



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Duplex plieno apdirbimo savybių tyrimas tekinant
Baigiamasis magistro projektas

Algimantas Brasas
Projekto autorius

Lekt. Virginija Gylienė
Vadovė

Kaunas, 2024



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Duplex plieno apdirbimo savybių tyrimas tekinant

Baigiamasis magistro projektas
Gamybos inžinerija (6211EX015)

Algimantas Brasas

Projekto autorius

Lekt. Virginija Gylienė

Vadovė

Doc. Lina Kavaliauskienė

Recenzentė

Kaunas, 2024



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Algimantas Brasas

Duplex plieno apdirbimo savybių tyrimas tekinant

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

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

Algimantas Brasas

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kaunas technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Studentui – Algimantui Brasui

1. Projekto tema –

Duplex plieno apdirbimo savybių tyrimas tekinant

(Lietuviškai)

Investigation of Duplex Steel Machinability in Turning

(Angliškai)

2. Projekto tikslas ir uždaviniai

Tikslas: ištirti *Duplex* plieno apdirbimo savybes tekinant.

Uždaviniai:

- įvertinti *Duplex* plieno apdirbimo galimybes;
- atlikti tekinimo eksperimentus skirtingais pjovimo režimais;
- ištirti aptekintų bandinių kokybę paviršiaus atžvilgiu ir paviršinio sukietinimo atžvilgiu;
- pateikti rekomendacijas užsigrūdinančio plieno tekinimui.

3. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos

Nerūdijantis plienas *Duplex* EN 1.4462.

4. Papildomi reikalavimai projektui, ataskaitai ir jos priedams

Netaikoma.

Projekto autorius

Algimantas Brasas

2023-09-29

(Vardas, Pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vadovė

Virginija Gylienė

2023-09-29

(Vardas, Pavardė)

(Parašas)

(Data)

Krypties studijų
programų vadovė

Regita Bendikienė

2023-09-29

(Vardas, Pavardė)

(Parašas)

(Data)

Brasas Algimantas. *Duplex* plieno apdirbimo savybių tyrimas tekinant. Magistro baigiamasis projektas, vadovė lekt. Virginija Gylienė; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: *Duplex*; tekinimas; paviršiaus šiurkštumas; kietumas.

Kaunas, 2024. 59 p.

Santrauka

Nerūdijantis plienas *Duplex* EN 1.4462 – medžiaga, kurią yra sudėtinga apdirbti dėl mažo šiluminio laidumo, nelūžtančios drožlės, kuri sukelia įvairias problemas tiksliojo apdirbimo metu. Šio darbo pagrindinis tikslas yra ištirti šio plieno apdirbimo savybes, kad būtų užtikrinamos optimaliausios sąnaudos, siekiant geriausio paviršiaus išbaigimo. Šiame tyrime ištirta pjovimo greičio (150-250 m/min), pastūmos (0,05-0,15 mm/aps), pjovimo gylio (0,5-1,5 mm) daroma įtaka galutinio gaminio charakteristikoms, kai aušinimui naudojama emulsija. Tyrimo eigoje ištirta, kad tiksliojo apdirbimo laikas parinktais pjovimo režimais gali skirtis iki 3,45 karto, kad drožlių polinkis lūžti didėja, kai didėja pastūma ir pjovimo greitis, išsiaiškinta, kad paviršinių sluoksnių kietumui didžiausią įtaką daro pjovimo greitis ir drožlės formavimasis, taip pat išsiaiškinta, kad tekinant galima pasiekti iki 0,433 Ra paviršiaus šiurkštumą ir kad drožlės deformacijos koeficientas mažėja, kai didėja pastūma ir pjovimo greitis. Gauti tyrimo rezultatai parodo, kad efektyviausias ir našