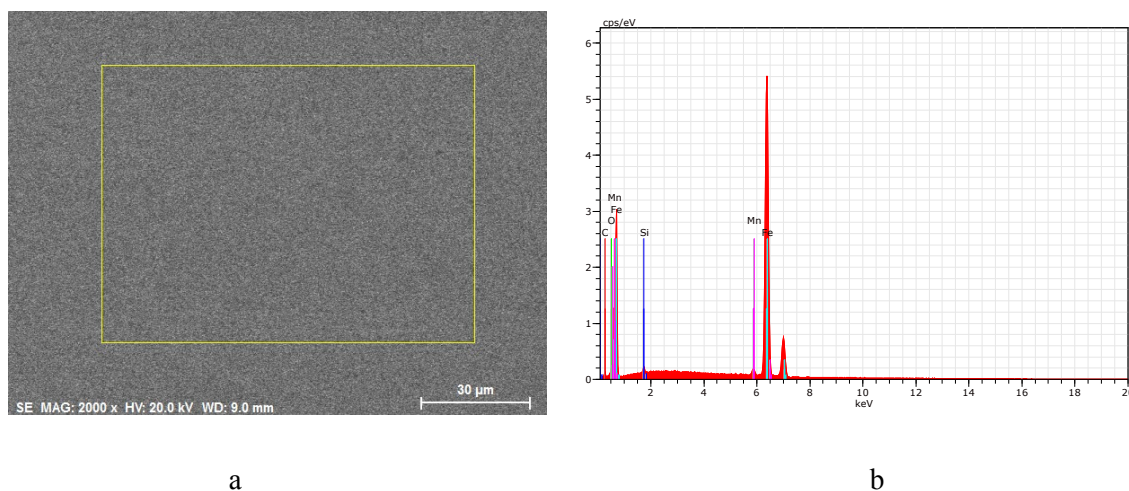


33 pav. Sustiprintų dangų dilimo rezultatai atlikus trijų kūnų testą

Buvo atlikta T-SS-R ir T-Ni-R bandinių tyrimas SEM/EDS ir XRD metodais. Tokį pasirinkimą lėmė suformuotų dangų eksploatacinių savybių tyrimai.

3.2.1. T-SS-R danga

Stačiakampiu SEM nuotraukoje apibrėžta pagrindinio metalo (pagrindo) EDS tyrimo zona (34 pav.), kurios EDS spektras pateiktas 34 pav. b.



34 pav. T-SS-R pagrindinio metalo SEM ir EDS analizės rezultatai

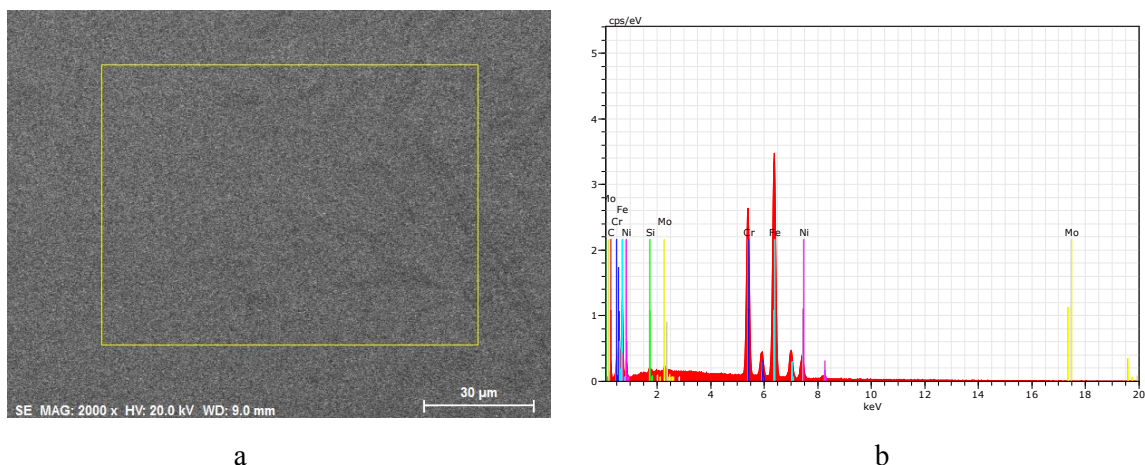
a – T-SS-R dangos pagrindo SEM nuotrauka, b – T-SS-R dangos pagrindo EDS spektras

T-SS-R dangos pagrindo elementinė sudėtis svorio procentais (masės%) ir atominiais procentais (at.%) pateikta 6 lentelėje.

7 lentelė. Pagrindo metalo elementinė sudėtis

| Element | Series | unn. C [wt.%] | norm. C [wt.%] | Atom. C [at.%] | Error (3 Sigma) [wt.%] |
|-----------|----------|------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|
| Carbon | K-series | 2,26 | 2,51 | 10,62 | 1,94 |
| Oxygen | K-series | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Silicon | K-series | 0,48 | 0,53 | 0,96 | 0,16 |
| Iron | K-series | 86,51 | 95,77 | 87,31 | 7,00 |
| Manganese | K-series | 1,08 | 1,19 | 1,11 | 0,20 |
| Total: | | 90,33 | 100,00 | 100,00 | |

SEM nuotraukoje geltonu stačiakampiu apibrėžta T-SS-R dangos EDS tyrimo zona (35 pav. a), kurios EDS spektras pateiktas 35 pav. b.



35 pav. T-SS-R suformuotos dangos SEM ir EDS analizės rezultatai

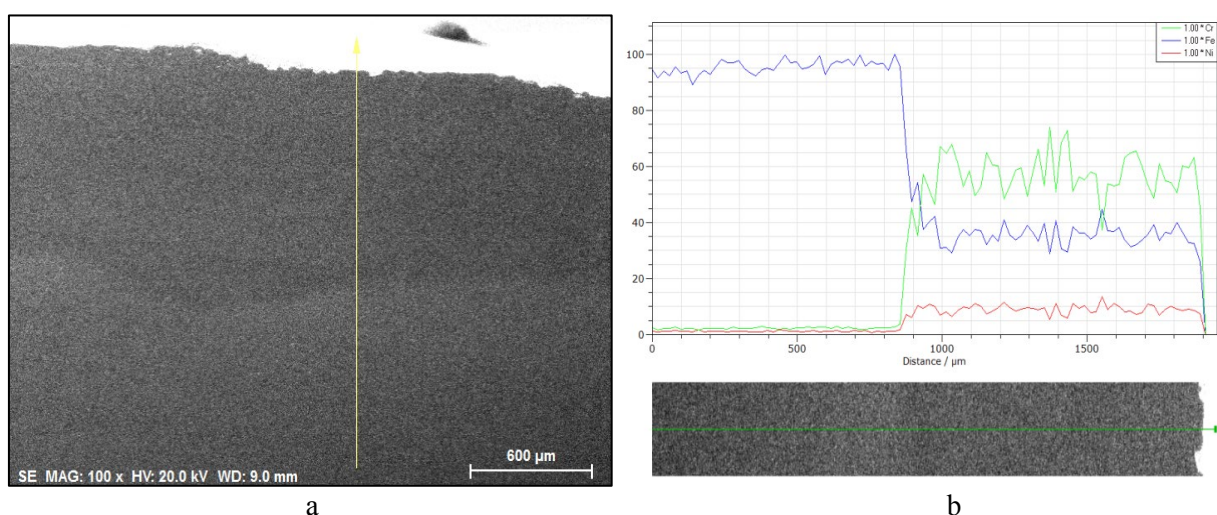
a – T-SS-R dangos SEM nuotrauka, b – T-SS-R dangos EDS spektras

T-SS-R dangos elementinė sudėtis svorio procentais (wt.%) ir atominiais procentais (at.%) iš 35pav. a paveiksle apibrėžto ploto pateikta 7 lentelėje.

8 lentelė. T-SS-R dangos elementinė sudėtis

| Element | Series | unn. C [wt.%] | norm. C [wt.%] | Atom. C [at.%] | Error (3 Sigma) [wt.%] |
|------------|----------|------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|
| Carbon | K-series | 4,56 | 5,24 | 20,18 | 2,98 |
| Silicon | K-series | 0,35 | 0,40 | 0,66 | 0,14 |
| Chromium | K-series | 22,65 | 26,03 | 23,14 | 1,93 |
| Iron | K-series | 51,20 | 58,85 | 48,71 | 4,20 |
| Nickel | K-series | 7,81 | 8,97 | 7,07 | 0,78 |
| Molybdenum | L-series | 0,43 | 0,49 | 0,24 | 0,15 |
| Total: | | 87,00 | 100,00 | 100,00 | |

T-SS-R dangos elementinės sudėties tyrimas EDS linijinio profilio metodu parodytas 36 paveiksle.



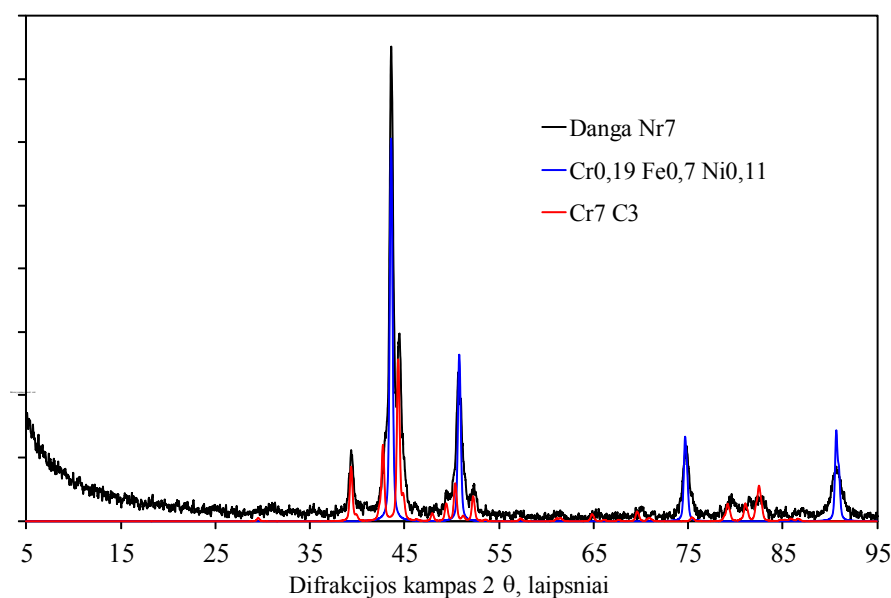
36 pav. T-SS-R elementinės sudėties tyrimas EDS metodu

a – T-SS-R dangos ir jos pagrindo skersinio pjūvio SEM nuotrauka, b – T-SS-R dangos ir jos pagrindo skersinio pjūvio linijinio profilio EDS spektras.

36 pav. a rodyklė rodo T-SS-R dangos ir jos pagrindo skersinio pjūvio EDS elementinės sudėties matavimo kryptį. Iš 18 pav. b paveiksle pateiktų EDS kreivių galima nustatyti, kad pagrindo linijiniame EDS spektre vyrauja Fe (apie 97,5 masės %), o T-SS-R dangoje vyrauja Cr (apie 55 masės %) ir Fe (apie 35 masės %), o Ni yra apytiksliai 9 masės %.

Gautasis rezultatas gerokai skiriasi nuo T-SS-R dangos elementinės sudėties EDS tyrimo iš ploto (7 lentelė), kur Fe kiekis (58,85 masės %) daugiau kaip du kartus viršija Cr kiekį (26,03 masės %). Ni kiekis abiem atvejais beveik vienodas. Ši neatitikimą galima paaiškinti nevienodu elementinės sudėties pasiskirstymu dangoje Nr 7, kai, greičiausiai, EDS profilio linija atsitiktinai buvo parinkta toje vietoje, kur buvo didesnė Cr_7C_3 karbido koncentracija.

Rentgeno spinduliuotės difrakcinės analizės metodas (XRD) patvirtina EDS tyrimo rezultatus (37 pav.). Tam, kad gautume XRD tyrimams tinkamą lygų paviršių, dangos paviršius buvo truputį pašlifuotas.



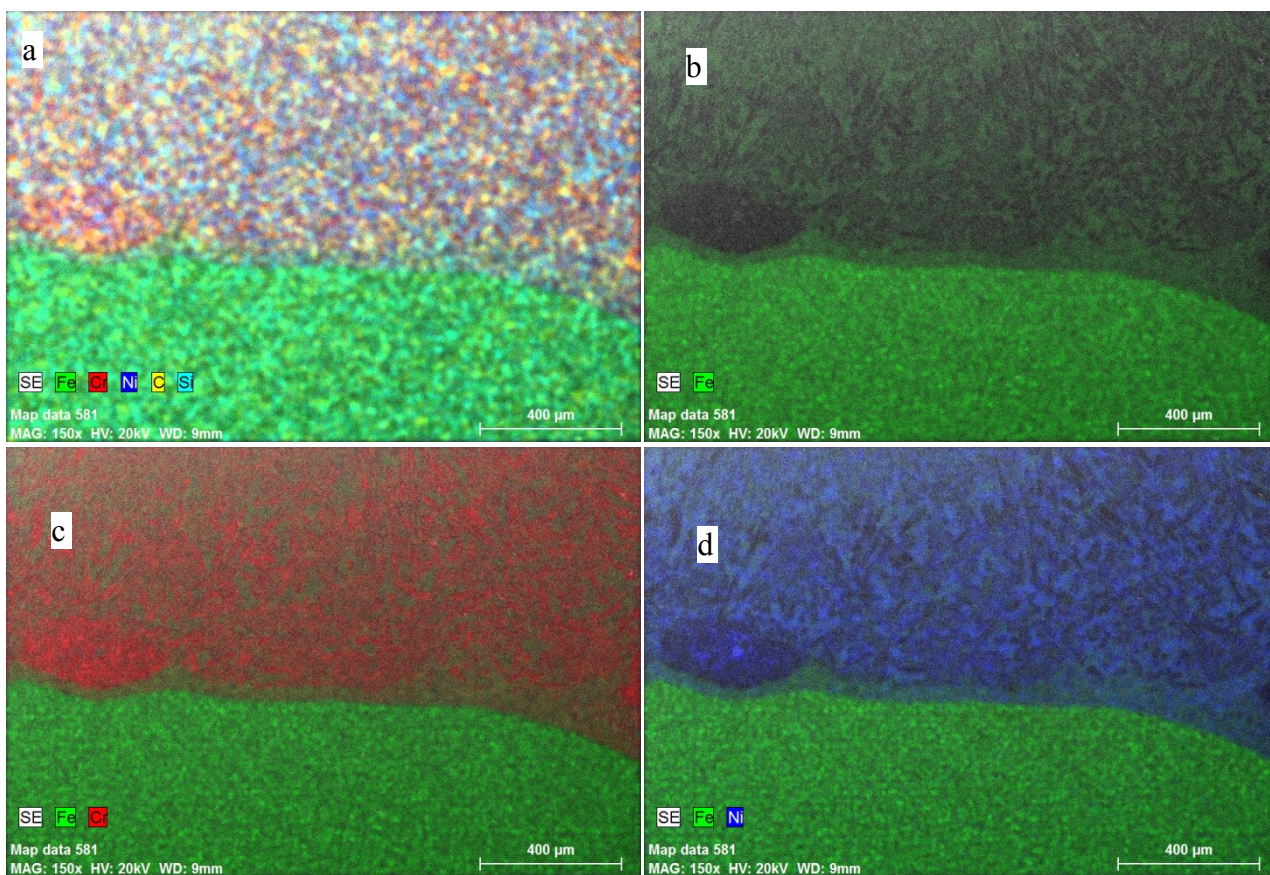
37 pav. T-SS-R dangos dangos paviršiaus XRD analizė

Juoda kreivė – eksperimentinė Nr 7 dangos difraktograma, mėlyna kreivė – $\text{Cr}_{0,19}\text{Fe}_{0,7}\text{Ni}_{0,11}$ standarto difrakcinis profilis, raudona kreivė – Cr_7C_3 standarto difrakcinis profilis

T-SS-R dangos difraktogramoje galima identifikuoti du pagrindinius junginius, t.y. $\text{Cr}_{0,19}\text{Fe}_{0,7}\text{Ni}_{0,11}$ kietąjį tirpalą (kubinė gardelė, $Fm\bar{3}m$ erdvinė grupė) ir Cr_7C_3 karbidą (ortorombinė gardelė, $Pmcm$ erdvinė grupė). XRD metodu gautasis rezultatas labai panašus į EDS dangos tyrimą iš ploto (1 lentelė). Nes jei prie XRD nustatyto kietojo tirpalo ($\text{Cr}_{0,19}\text{Fe}_{0,7}\text{Ni}_{0,11}$) elementinės sudėties pridėtume karbido Cr kiekį, tai sumoje gautume ir Cr ir Fe kiekius artimus EDS tyrimui iš ploto. Reikia pažymėti, kad difrakcijos standartų duomenų bazėje nėra visų galimų kietųjų tirpalų elementinių sudėčių standartų, todėl mūsų atveju buvo parinktas artimiausias T-SS-R dangos sudėčiai standartas (jo profilis geriausiai atitiko dangos XRD profilį). Taip pat, reikėtų pažymėti, kad difraktogramoje (4 pav.) yra nedidelis Cr_7C_3 karbido standarto difrakcinių maksimumų nesutapimas su dangos eksperimentinės kreivės difrakciniais maksimumais (ypač pastebimas 76 - 85 laipsnių kampų intervale). Tai galima paaiškinti tuo, kad dangoje esantis Cr karbidas nėra tiksliai Cr_7C_3 stechiometrinės sudėties, t.y. dalis Cr atomų karbido gardelėje gali būti pakeisti Fe. Tai

iškraipo karbido gardelę, o difraktogramoje pasireiškia difraccinių maksimumų pasislinkimu didesnių (jei gardelė mažėja) ar mažesnių (jei gardelė didėja) kampų link.

Netolygų elementinės sudėties pasiskirstymą dangoje galime pastebėti ir elementinės sudėties žemėlapiuose (38 pav.).



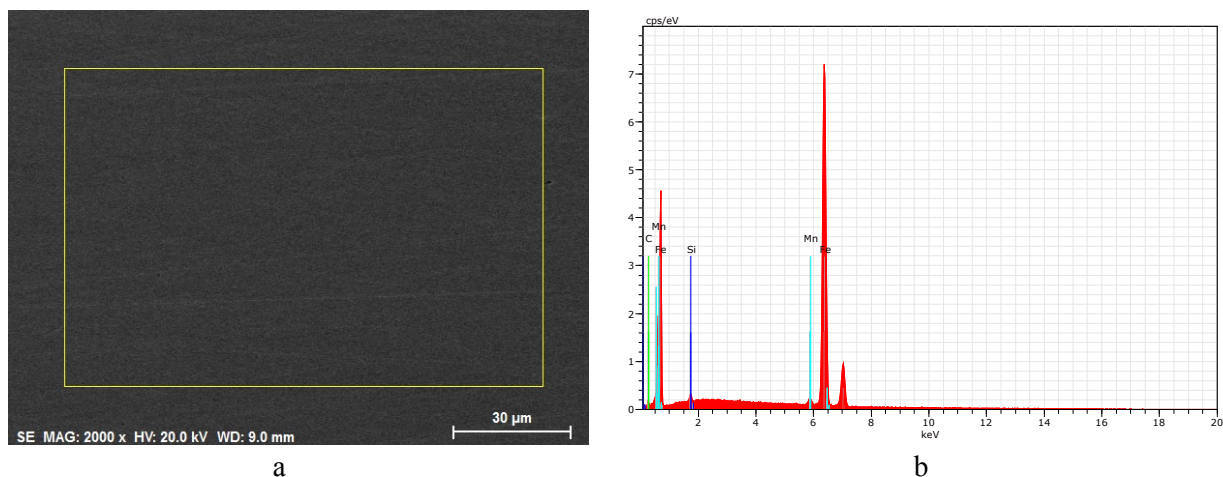
38 pav. Elementinės sudėties pasiskirstymas T-SS-R dangos ir jos pagrinde (skersinis pjūvis).

a – Fe, Cr, Ni, C, ir Si; b – Fe; c – Fe ir Cr; d – Fe ir Ni

38 paveiksle galime pastebėti ryškią zoną, kurioje beveik nėra Fe (38 pav. b), bet vyrauja Cr (38 pav. c) ir C (38 pav. a).

3.2.2. T-Ni-R danga

SEM nuotraukoje geltonu stačiakampiu apibrėžta pagrindinio metalo (pagrindo) EDS tyrimo sritis (39 pav. a), kurios EDS spektras pateiktas 39 pav. b.



39 pav. T-Ni-R dangos pagrindo SEM ir EDS analizės rezultatai

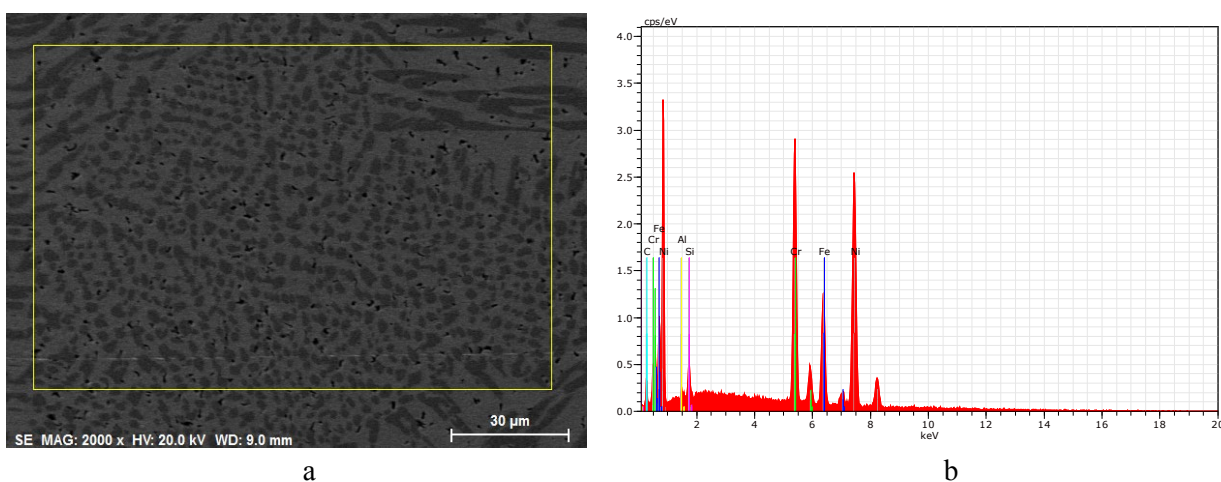
a – T-Ni-R dangos pagrindo SEM nuotrauka, b – T-Ni-R dangos pagrindo EDS spektras

T-Ni-R dangos pagrindo elementinė sudėtis svorio procentais (masės.%) ir atominiais procentais (at.%) pateikta 8 lentelėje.

9 lentelė. T-Ni-R dangos pagrindo metalo elementinė sudėtis

| Element | Series | unn. C [wt.%] | norm. C [wt.%] | Atom. C [at.%] | Error (3 Sigma) [wt.%] |
|-----------|----------|---------------|----------------|----------------|------------------------|
| Iron | K-series | 86,52 | 95,55 | 86,67 | 7,00 |
| Carbon | K-series | 2,40 | 2,65 | 11,19 | 2,04 |
| Silicon | K-series | 0,50 | 0,55 | 0,99 | 0,16 |
| Manganese | K-series | 1,13 | 1,25 | 1,15 | 0,20 |
| Total: | | 90,56 | 100,00 | 100,00 | |

SEM nuotraukoje geltonu stačiakampiu apibrėžta T-Ni-R dangos EDS tyrimo zona (40 pav. a), kurios EDS spektras pateiktas 40 pav. b



40 pav. T-Ni-R dangos SEM ir EDS analizės rezultatai

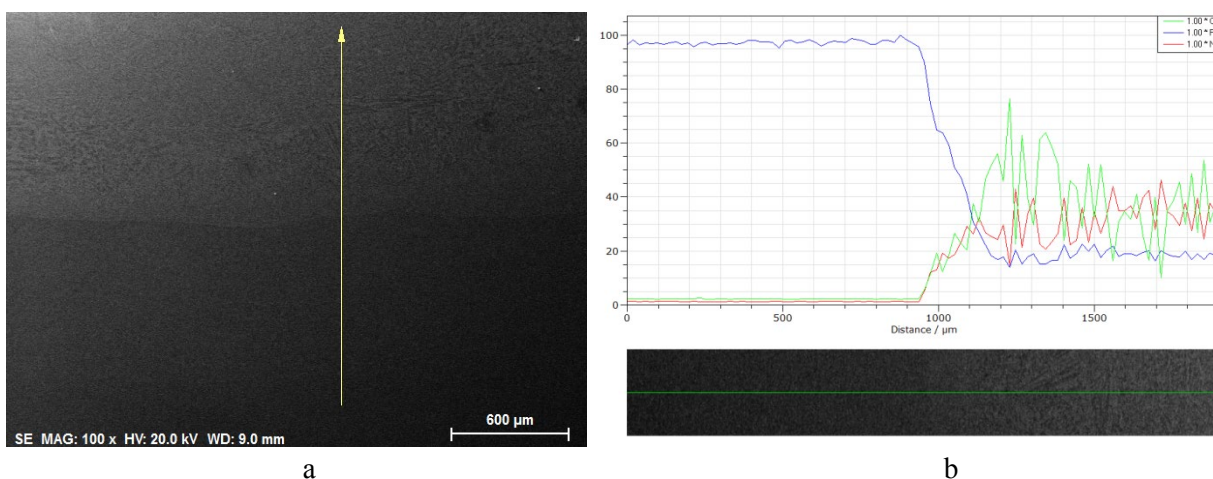
a – T-Ni-R dangos SEM nuotrauka, b – T-Ni-R dangos EDS spektras

T-Ni-R dangos elementinė sudėtis svorio procentais (masės %) ir atominiais procentais (at.%) iš 40 pav. a apibrėžto ploto pateikta 9 lentelėje.

10 lentelė. T-Ni-R dangos elementinė sudėtis

| Element | Series | unn. C [wt.] | norm. C [wt. %] | Atom. C [at. %] | Error (3 Sigma) [wt. %] |
|-----------|----------|------------------|--------------------|--------------------|----------------------------|
| Nickel | K-series | 43,66 | 50,14 | 37,50 | 3,79 |
| Chromium | K-series | 21,65 | 24,87 | 20,99 | 1,93 |
| Iron | K-series | 14,06 | 16,14 | 12,69 | 1,35 |
| Carbon | K-series | 6,22 | 7,15 | 26,13 | 5,14 |
| Silicon | K-series | 1,18 | 1,35 | 2,12 | 0,29 |
| Aluminium | K-series | 0,30 | 0,35 | 0,57 | 0,17 |
| Total: | | 87,08 | 100,00 | 100,00 | |

T-Ni-R dangos elementinės sudėties tyrimas EDS linijinio profilio metodu parodytas 41 paveiksle.



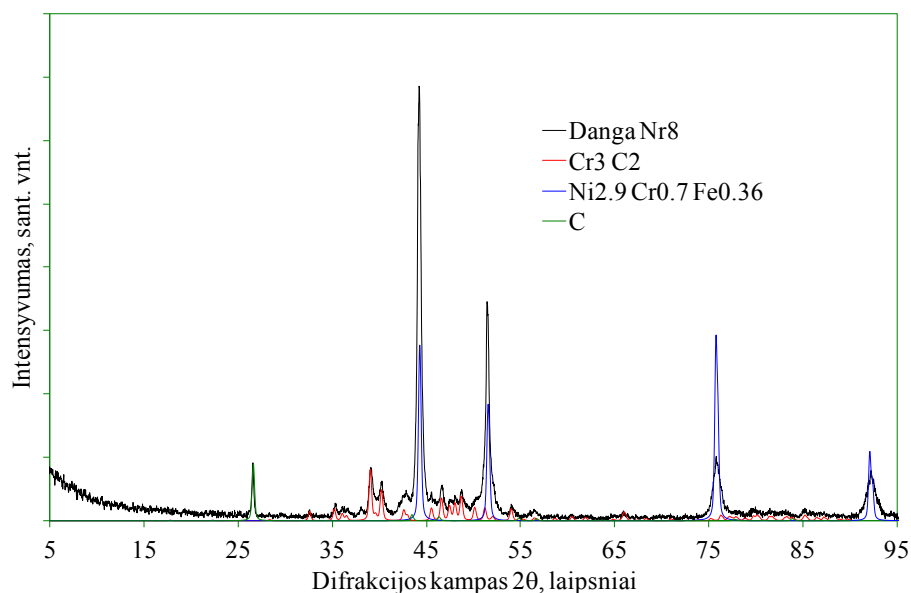
41 pav. T-Ni-R dangos elementinės sudėties tyrimas EDS metodu

a – T-Ni-R dangos ir jos pagrindo skersinio pjūvio SEM nuotrauka, b – T-Ni-R dangos ir jos pagrindo skersinio pjūvio linijinio profilio EDS spektras

41 pav. a geltona rodyklė rodo T-Ni-R dangos ir jos pagrindo skersinio pjūvio EDS elementinės sudėties matavimo kryptį. Iš 23 pav. b pateiktų kreivių galima nustatyti, kad pagrindo linijiniame EDS spektre vyrauja Fe (apie 98 masės %), tuo tarpu T-Ni-R dangoje elementinė sudėtis svyruoja: Cr ~ 50-35 masės%, Ni ~ 30-35 masės % ir Fe – apytiksliai 17,5-20 masės %.

Šiuo atveju, kaip ir anksčiau, T-Ni-R dangos EDS tyrimo iš ploto elementinės sudėties kiekiai: Cr - 24,87 masės %, Ni – 50,14 masės % ir Fe – 14,06 masės % (9 lentelė) gana smarkiai skiriasi nuo EDS linijinio profilio matavimų rezultatų (41 pav. b).

Rentgeno spinduliuotės difrakcinės analizės metodu (XRD) gauti T-Ni-R dangos fazinės sudėties rezultatai (42 pav.), kaip ir T-SS-R dangos atveju, gerai sutampa su EDS iš ploto tyrimo duomenimis (9 lentelė). Dangos paviršius taip pat buvo truputį šlifuotas.

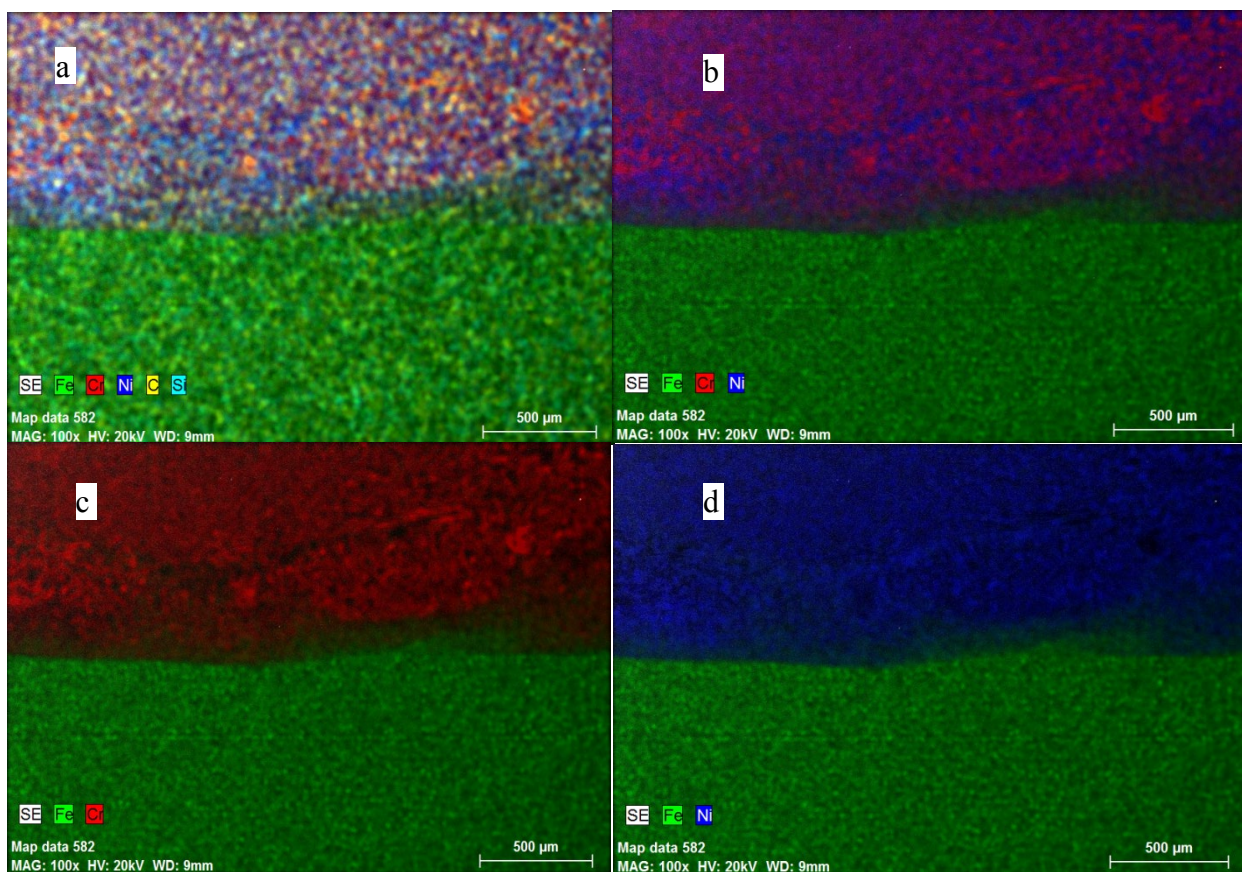


42 pav. T-Ni-R dangos paviršiaus XRD analizė.

Juoda kreivė – eksperimentinė Nr8 dangos difraktograma, mėlyna kreivė – $\text{Ni}_{2,9} \text{Cr}_{0,7} \text{Fe}_{0,36}$ standarto difrakcinis profilis, raudona kreivė – $\text{Cr}_3 \text{C}_2$ standarto difrakcinis profilis, žalia kreivė – C grafito standarto difrakcinis profilis

T-Ni-R dangos difraktogramoje skirtingai nei T-SS-R galima identifikuoti tris pagrindinius junginius, t.y. kietąjį $\text{Ni}_{2,9} \text{Cr}_{0,7} \text{Fe}_{0,36}$ tirpalą (kubinė gardelė, $Fm3m$ erdvinė grupė), $\text{Cr}_3 \text{C}_2$ karbidą (ortorombinė gardelė, $Pnam$ erdvinė grupė) ir C grafitą (romboedrinė gardelė, $R3$ erdvinė grupė). Nustatyti vyraujantys kietieji tirpalai abiejose dangose gana stipriai skiriasi savo elementine sudėtimi (T-SS-R dangoje vyrauja Cr, o T-Ni-R dangoje – Ni). Taip pat skiriasi ir karbidai: T-SS-R dangoje identifikuojamas $\text{Cr}_7 \text{C}_3$ karbidas, o T-Ni-R dangoje – $\text{Cr}_3 \text{C}_2$. Be to, Nr8 dangoje buvo nustatytas grafitas.

Elementinės sudėties pasiskirstymą T-Ni-R dangoje gerai iliustruoja EDS žemėlapiai (43 pav.)



43 pav. Elementinės sudėties pasiskirstymas pagrinde ir T-Ni-R dangoje (skersinis pjūvis).

a – Fe, Cr, Ni, C, ir Si, b – Fe, Cr ir Ni, c – Fe ir Cr d – Fe ir Ni

T-Ni-R dangoje (43 pav. b ir c) matome netolygų Ni pasiskirstymą, bei atskiras Cr sankauptų saleles, kuriose taip pat pastebimas ir C padidėjimas (43 pav. a). Salelės greičiausiai yra Cr karbidai.

4. Išvados

Baigiamajame magistro projekte tirtos TIG galimybės formuoti dilimui atsparias dangas bei Cr₃C₂-Ni elementų įtaka austenitinio nerūdijančio plieno ir Ni pagrindo matricoms. Apibendrinant gautus rezultatus galima padaryti tokias išvadas:

1. Norint taikyti TIG (GTAW) metodą dilimui atsparioms dangoms formuoti būtina kruopščiai parinkti parametrus, kurie lemia formuojamos dangos kokybę. Tai yra suvirinimo srovė, volframo elektrodo diametras ir rūšis, apsauginių dujų rūšis ir jų debitas bei suvirinimo greitis. Ypatingai didelę reikšmę turi šilumos įvesties dydis. Tai pagrindinis rodiklis leidžiantis tinkamai parinkti režimus norint gauti tinkamos kokybės dangą. Tirtuoju atveju optimaliausi suvirinimo parametrai parinkti tokie: 55 A suvirinimo srovė, 2,4 mm skersmens WL20 volframo elektrodas, 99,997% grynumo apsauginės Argono dujos ir 5 l/min apsauginių dujų srautas suvirinimo vonėlei apsaugoti. Optimalus pravedimo greitis miltelių sulydymui yra 1,4 mm/s.
2. Cr₃C₂-Ni dalelės yra tinkamas sustiprinimas matricai formuojant dilimui atsparias dangas TIG metodu. Pastaroji technologija leidžia pasiekti geresnius dangų atsparumo dilimui rezultatus lyginant su SAW metodu taikant tas pačias medžiagas. Miltelių medžiagų naudojimas įgalina suformuoti grynas dangas be papildomų elementų priemaišų.
3. TIG metodu suformuotoje dangoje yra didesnis kiekis karbidų dalelių nei SAW metodu gautoje dangoje, tačiau mažesnis nei PTAW metodu suformuotoje dangoje. Dangų kietumas labai padidėjo į matricą įmaišius Cr₃C₂-Ni dalelių kaip stiprinančiojo elemento.
4. TIG metodu suformuotos dangos ypatingai didelis atsparumas abrazyviniui dilimui nustatytas taikant trijų kūnų dilimo testavimo metodą. Gauti rezultatai 15 kartų didesni už SAW technologija suformuotos dangos ir 2,6 karto didesni už PTAW metodu suformuotos dangos rezultatus. Taikant dviejų kūnų dilimo metodą gautos dangos atsparumas dilimui buvo 2 – 6 kartus didesnis nei SAW metodu gautos dangos ir 2 – 4 kartais mažesnis lyginant su PTAW metodu suformuotos dangos dilimo rezultatais.
5. Dangų elementinės sudėties tyrimas EDS iš ploto metodu gerai sutampa su XRD fazinės analizės rezultatais. Dangų elementinės sudėties tyrimas EDS linijinio profilio metodu vaizdžiai parodo elementų pasiskirstymą dangoje, tačiau, dėl netolygaus elementų išsidėstymo, gali būti netikslus. XRD metodu nustatyta, kad dangoje Nr7 vyrauja Cr_{0,19} Fe_{0,7} Ni_{0,11} kietasis tirpalas (kubinė gardelė, *Fm3m* erdvinė grupė) ir Cr₇ C₃ karbidas (ortorombinė gardelė, *Pmcm* erdvinė grupė), o dangoje Nr8 – Ni_{2,9} Cr_{0,7} Fe_{0,36} kietasis tirpalas (kubinė gardelė, *Fm3m* erdvinė grupė), Cr₃ C₂ karbidas (ortorombinė gardelė, *Pnam* erdvinė grupė) ir C grafitas (romboedrinė gardelė, *R3* erdvinė grupė).

6. Nesustiprinto austenitinio nerūdijančio plieno dangų kietumo rezultatai nėra labai veikiami taikomos technologijos panaudojimo dangų formavimo procese. Vidutinis dangų kietumas gautas 200 HV/30. Tačiau dangas formuojant Ni pagrindu buvo galima pastebėti taikomos technologijos įtaką. Šiuo atveju didžiausias dangos kietumas gautas suformavus PTAW metodu. Cr_3C_2 -Ni elemento panaudojimas kaip sustiprinimo matricoje kietumo rezultatus padidina vidutiniškai 2 kartus taikant bet kurią iš trijų technologijų. TIG ir PTAW metodu ši reikšmė gaunama dar didesnė (atitinkamai 2,7 karto PTAW ir 2,8 karto TIG technologijoms).

Literatūros sąrašas

1. Cheniti, B., Miroud, D., Badji, R., Allou, D., Csanádi, T., Fides, M., & Hvizdoš, P. (2017). Effect of brazing current on microstructure and mechanical behavior of WC-Co/AISI 1020 steel TIG brazed joint. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 64, 210-218;
2. Shibe, V., & Chawla, V. (2013). An overview of research work in hardfacing. *Mechanica Confab*, 2(3), 105-110.
3. Digambar, B., & Choudhary, D. (2014). A review paper on hardfacing processes, materials, objectives and applications. *International Journal of Science and Research*, 3(6), 2400-2402;
4. Pal, K., & Kumar, V. (2014). Effect of Activated TIG welding on wear properties and dilution. percentage in medium carbon steel welds, journal Emerging Technology and advanced Engineering vol. 4;
5. Pradeep, G. R. C., Ramesh, A., & Prasad, B. D. (2013). Comparative study of hardfacing of AISI 1020 steel by three different welding processes. *Global Journal of Research In Engineering*;
6. Miranda, R. M., Gandra, J. P., Vilaca, P., Quintino, L., & Santos, T. G. (2013). *Surface modification by solid state processing*. Woodhead Publishing;
7. Cheniti, B., Miroud, D., Badji, R., Allou, D., Csanádi, T., Fides, M., & Hvizdoš, P. (2017). Effect of brazing current on microstructure and mechanical behavior of WC-Co/AISI 1020 steel TIG brazed joint. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 64, 210-218;
8. Saha, A., & Mondal, S. C. (2017). Multi-objective optimization of manual metal arc welding process parameters for nano-structured hardfacing material using hybrid approach. *Measurement*, 102, 80-89;
9. Alvarez-Vera, M., Torres-Méndez, J. C., Hdz-García, H. M., Muñoz-Arroyo, R., Mtz-Enriquez, A. I., Acevedo-Dávila, J. L., & Hernandez-Rodriguez, M. A. L. (2019). Wear resistance of TiN or AlTiN nanostructured Ni-based hardfacing by PTA under pin on disc test. *Wear*, 426, 1584-1593;
10. Sridharan, N., Cakmak, E., & Dehoff, R. R. (2019). Microstructure evolution during laser direct energy deposition of a novel Fe-Cr-Ni-WB hardfacing coating. *Surface and Coatings Technology*, 358, 362-370;
11. Sridharan, N., Dehoff, R. R., Jordan, B. H., & Babu, S. S. (2016). *Development of coatings for ultrasonic additive manufacturing sonotrode using laser direct metal deposition process* (No. ORNL/TM-2016/535). Oak Ridge National Lab.(ORNL), Oak Ridge, TN (United States);

12. Cabrol, E., Boher, C., Vidal, V., Rezaï-Aria, F., & Touratier, F. (2019). A correlation between tribological behavior and crystal structure of cobalt-based hardfacings. *Wear*, *426*, 996-1007;
13. Lai, Q., Abrahams, R., Yan, W., Qiu, C., Mutton, P., Paradowska, A., ... & Wu, X. (2018). Effects of preheating and carbon dilution on material characteristics of laser-cladded hypereutectoid rail steels. *Materials Science and Engineering: A*, *712*, 548-563;
14. Meng, L., Zhao, W., Hou, K., Kou, D., Yuan, Z., Zhang, X., ... & Zeng, X. (2019). A comparison of microstructure and mechanical properties of laser cladding and laser-induction hybrid cladding coatings on full-scale rail. *Materials Science and Engineering: A*, *748*, 1-15;
15. Ahmad, M. A., Sheikh, A. K., & Nazir, K. (2019). Design of experiment based statistical approaches to optimize submerged arc welding process parameters. *ISA transactions*;
16. Holub, L., Dunovský, J., Kovanda, K., & Kolařík, L. (2015). SAW–Narrow Gap Welding CrMoV Heat-resistant Steels Focusing to the Mechanical Properties Testing. *Procedia Engineering*, *100*, 1640-1648;
17. Barbosa, L. H. S., Modenesi, P. J., Godefroid, L. B., & Arias, A. R. (2019). Fatigue crack growth rates on the weld metal of high heat input submerged arc welding. *International Journal of Fatigue*, *119*, 43-51;
18. Abed, H., Ghaini, F. M., & Shahverdi, H. R. (2018). Characterization of Fe49Cr18Mo7B16C4Nb6 high-entropy hardfacing layers produced by gas tungsten arc welding (GTAW) process. *Surface and Coatings Technology*, *352*, 360-369;
19. Lin, Y. C., Chen, H. M., & Chen, Y. C. (2013). Analysis of microstructure and wear performance of SiC clad layer on SKD61 die steel after gas tungsten arc welding. *Materials & Design*, *47*, 828-835;
20. Sadeghi, F., Najafi, H., & Abbasi, A. (2017). The effect of Ta substitution for Nb on the microstructure and wear resistance of an Fe-Cr-C hardfacing alloy. *Surface and Coatings Technology*, *324*, 85-91;
21. Lai, H. H., Hsieh, C. C., Lin, C. M., & Wu, W. (2016). Effects of vanadium content on the microstructure and dry sand abrasive wear of a eutectic Cr-Fe-C hardfacing alloy. *Metals and Materials International*, *22*(1), 101-107;
22. Mirshekari, G. R., Daei, S., Bonabi, S. F., Tavakoli, M. R., Shafyei, A., & Safaei, M. (2017). Effect of interlayers on the microstructure and wear resistance of Stellite 6 coatings deposited on AISI 420 stainless steel by GTAW technique. *Surfaces and Interfaces*, *9*, 79-92;
23. e Silva, R. H. G., Riffel, K. C., Okuyama, M. P., & Dalpiaz, G. (2019). Effect of dynamic wire in the GTAW process. *Journal of Materials Processing Technology*, *269*, 91-101;

24. Rafiei, M., Ghayour, H., Mostaan, H., & Hosseini, M. Z. (2019). The effect of Vaddition on microstructure and tribological properties of Fe-Ti-C claddings produced by gas tungsten arc welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 266, 569-578;
25. e Silva, R. H. G., dos Santos Paes, L. E., Okuyama, M. P., de Sousa, G. L., Viviani, A. B., Cirino, L. M., & Schwedersky, M. B. (2018). TIG welding process with dynamic feeding: a characterization approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96(9-12), 4467-4475;
26. Xinhong, W., Lin, C., Min, Z., & Zengda, Z. (2009). Fabrication of multiple carbide particles reinforced Fe-based surface hardfacing layer produced by gas tungsten arc welding process. *Surface and Coatings Technology*, 203(8), 976-980;
27. Buytoz, S., Ulutan, M., & Yildirim, M. M. (2005). Dry sliding wear behavior of TIG welding clad WC composite coatings. *Applied Surface Science*, 252(5), 1313-1323;
28. Mannion, B., & Heinzman, J. (2001). Determining parameters for GTAW: starting points for success;
29. Lailatul, P. H., & Maleque, M. A. (2017). Surface Modification of Duplex Stainless Steel with SiC Preplacement Using TIG Torch Cladding. *Procedia engineering*, 184, 737-742;
30. Thakur, P. P., & Chapgaon, A. N. (2016). A Review on Effects of GTAW Process Parameters on weld. *IJRASET*, 4, 136-140;
31. Hadji, Y., Haddad, A., Yahi, M., Benamar, M. E. A., Miroud, D., Sahraoui, T., ... & Barsoum, M. W. (2016). Joining Ti₃SiC₂ MAX phase with 308 stainless steel and aluminum fillers by tungsten inert gas (TIG)-brazing process. *Ceramics International*, 42(1), 1026-1035;
32. Shahroozi, A., Afsari, A., & Khakan, B. (2018). Microstructure and mechanical properties investigation of stellite 6 and Stellite 6/TiC coating on ASTM A105 steel produced by TIG welding process. *Surface and Coatings Technology*, 350, 648-658;
33. Liu, Z., Fang, Y., Chen, S., Zhang, T., Lv, Z., & Luo, Z. (2019). Focusing cathode tip characteristics in cooling tungsten. *Energy*, 167, 982-993;
34. Haidar, J., & Farmer, A. J. D. (1995). Surface temperature measurements for tungsten-based cathodes of high-current free-burning arcs. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 28(10), 2089;
35. Kutelu BJ, Seidu SO, Eghabor GI, Ibitoye AI. Review of GTAW Welding Parameters. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. 2018 Aug 6;6(05):541;
36. Tungsten Guidebook Revision: 8.0 2013 Jun;
37. Anbarasan, N., & Jerome, S. (2018). Effect of flow rate and argon-hydrogen shielding gas mixture on weld bead morphology of inconel 718. *Materials Today: Proceedings*, 5(13), 26990-26996;

38. Bitharas, I., Campbell, S. W., Galloway, A. M., McPherson, N. A., & Moore, A. J. (2016). Visualisation of alternating shielding gas flow in GTAW. *Materials & Design*, 91, 424-431;
39. Lai, Q., Abrahams, R., Yan, W., Qiu, C., Mutton, P., Paradowska, A., ... & Wu, X. (2019). Influences of depositing materials, processing parameters and heating conditions on material characteristics of laser-cladded hypereutectoid rails. *Journal of Materials Processing Technology*, 263, 1-20;
40. Guo, Z., Jie, J., Liu, S., Zhang, Y., Qin, B., Wang, T., & Li, T. (2019). Effect of V addition on microstructures and mechanical properties of Cu-15Ni-8Sn alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 748, 85-94;
41. Heigel, J. C., Gouge, M. F., Michaleris, P., & Palmer, T. A. (2016). Selection of powder or wire feedstock material for the laser cladding of Inconel® 625. *Journal of Materials Processing Technology*, 231, 357-365;
42. Li, Q., Song, P., Ji, Q., Huang, Y., Li, D., Zhai, R., ... & Lu, J. (2019). Microstructure and wear performance of arc-sprayed Al/316L stainless-steel composite coating. *Surface and Coatings Technology*;
43. Zhang, H., Zhang, C. H., Wang, Q., Wu, C. L., Zhang, S., Chen, J., & Abdullah, A. O. (2018). Effect of Ni content on stainless steel fabricated by laser melting deposition. *Optics & Laser Technology*, 101, 363-371;
44. Kaunisto, K., Kotilainen, M., Karhu, M., Lagerbom, J., Vuorinen, T., Honkanen, M., ... & Turunen, E. (2018). The effect of carbon and nickel additions on the precursor synthesis of Cr₃C₂-Ni nanopowder. *Ceramics International*, 44(8), 9338-9346;
45. Shukla, V. N., Trivedi, H., & Kumar, H. (2017). Surface Engineering Analysis of D-Gun Sprayed Cermet Coating in Aggressive Environment. *Materials Today: Proceedings*, 4(9), 10212-10215;
46. Zhai, W., Gao, Y., Sun, L., He, L., & Wang, Y. (2018). Improvement of high temperature oxidation behavior of Cr₃C₂-20 wt% Ni cermets by adding 1 wt% Mo. *Journal of Alloys and Compounds*, 731, 271-278;
47. Tkachivskiy, D., Juhani, K., Surženkov, A., Kulu, P., Viljus, M., Traksmäa, R., ... & Leišys, R. (2019). Production of Thermal Spray Cr₃C₂-Ni Powders by Mechanically Activated Synthesis. In *Key Engineering Materials* (Vol. 799, pp. 31-36). Trans Tech Publications;
48. Sarjas, H., Kulu, P., Juhani, K., Viljus, M., Matikainen, V., & Vuoristo, P. (2016). Wear resistance of HVOF sprayed coatings from mechanically activated thermally synthesized Cr³C²-Ni spray powder. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 65(2), 101;
49. University of Babylon, College of Engineering ,Engineering Materials, Maithem H Rasheed. Prieiga per internetą: http://www.uobabylon.edu.iq/eprints/publication_4_12324_199.pdf;
50. Zwick /Roell gaminio informacija. 5030SKV ir TKV Vikerso kietumo matavimo mašinos. Prieiga per internetą: http://www.indentec.com/leaflets/vickers_5030SKVTKV.pdf;

51. Gong, K., Luo, H., Feng, D., & Li, C. (2008). Wear of Ni₃Al-based materials and its chromium-carbide reinforced composites. *Wear*, 265(11-12), 1751-1755;
52. Sabzi, M., Dezfuli, S. M., & Far, S. M. (2018). Deposition of Ni-tungsten carbide nanocomposite coating by TIG welding: Characterization and control of microstructure and wear/corrosion responses. *Ceramics International*, 44(18), 22816-22829;
53. Bendikiene, R., Pupelis, E., & Kavaliauskiene, L. (2016). Effects of surface alloying and laser beam treatment on the microstructure and wear behaviour of surfaces modified using submerged metal arc welding. *Materials Science*, 22(1), 44-48;
54. García, C., Martín, F., Herranz, G., Berges, C., & Romero, A. (2018). Effect of adding carbides on dry sliding wear behaviour of steel matrix composites processed by metal injection moulding. *Wear*, 414, 182-193;

Priedai

1 priedas. Mokslinių rezultatų sklaida:

- Straipsniai;
- Konferencijos, seminarai;
- Projektai

Wear behaviour of Cr₃C₂-Ni cermet reinforced hardfacings

Regita Bendikiene ^{a*}, Antanas Ciuplys ^a, Rolandas Sertvytis ^a, Andrei Surzhenkov ^b, Dmytro Tkachivskyi ^b,

^a *Department of Production Engineering, Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology, Studentu str. 56, LT-51424 Kaunas, Lithuania*

* regita.bendikiene@ktu.lt

^b *Department of Mechanical and Industrial Engineering, Tallinn University of Technology, Ehitajate tee 5, EE-19086 Tallinn, Estonia*

Highlights

- Cr₃C₂-Ni reinforcement reduce the abrasive wear rate of austenitic stainless steel and Ni-based hardfacings.
- SEM of the worn surfaces suggests both micro-cutting and micro-ploughing mechanisms.

Abstract

Submerged arc welding (SAW), plasma transferred arc welding (PTAW), and tungsten inert gas welding (TIG) technologies were used to produce austenitic stainless steel (SS) and nickel alloy (Ni) matrix based hardfacings without reinforcement and reinforced by Cr₃C₂-Ni cermet.

Keywords: Cermet reinforcement; Wear resistance; Abrasive wear; submerged arc welding; Plasma transferred arc welding; Tungsten inert gas cladding.

1. Introduction

The failure of any engineering component is understood as loss of its performance or functions, and mainly could be of four general types: wear, deformation, fracture, and corrosion. Data from real engineering cases states that wear comprises approximately 55% of the total failures; in this amount abrasion wear makes up to 20% [1]. These numbers indicate the importance searching of new abrasive wear solutions. Owing to the great importance of surfaces of engineering components, surface engineering and metallurgy has the great practical value, especially by the fact that these technologies allow to manufacture engineering components which exhibit high wear, corrosion or oxidation resistance, as well as self-lubrication properties without changing the substrate material [2]. Such the properties enable to use components under the different severe conditions. Hardfacings are produced (deposited, welded or sprayed) as the protective layer on the substrate, component or tool that are intend to be subjected to critical wear and temperature conditions. Nickel or carbide based alloys have found their application in the industries where high thermal, corrosion resistance along with high wear resistance are required. This advantage is caused by their chemical composition – by presence of wide range of alloying elements, particularly by the existence of the austenitic matrix phase with carbides and further precipitation hardening effect [3, 4, 5]. The components performance at harsh temperatures and corrosion environment such as chemical and aerospace industry, electricity generation plants or other industries undergoes abrasion, corrosion, and oxidation at high temperature could be increased using nickel based superalloys.

Abrasive wear is probably the most significant factor for the implements in agriculture sector which causes almost all mechanical failures. Farmers complain about the frequent recurrent

work, machine downtime and substitute cost of worn-out implements. The quality of agricultural tools depends on their acting edge characteristics such as surface roughness and hardness. Therefore, implements should be made of material which is able to withstand high impact loads and aggressive wear conditions [6].

There are two basic approaches to reinforce the operating surfaces of any component: ex-situ and in-situ matrix reinforcement. In the ex-situ addition, chemical incompatibility of matrix and reinforcement may lead to poor interfacial bonding because difference in the thermal properties could increase the risk of cracking at the poorly bonded interface. Contrary, in-situ process can remove the interface problem as relatively harder phases are made to grow in the matrix under a suitable thermodynamic conditions [7].

Considerable number of surface modification techniques such as surface deposits, coatings and hardfacing have been developed over the years in order to reduce the problem of abrasive wear of components working under severe wear [8, 9, 10 mūšų straipsniai pabaigoje]. Welding is considered to be an easy and economical method to produce hardfacing. The welding wire electrode is used to form a high wear resistant coating in different welding processes: gas metal arc welding (GMAW) [6], submerged arc welding (SAW) [11 mūšų Cleaner production straipsnis, 12], tungsten inert gas welding (TIG), flux cored arc welding (FCAW). SAW has several advantages, the first one is that process might ensure high deposition rates and good penetration, the second is the possibility to use multiple electrodes and easy reinforcement powder introduction, and the last is a comparatively low welder skills requirement, because process can be easily automated. The SAW hardfacing process involves the fusion of highly alloyed powder, which contains a chromium carbide, graphite, tungsten carbide, manganese, cobalt or other chemical elements by the electric arc under the layer of the flux. [6, 8, 13].

TIG filler free welding process operating under the inert gas shielding is found to be quite effective for the modification of surface properties of metal alloy samples by controlled melting up to a required depth for standard tribological applications at the relatively low cost [7, 14, 15]. The main advantages of TIG process are deep case depths produced at low processing time with less environmental damage executed under a low supplementary and manufacturing cost.

Plasma transfer arc welding (PTAW) is among the most easily automated and adaptable processes to produce the thick hardfacings with low manufacturing cost and high productivity compared with thermal spraying, laser cladding or other similar technologies [16]. The main advantage of such a hardfacing is the density and high thickness which are necessary for application in mining, oil-sand industries, production of mixer blades, furnace chutes, etc. [17, 18]. It was reported that PTAW hardfacings, reinforced with WC-Co particles, provide significantly higher resistance than of generally used wear resistant steels [19]. Powder feeding system generally is used to transfer reinforcement into the arc area. There are a few different powder materials systems that are typical to PTAW: chromium carbide, WC-Ni and WC-Co, etc. [20]. These systems are suitable for SAW and TIG as well.

Numerous reinforcements are used to produce hardfacings for various wear applications where high hardness, high melting point and wear or corrosion resistance along with high thermal stability and conductivity are required. It was reported that the most frequently used reinforcements are WC or WC-based hardmetals [12], Co-based alloys (stellites) [19], Ni-based alloys [4, 5], chromium carbide [3]. Authors suggested application of ferrocobalt and ferrochromium to produce martensitic structure of hardfacing [13]. WC-based cermets (ceramic metal composites) as a reinforcement is used because they combine the hardness of ceramics and the fracture toughness of metals, however, they sensitive to degradation at temperatures above

500 °C [21]. Chromium carbide is known as having excellent oxidation, that is why CrC-based composites are widely used in high-temperature applications where high resistance to wear and corrosion–oxidation required. Usually chromium carbide is combined with a nickel in thermal spray applications. Owing to above mentioned properties such a hardfacings could serve as the barrier coating for high temperature wear applications.

For the present research Cr₃C₂-Ni cermet based reinforcement was used to produce hardfacings; three different hardfacing technologies SAW, TIG, and PTAW were utilized. The influence of technological parameters as well as microstructure on behaviour of hardfacings in two and three body abrasive wear tests were analysed.

2. Materials and methods

The normalized structural steel S355 (EN 10025) has been chosen as the substrate material with chemical composition presented in Table 1 to produce the composite hardfacings provided as bars with 10 × 10 mm cross-section and plates of 5 mm thickness.

Table 1

Chemical composition and S355 used as the substrate (max wt.%)

| Element | C | Mn | P | S | Si | Fe |
|---------|------|------|------|------|------|---------|
| Amount | 0.22 | 1.60 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | balance |

Two compositions of matrix were used in this study: Castolin 16316 (standard austenitic stainless steel EN 1.4436 (EN-X3CrNiMo17-13-3), wt.%: C 0.03, Cr 17.5, Ni 13, Mo 2.7, bal. Fe) and Castolin 16221 (Ni-based self-fluxing alloy, wt.%: C 0.2, Cr 4, B 1, Si 2.5, max. Fe 2, Al 1, bal. Ni) with particle size with mesh – 100+325 μm (Table 2). The matrix of hardfacings produced by SAW was supplemented by 0.1 wt.% of low carbon welding wire. To obtain the reinforcement powder Cr₃C₂-Ni (80 wt.% Cr₃C₂, 20 wt.% Ni), 99.5 wt.% purity Cr with particle size of 6.65 μm and 99.7 wt.% purity Ni with an average particle size of 2.4 μm, and 99.7 wt.% purity carbon with particle size size 6.45 μm were milled, afterwards plasticized and sintered in vacuum at the temperature of 1100 °C [22, 23].

Table 2

Initial chemical composition of hardfacings

| Sample code | Hardfacing method | Matrix, wt.% | Reinforcement [R] |
|-------------|-----------------------------|--|------------------------------------|
| S-SS | Submerged arc welding (SAW) | 99.9 Castolin 16316 +0.1 wire electrode | – |
| S-Ni | | 99.9 Castolin 16221 +0.1 wire electrode | – |
| S-SS-R | | 99.9 Castolin 16316 +0.1 wire electrode | Cr ₃ C ₂ -Ni |
| S-Ni-R | | 99.9 Castolin 16221 +0.1 wire electrode | Cr ₃ C ₂ -Ni |
| P-SS | | Plasma transfer arc welding (PTAW) | Castolin 16316 |
| P-Ni | Castolin 16221 | | – |

| | | | |
|--------|----------------------------|----------------|------------------------------------|
| P-SS-R | | Castolin 16316 | Cr ₃ C ₂ -Ni |
| P-Ni-R | | Castolin 16221 | Cr ₃ C ₂ -Ni |
| T-SS | | Castolin 16316 | – |
| T-Ni | Tungsten inert gas welding | Castolin 16221 | – |
| T-SS-R | (TIG) | Castolin 16316 | Cr ₃ C ₂ -Ni |
| T-Ni-R | | Castolin 16221 | Cr ₃ C ₂ -Ni |

In order to evaluate suitability of technology utilized to produce hardfacings three different methods have been chosen SAW, PTAW, and TIG. Parameters of process were adopted accurately for the specific matrix and reinforcement combination. Surfaces of substrate samples were cleaned to eliminate oxides (or rust), dirt, grease, or oil in the coating area. Dimensions of samples have been chosen according to the requirements of wear test machines.

The single pass SAW process was accomplished on Integra 350 Professional (Miller) (MIG/MAG) using the standard flux AMS1 (LST EN 10204:2004; wt. %: SiO₂ 38–44, MnO 38–44, CaF₂ 6–9, CaO < 6.5, MgO < 2.5, Al₂O₃ < 5, Fe₂O₃ < 2, S 0.15, P 0.1), and low carbon welding wire with diameter of 1.2 mm fed at the velocity of 25.2 m/h to the welding zone under accurately process parameters: welding current 180–200 A, voltage 22–24 V, travel speed–4 mm/s [8].

The PTAW deposits were produced with following process parameters: voltage 22–24 V, current 95 A, oscillation frequency 0.6 Hz, traverse speed 1 mm/s, the flow rates: Ar plasma gas 1.5 l/s, Ar shielding gas 6.5 l/s, carrier gas (Varigon®) 3.75 l/s (reinforcement), 2.75 l/s (matrix) on GAP 3001 DC (Castolin Eutectic®).

AirLiquide SAF-FRO Combiwig 4000 AC/DC (Italy) TIG inverter type of power source was used to produce hardfacings. Extra-large gas lens Jumbo cup (manufacturer TBI, Germany) ensured achievement of optimum results. Non consumable electrode WL20 (manufacturer TBI, Germany) of 1.6 mm in diameter which maintains stable arc and prevents the pool from contamination was chosen. Process parameters: current 60 A, voltage 18 V, travel speed 1.4 mm/s.

Owing to necessity to evaluate and compare influence of Cr₃C₂-Ni reinforcement, hardfacings in each technology were produced with and without reinforcement.

The microstructural images of the hardfacings were studied using (SEM) EVO MA-15 (Carl Zeiss, Germany) scanning electron microscope, equipped with the energy dispersive spectroscopy (EDS) device. The X-ray diffraction (XRD) device AXS D5005 (Bruker, Germany), equipped with a Cu K α radiation source, was used to study the phase composition of produced hardfacings (measuring step – 0.04°).

Mechanical properties of obtained hardfacings were assessed while executing Vickers surface hardness (HV30) test; hardness tester Indentec 5030KV (Zwick/Roell, Germany) at the load of 294.3 N (30 kgf) with dwell time 10 s. Ten measurements were done on each hardfacing, and the average hardness values are presented.

Wear behaviour of hardfacings was examined in two different wear conditions two-body and three-body wear test seeking to find the most suitable abrasive wear application area. Detail information on wear test parameters' presented in Table 3 [20].

Table 3

Wear test parameters

| Test | Standard | Load, N | Rotational speed, 1/s | Linear speed, m/s | Duration, s | Type of abrasive | Abrasive size, mm |
|-------------------------|-----------------------|---------|-----------------------|-------------------|-------------|---|-------------------|
| Two-body ¹ | ASTM G132 | 5 | 1.05 | 0.4 | 3600 | Al ₂ O ₃ ³ | 0.08 – 0.1 |
| Three-body ² | ASTM G65, procedure A | 130 | 3.6 | 2.4 | 1800 | SiO ₂ | 0.2 – 0.3 |

Other details:

¹ Emery paper was changed after each 300 s;

² Abrasive feed rate $(5.0 - 6.7) \times 10^{-2}$ kg/s;

³ Electrocorundum/white aluminium oxide 15A8HM with 8H mesh size

The samples for two-body and three-body wear tests were cut in $6 \times 6 \times 20$ mm and $10 \times 25 \times 50$ mm test pieces respectively.

3. Results and discussion

Microstructural analysis revealed typical Fe based (SS) or Ni-based (Ni) alloys microstructure of unreinforced hardfacings. Addition of Cr₃C₂-Ni particles had the specific influence for each series of hardfacings.

XRD analysis revealed presence of Cr₇C₃, Cr₃C type carbides in SS type hardfacings, while in Ni-based hardfacings – Cr₃C₂ and CrC types dominated [24]. Solid solution of Cr in α -Fe dominates in S-SS-R hardfacings, while just a low amount of retained austenite rich in Ni (γ -Fe), and fewer secondary carbides of Cr₃C can be observed (Fig. 1 a). In the PTAW hardfacings carbides Cr₃C₇, retained austenite along with solid solution of Cr are visible. Possible dissolution of carbon in the retained austenite could be a reason of relatively low amount of secondary carbide phase (Fig. 1 a).

Other chromium carbides Cr₃C₂ and CrC were observed in the S-Ni-R hardfacings with low amount of retained austenite (γ -Fe). Diversely than in the previous XRD charts Ni-based secondary carbides NiC_{0.02} were seen in P-Ni-R (Fig. 1 b).

Reinforcement particles were entirely dissolved in the SAW hardfacings owing to higher welding current which leads to higher heat input during the process, and naturally higher dissolution rate. Moreover, the amount of the Cr₃C₂-Ni particles is considerably lower in SS hardfacing, which is typical to Fe-based hardfacings.

Vickers hardness test results have showed the expected tendency: addition of Cr₃C₂-Ni cermet particles increased the hardness by 1.2 – 1.6 times for SAW, 1.7 – 2.7 for PTAW, and 1.6 – 2.8 TIG hardfacings. The similar tendency can be observed for all hardfacing technologies (Fig. 1).

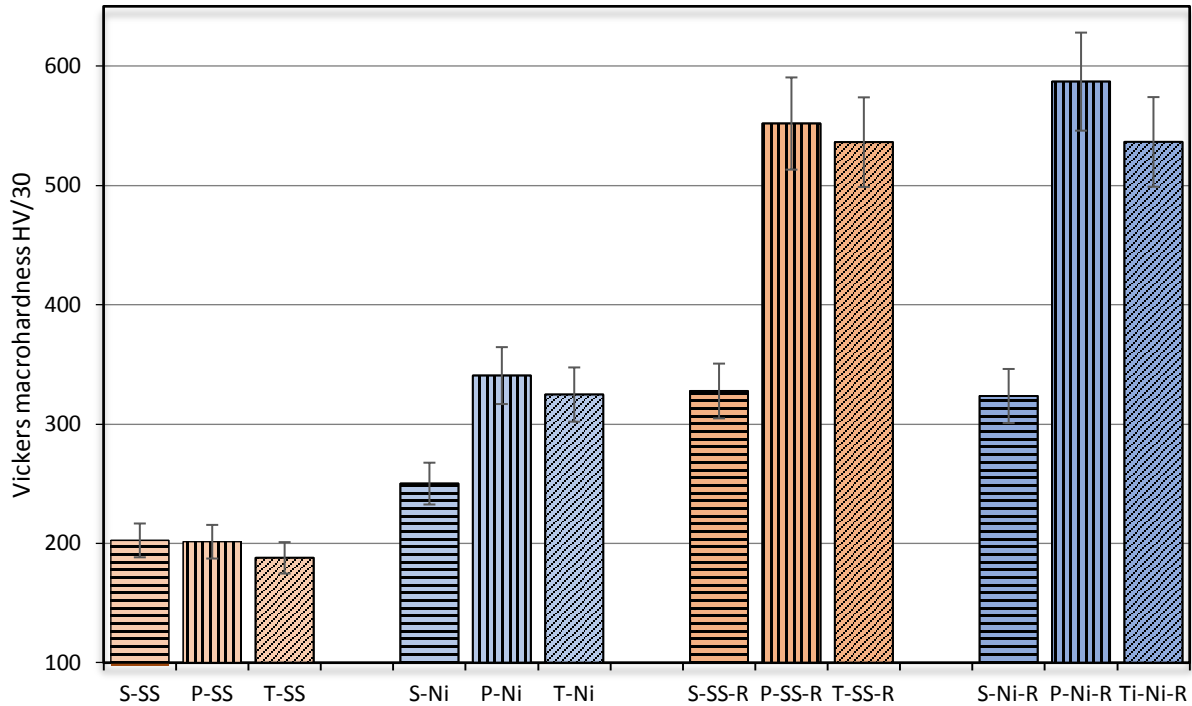


Fig. 1. Vickers hardness of SAW, PTAW and TIG hardfacings

First two sets of columns show surface hardness values of hardfacings without reinforcements. It is clearly seen that different hardfacings' formation technologies do not affect values of Vickers hardness dramatically in case when austenitic stainless steel was used as the matrix (Fig. 1, first set of columns). A slight effect of used technologies was observed on Ni-based matrix (Fig. 1, second set). The two last sets of results have revealed higher influence of process used to produce hardfacings. The higher hardness values were reached in case of PTAW and TIG technologies. It can be explained by higher content of hard cermet particles in the hardfacing, as microstructure analysis of SAW hardfacings showed total fusion of reinforcement. According to the presented results of mechanical tests the leading technology is PTAW. Austenitic stainless steel (SS) matrix reinforced with $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ni}$ (SS-R) showed higher growth of hardness (from 201.4 to 551.8 HV/30 in PTAW, and from 187.9 to 536.2 HV/30 in TIG) comparing with reinforced Ni-based matrix (Ni-R) (from 340.6 to 586.9 HV/30 in PTAW, and 324.7 to 536.4 HV/30 in TIG) because initial hardness of unreinforced SS matrix was less (187.9 – 202.5 HV/30).

The results of the two-body wear tests straight proportional to those of hardness test results (Fig. 2). As two sets of columns in Fig.1 showed lower hardness values, consequently unreinforced SS and Ni hardfacings possessed higher wear ratio (Fig. 2). Wear resistance of reinforced hardfacings confirmed influence of applied technology on wear behaviour: under the two-body abrasive wear conditions, the reinforced SAW hardfacings S-SS-R and S-Ni-R exhibited from 10 or 8 times higher wear respectively than PTAW hardfacings, and from 2 to 6 times – than TIG hardfacings.

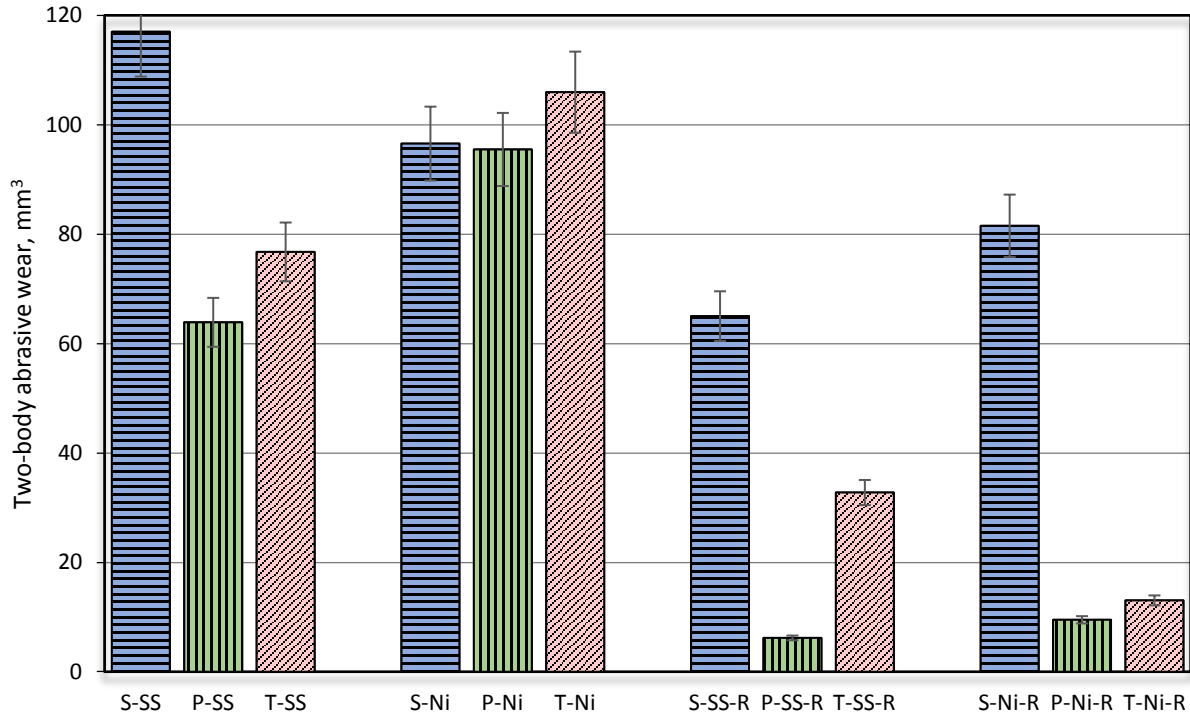


Fig. 2. Comparison of two-body abrasive wear tests of SAW, PTAW, and TIG hardfacings

Parallel to the above mentioned results of two-body wear test, three-body abrasion wear test proved positive effect of $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ni}$ particles [25] addition to the Fe or Ni-based matrix which lead to from 1.4 to 1.8 times for SAW, 8.1 – 8.4 times for PTAW, and 4.1 – 9.0 times lower wear of TIG hardfacings (Fig. 3). Reinforced austenitic stainless steel and Ni-Based alloy SAW and PTAW hardfacings demonstrated nearly the same wear level. It allows to state that both technologies are suitable to produce hardfacings working under the three-body wear test conditions. The growth of wear resistance was more expressed in iron based hardfacings (SS) particularly for PTAW technology. The higher wear resistance of the latter can be explained by the presence of $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ni}$ particles in the hardfacing. As the most reliable cause of comparatively low wear of the SS-R type hardfacings secondary martensitic transformation of the retained austenite [28] can be assumed. As it is clearly depicted in Fig. 3 TIG hardfacings overcame two above mentioned technologies, even unreinforced SS and Ni-based composites showed comparatively low wear 66.77 mm^3 (T-SS) and 45.12 mm^3 (T-Ni). Growth of wear resistance of Ni-based alloy after reinforcement with $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ni}$ was not so high as for SS harfacings.

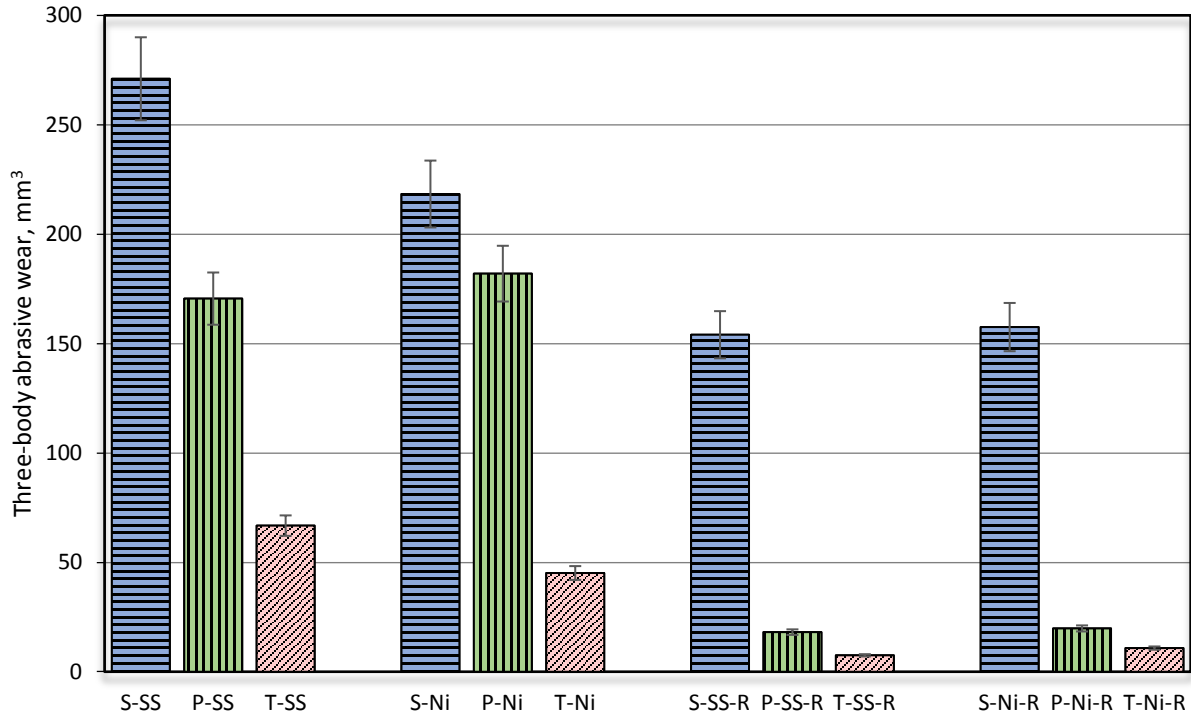


Fig. 3. Comparison of three-body abrasive wear tests of SAW, PTAW, and TIG hardfacings

The lowest overall wear rate in both two-body and three-body abrasive wear tests was observed testing austenitic stainless steel based (SS) Cr_3C_2 -Ni reinforced hardfacings produced by means of PTAW and TIG technologies. As austenitic stainless steel matrix demonstrated more promising results, it was decided to analyse wear mechanism of SS based hardfacings. It was reported that [26] mode of wear mechanism depends on the microstructure and particularly on the formation of secondary phases, therefore optical microscopic analysis before wear tests and SEM analysis of worn surfaces was accomplished.

Surface of unreinforced hardfacings has undergone microploughing under two-body abrasive wear in all three technologies (SAW, PTAW, and TIG) as it is clearly seen in Fig. 4 surface layer was shifted to the opposite sides of the wear track.

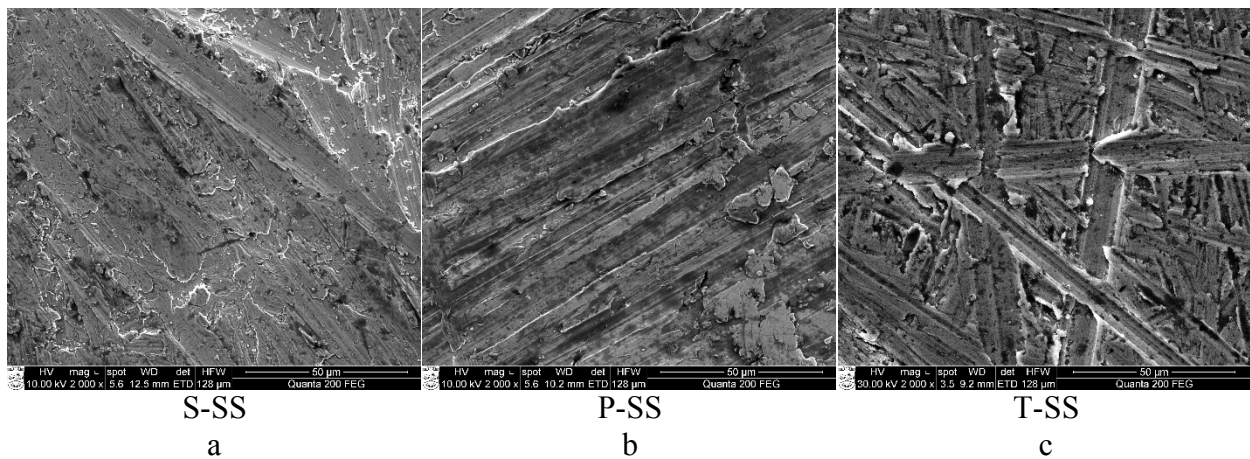


Fig. 4. Worn unreinforced hardfacings in two-body abrasive wear test

Combination of micro-cutting and micro-ploughing wear mechanisms was observed in reinforced SAW hardfacings tested under the two-body abrasive wear (Fig. 5 a). Here volume of material was removed by cutting motion from the surface of hardfacing. The lost volume was equal to the volume of wear track. Dominant wear pattern of PTAW hardfaced surfaces was micro-cutting: shallow tracks were left after test (Fig. 5 b). As a result, volume loss was lower than that of SAW hardfacings, which, owing to the particular attribute of the technology, can be explained by higher amount of primary and secondary carbides in the structure [26]. TIG samples wear pattern united two mechanisms: cutting and ploughing with predominant cutting (Fig. 5 c). No brittle cracking's were observed which allows to affirm suitability of these technologies to produce hardfacings.

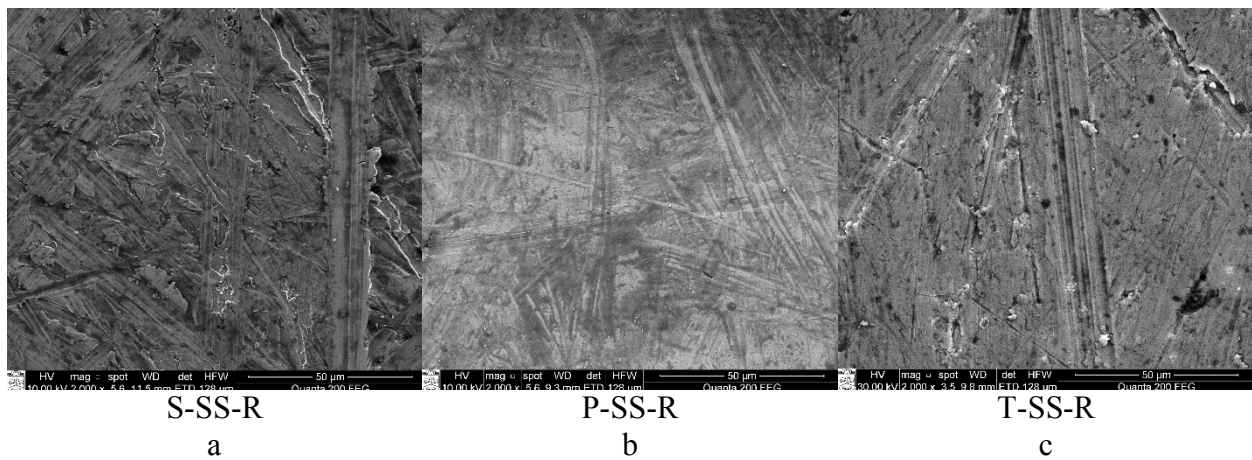
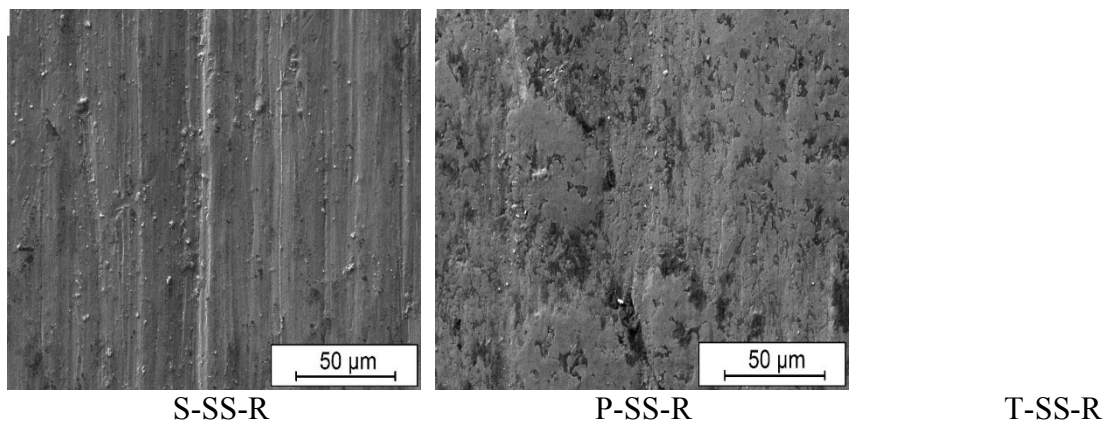


Fig. 5. Worn reinforced hardfacings in two-body abrasive wear test

Three-body abrasive wear test SEM images revealed the same wear mechanism for all samples: micro-cutting. Obviously deeper and larger scars have been found in SAW hardfacings with lower hardness and higher wear rate (Fig. 6 a). Smoother scars in PTAW and TIG hardfacings were caused by tackling of abrasives movement and its penetration inside the matrix (Fig. 6 b and c). Modest part of hard carbide particles crumbled from cermet reinforcement during the test, the rest remained well integrated in the matrix.



a

b

c

Fig. 6. Worn reinforced hardfacings in three-body abrasive wear test

4. Conclusions

In the present research influence of Cr_3C_2 -Ni cermet addition to austenitic stainless steel and Ni-based alloy matrix for the aim to produce hardfacings were studied. The following statements could be drawn as conclusions:

1. Mechanically synthesized Cr_3C_2 -Ni particles are suitable reinforcement for the production of submerged arc (SAW), plasma transferred arc (PTAW), and tungsten arc welded (TIG) hardfacings. However, in terms of wear resistance more efficient effect was achieved with two later technologies.
2. Microstructure analysis revealed higher dissolution rate of Cr_3C_2 -Ni in austenitic stainless steel than in Ni-based alloy matrix hardfacings. The precipitation of secondary carbides in SAW hardfacings was comparatively low, what caused higher wear rate.
3. Hardness values of unreinforced austenitic stainless steel matrix hardfacings' are not sensitive to applied technologies; average hardness of SAW, PTAW, and TIG ~ 200 HV/30. Ni-based alloy matrix hardness showed the input of the technology: the highest hardness was achieved on PTAW hardfacings 340 HV/30.
4. If compared with unreinforced hardfacings addition of Cr_3C_2 -Ni reinforcement increased the hardness by 2 times in average in all utilized technologies; this effect was more expressed for austenitic stainless steel matrix in PTAW and TIG technologies (2.7 and 2.8 respectively).
5. Wear resistance of hardfacings tested under two- and three-body wear conditions increased firmly adding cermet particles. Wear rate reduction tendency is less expressed in SAW hardfacings: in two-body test 1.8 times less for austenitic stainless steel (SS), and 1.1 times for Ni-based (Ni) matrix; in three-body test 1.7 times for SS, and 1.4 for Ni.
6. The highest growth of wear resistance was achieved in PTAW hardfacings where reduction of wear reached 8.6 times for SS, and 8.1 times for Ni-based matrix reinforced hardfacings. Exceptionally high wear resistance was noticed while testing TIG hardfacings under three-body abrasive wear test: it overpassed SAW Fe based hardfacings by 15, PTAW by 2.6 times, and SAW Ni-based by 14, PTAW by 2 times.

Taking into an account all these considerations it can be stated that addition of Cr_3C_2 -Ni cermet leads to the formation of high abrasive wear resistant, hard and strong hardfacings; further research will be concentrated on an erosion wear tests of the same compositions.

References

[8] [Medziagotyra](#) Open Access Volume 22, Issue 1, 2016, Pages 44-48

Effects of surface alloying and laser beam treatment on the microstructure and wear behaviour of surfaces modified using submerged metal arc welding(Article)

- [Bendikiene, R.Email Author,](#)
- [Pupelis, E.,](#)

- [Kavaliauskiene, L.](#)
-

[9] [International Journal of Surface Science and Engineering](#) Volume 11, Issue 3, 2017, Pages 262-272

Wear study of coatings obtained using different parameters of thermal spraying(Article)

- [Bendikiene, R.^aEmail Author,](#)
- [Pilkaitė, T.^bEmail Author,](#)
- [Kuliavas, L.A.^cEmail Author](#)
-

[10] [Proceedings of the Estonian Academy of Sciences](#) Open Access Volume 68, Issue 2, 2019, Pages 150-157

Study of submerged and plasma arc welded composite hardfacings with a novel Cr₃C₂-Ni reinforcement(Article)(Open Access)

- [Bendikiene, R.^aEmail Author,](#)
- [Ciuplys, A.^a,](#)
- [Jankus, S.M.^a,](#)
- [Surzhenkov, A.^bEmail Author,](#)
- [Tkachivskyi, D.^b,](#)
- [Juhani, K.^b,](#)
- [Viljus, M.^b,](#)
- [Traksmas, R.^b,](#)
- [Antonov, M.^b,](#)
- [Kulu, P.^b](#)

[12] [Proceedings of the Estonian Academy of Sciences](#) Open Access Volume 65, Issue 2, 2016, Pages 117-122

Preparation and wear behaviour of steel turning tools surfaced using the submerged arc welding technique(Article)(Open Access)

[Räbustikaarkeevispinnatud teraslõikeriistade saamine ja kulumine]

- [Bendikiene, R.Email Author,](#)
- [Ciuplys, A.,](#)
- [Kavaliauskiene, L.](#)
-

[17] **Zahiri, R., Sundaramoorthy, R., Lysz, P., Subramanian, C.** Hardfacing Using Ferro-Alloy Powder Mixtures by Submerged Arc Welding *Surface & Coatings Technology* 260 2014: pp. 220–229.

<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.08.076>

[18] **Saha, A., Mondal, S.C.** Multi-objective Optimization of Manual Metal Arc Welding Process Parameters for Nano-structured Hardfacing Material Using Hybrid Approach *Measurement* 102 2017: pp. 80–89.

<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.01.048>

[19] **Kulu, P., Tarbe, R., Žikin, A., Sarjas, H., Surženkov, A.** Abrasive Wear Resistance of Recycled Hardmetal Reinforced Thick Coating *Key Engineering Materials* 527 2013: pp. 185–190.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.527.185>

[20] **Comparison of Plasma Transferred Arc and Submerged Arc Welded Abrasive Wear Resistant Composite Hardfacings**

Taavi SIMSON^{1*}, Priit KULU¹, Andrei SURŽENKOV¹, Antanas CIUPLYS², Mart VILJUS¹, Gintautas ZALDARYS²

[22] Production of Thermal Spray Cr₃C₂-Ni Powders by Mechanically Activated Synthesis

April 2019

Key Engineering Materials 799:31-36

DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.799.31

- [Dmytro Tkachivskyi](#), [Kristjan Juhani](#), [Andrei Surzhenkov](#), [Rimtautas Leišys](#)

[23] Sarjas, H., Juhani, K., Viljus, M., Matikainen, V., Vuoristo, P. Wear resistance of HVOF sprayed from mechanically activated thermally synthesized Cr₃C₂-Ni powder. *P. Est. Acad. Sci.*, 2016, **65**, 101–106.

TIG Welding as Hardfacing Technology

ROLANDAS SERTVYTIS*, **REGITA BENDIKIENE****,
ANTANAS CIUPLYS***

* *Kaunas University of Technology, Department of Production Engineering, Studentu str. 56, LT-51424 Kaunas, Lithuania, Rolandas.Sertvytis@ktu.edu*

** *Kaunas University of Technology, Department of Production Engineering, Studentu str. 56, LT-51424 Kaunas, Lithuania, Regita.Bendikiene@ktu.lt*

*** *Kaunas University of Technology, Department of Production Engineering, Studentu str. 56, LT-51424 Kaunas, Lithuania, Antanas.Ciuplys@ktu.lt*

1. Introduction

Abrasive wear is the major failure mode of industrial components. Surfacing with more wear resistant material is both a cost effective and sustainable route to increase the durability of industrial parts [1].

Modern and expensive parts lead to an increasing demand for maintenance, repair and overhaul technologies. Instead of part replacement, repair technologies are economically advantageous throughout the life cycle [2].

The choice of the surfacing method and coating material depends on the application demands. Hard coatings and maintenance welding ensure better and longer performances and fewer failures. Hard coatings applied during industrial maintenance enable immediate operation of parts and lower repair costs; thus, the operation of critic systems is guaranteed, and the purchase of parts may decrease [3].

Several surface modification techniques such as surface coating and hardfacing have been developed over the years in order to mitigate the problem of abrasive wear [4].

Although structural steel is widely used in various industries, this material undergoes wear and hardness problems in many applications [5]. Regarding this fact, in the past few years, a number of research was done to find the way to improve this limitation by various types of surface modification.

A wide variety of methods are available to produce a hard coating layer including PVD (Physical Vapor Deposition), CVD (Chemical Vapor Deposition), laser surface cladding and thermal spraying. However, all these techniques have a limited application because of the expensive establishment

and precision control of the system [5].

The layer of coating on the base material surface produced by high energy deposition methods like TIG (Tungsten Inert Gas) melting can improve the surface properties of the component without affecting its bulk characteristics [6]. TIG that is mainly used for welding of metallic components can be applied as a heat source for liquid phase surface treatment. The surface layer fabricated by TIG process is thicker than that achieved with laser beam. In addition, TIG process is cheaper and its portability is higher than that of laser beam [7].

2. Materials and Methods

The plain carbon steel S235 was chosen as a base material for the production of hardfacings; rectangular 10 × 10 mm bars were used. Austenitic stainless steel and Ni-based self-fluxing alloy were employed as the basic materials to form matrix of hardfacing, experimental cermet powder produced by mechanically activated synthesis (MAS) was added as reinforcement to the matrix. Detail chemical composition is given in Table 1.

Table 1
Designation and chemical composition of hardfacings

| Designation | Matrix composition, wt.% | | | | | | Reinforcement | | |
|--|--|------|------|-----|------|---|------------------------------------|----|--|
| T1 | Stainless steel | | | | | | – | | |
| T2 | Ni-alloy | | | | | | – | | |
| T3 | Stainless steel | | | | | | Cr ₃ C ₂ -Ni | | |
| T4 | Ni-alloy | | | | | | Cr ₃ C ₂ -Ni | | |
| Materials | C | Cr | Ni | Mo | Fe | B | Si | Al | |
| | wt.% | | | | | | | | |
| Stainless steel EN-X3CrNiMo17-13-3 | 0.03 | 17.5 | 13 | 2.7 | bal. | – | – | – | |
| Ni-alloy | 0.2 | 4 | bal. | – | – | 1 | 2.5 | 1 | |
| Substrate S235 | C 0.17; Mn 0.55 – 0.65; S ≤ 0.05; P ≤ 0.04 | | | | | | | | |
| Cermet powder Cr ₃ C ₂ -Ni | Cr ₃ C ₂ 80, Ni 20 | | | | | | | | |

To obtain the cermet powder Cr₃C₂-Ni, powders of pure Cr (99.5 wt.%) and pure Ni (99.7 wt.%) with an average particle size of 6.65 μm and 2.4 μm were used, as well as pure carbon black (99.7 wt.%) with average particle size 6.45 μm were milled in the conventional ball mill with hardmetal balls in isopropanol during 72 h, then plasticized and sintered in vacuum at 1100 °C to obtain bulk compacts. The sintered agglomerates were manually crushed and powder fraction suitable as reinforcement (90 – 300 μm) was

sieved [8].

The power source used to produce hardfacings was AirLiquide SAF-FRO Combiwig 4000 AC/DC (Italy) TIG (also known as GTAW) welding process is an efficient way for hardfacing. It is recommended to choose inverter type of power source which arc output is more stable compared to the old transformer type. The most important part of TIG equipment in the hardfacing process is the torch. In order to achieve maximum results an extra-large gas lens a Jumbo cup (manufacturer TBI, Germany) have to be used. That prevents the pool from oxidation and keeps the layer being hardfaced as pure as possible. Non consumable electrode WL20 (manufacturer TBI, Germany) of diameter 1.6 mm was chosen for the process. It maintains stable arc and prevents the pool from contamination with tungsten particles.

Mechanical properties were estimated while executing Vickers surface hardness (HV30) test; hardness tester Indentec 5030KV (Zwick/Roell, Germany) at the load of 294.3 N (30 kgf) and the dwell time 10 s was employed. Ten measurements were done on each hardfacing, and the average hardness values are presented.

3. Results and Discussion

TIG welding allowed to achieve good quality hardfacings. Hardness of harfacings produced of stainless steel matrix reached 168 HV/30 (Fig. 1, T1) whereas Ni-alloy based showed much higher value 325 HV/30 (Fig. 1, T2).

Addition of Cr_3C_2 -Ni particles to the both matrix induced increase of hardness by 1.7 (T4) and 3.8 (T3) times, what can be associated with the dissolution of cermet particles and subsequent re-precipitation of secondary carbides. A higher increase of hardness values was observed in case of stainless steel matrix hardfacings. This might be explained by the presence of retained cermet particles in the matrix compared with the relatively low hardness of unreinforced hardfacings made of stainless steel.

Significant increase in wear resistance was observed for all hardfacings compared to the base metal. However, the results of the wear tests did not correlate with these of hardness. Higher hardness did not indicate higher wear resistance. Hardness of Fe-based matrix was higher than Ni-based matrix, but wear resistance of later was higher (Fig. 2, T1, T2 and T3, T4 respectively). There is no clear explanation for such behaviour yet, therefore for pure realization further investigation needed.

The introduction of Cr_3C_2 -Ni particles to the Fe-alloy lead to 2.3 lower wear (Fig. 2, T3) of the TIG hardfacings, whereas this effect was stronger in case of Ni-based hardfacings – up to 8.2 times (Fig. 2, T4). A higher enhance-

ment of the wear resistance of the Ni-based hardfacings may be explained by the presence of $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ni}$ particles in the hardfacings.

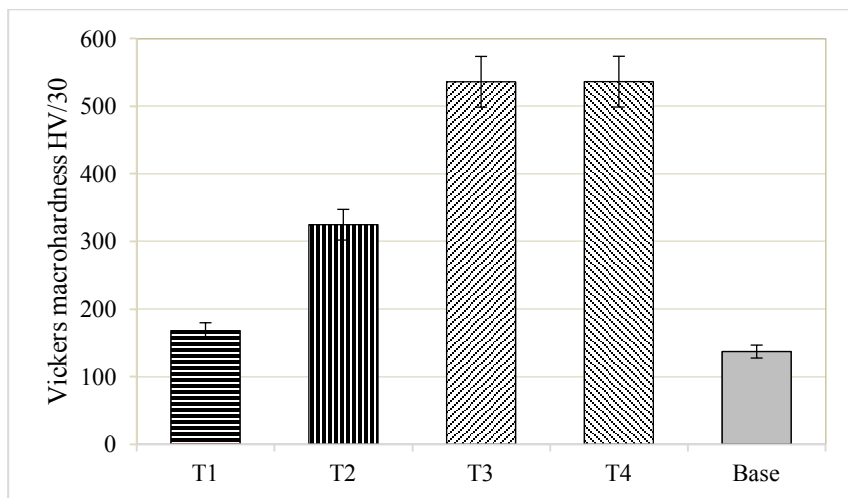


Fig. 1 Vickers hardness of the hardfacings

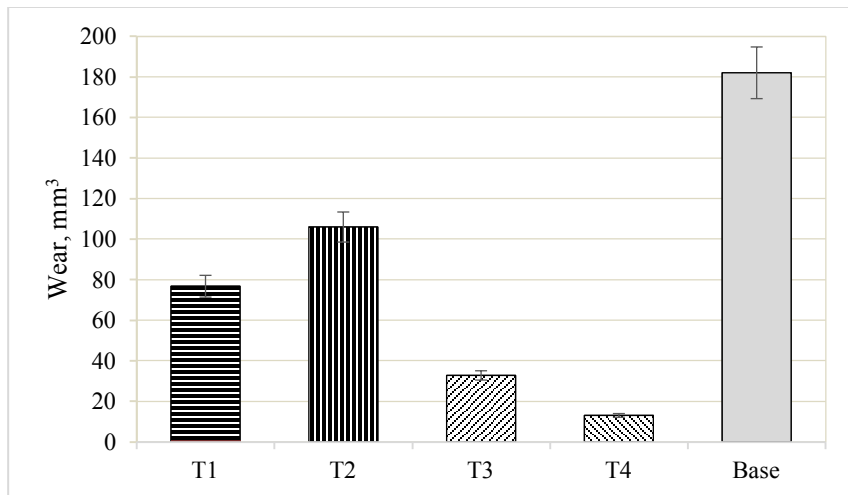


Fig. 2 Wear under the two-body emery paper tests

4. Conclusions

- TIG welding technology is suitable for production of

hardfacings.

- It is possible to use $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ni}$ cermet produced by mechanically activated synthesis as the reinforcement for composite TIG welded hardfacings.
- Reinforcement by $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ni}$ cermet particles made it possible to reach 1.7 (for Ni-based alloy) and 3.2 times (for Fe-based alloy) higher hardness as compared to the unreinforced coating.
- Addition of $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ni}$ cermet particles improved the wear resistance of the hardfacings by 2.3 (for Fe-based alloy) and 8.2 times (for Ni-based alloy). It can be said that $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ni}$ particles led to the formation of a harder and stronger structure, which was more resistant to wear, but to prove it further investigations are required.

References

1. **Maroli B.; Liu C.** 2017. Overlay welding of NiSiB mixes with tungsten carbides [online] APMA-2017 [accessed 19 Febr. 2019]. Available from Internet: https://www.hoganas.com/globalassets/download-media/technical-papers/pm/pm17_08_apma_overlay-welding-of-nisib-mixes-with-tungsten-carbides_maroli.pdf
2. **Graf B.; Ammer S.; Gumenyuk A.; Rethmeier M.** 2013. Design of experiments for laser metal deposition in maintenance, repair and overhaul applications, *Procedia CIRP* Vol. 11: 245-248.
3. **Marulanda-Arévalo J.L.; Cañas-Mendoza L.A.; Barón-Jaimez J.A.** 2017. Abrasive wear in wear plates and hard coatings applied by welding with shielded electrode, *Revista Facultad de Ingeniería* Vol. 26: 105-112.
4. **Kang A.S.; Singh G.; Cheema G.S.** 2017. Improving wear resistance via hardfacing of cultivator shovel, *Materials Today: Proceedings* Vol. 4: 7991-7999.
5. **Lailatula P.H.; Maleque M.A.** 2017. Surface modification of duplex stainless steel with SiC preplacement using TIG torch cladding, *Procedia Engineering* Vol. 184: 737-742.
6. **Sahoo Ch.K.; Masanta M.** 2017. Microstructure and mechanical properties of TiC-Ni coating on AISI304 steel produced by TIG cladding process, *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 240: 126-137.
7. **Heydarzadeh Sohi M.; Hojjatzadehb S.M.H.; Khodayarc A.; Amadeha A.** 2017. Liquid phase surface alloying of a nickel aluminum bronze alloy with titanium, *Surface and Coatings Technology* Vol. 325: 617-626.
8. **Sarjas H.; Juhani K.; Viljus M.; Matikainen V.; Vuoristo P.** 2016. Wear resistance of HVOF sprayed from mechanically activated thermally

synthesized Cr_3C_2 -Ni powder, Proceedings of Estonian Academy of Science, Vol. 65: 101-106.

Rolandas SERTVYTIS, Regita BENDIKIENE, Antanas CIUPLYS

TIG Welding as Hardfacing Technology

S u m m a r y

The study aims to analyse the possibilities to apply Tungsten Inert Gas (TIG) welding as one of the hardfacing technologies. Stainless steel and Ni-alloy were chosen as matrix materials, while few hardfacings were enriched in cermet powder, chromium carbide and nickel. Due to high concentration of alloying elements it was expected to reach maximum wear resistance of produced hardfacings. The main challenges of this study were proper choice of TIG processing parameters, and the technique to introduce reinforcement powder to the process area. The former was solved changing current, the later was tested in the most common way, which have been proven in submerged arc welding (SAW) technology, by spreading of reinforcement powder over the surface of the substrate. The optimum TIG parameters chosen for the hardfacing process were: current 60A, voltage approximately 18V. Produced hardfacings have exceeded expectation due to comparatively high wear resistance, while process itself needs further studies.

Keywords: hardfacing, tungsten inert gas welding, cermets, wear resistance.

Projektų vykdymas

- KTU-LEI „Santakos slėnis“ mokslo ir studijų institucijų mokslo projektas „Tvarus iš saulės elementų lūženų išgauto silicio naudojimas daugiafunkcinės paskirties dangoms formuoti“ (Reg. Nr. PP-88H/19). Sąmatinė vertė – 10 000 Eur. 2019.04.01 - 2019.12.31. Projekto vykdytojas.
- 09.3.3-LMT-K-712 Mokslininkų, kitų tyrėjų, studentų mokslinės kompetencijos ugdymas per praktinę mokslinę veiklą „TIG suvirinimo naudojimo atsparioms dilimui dangoms formuoti galimybių tyrimas" (Reg. Nr. SV3/1164). Sąmatinė vertė – 1877,93 Eur. 2019.07.01 - 2019.08.31. Projekto vykdytojas.

certificate

INDUSTRIAL engineering 2019

Nr. V24-11-23

Attendance confirmation for

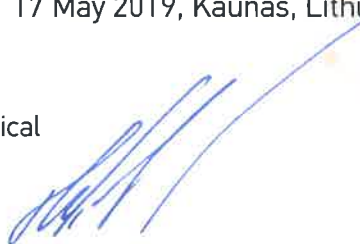
Rolandas Šertvytis

to certify the presented theme

TIG WELDING AS HARDFACING TECHNOLOGY

at the International conference of Industrial Engineering,
17 May 2019, Kaunas, Lithuania

Dean of the Faculty of Mechanical
Engineering and Design
dr. Andrius Vilkauskas



Kaunas "Santaka" Valley
Kaunas University of Technology

organiser



faculty of mechanical
engineering
and design





Reg. No. V24-11-169

ATENDANCE CONFIRMATION

October 25-26, 2019

Robaudas Šerutytis

Has participated and completed the training on

Production and Technology Management

| Date | Topic of training | Lecturer | hr |
|--------------|--|--|----------|
| 10.25 | Distribution solution. "As long as the end consumer has not bought, nobody in the supply chain has sold". Importance of understanding the goal of every chain in the supply chain. Typical supply chain undesirable effects. Supply Chain Core Conflict. Retailer: typical undesirable effects, core conflict, local policies. Distributor: typical undesirable effects, core conflict, local policies. Why forecasts are always wrong? | Dr. Luna Magpili Associate Professor, Engineering and Technology Management at Washington State University (USA) | 4 |
| 10.26 | Engineer-to-Order and multi-project environments. Why do conventional project management methodologies fail? Common undesirable effects and root causes in multi-project environment. Parkinson and Student syndromes. Multitasking effect on project lead time. 5 Focusing Steps in multi-project environment. Buffer Based CCPM Scheduling. Critical Chain rules: Pipelining, Buffering, Buffer Management. Differences of managing single project and multi-projects. | Dr. Russ Johnson Associate Professor, Engineering and Technology Management at Washington State University (USA) | 4 |
| Total | | | 8 |

[Signature]
Dean of the Faculty
of Mechanical Engineering and Design dr. Andrius Vilkauskas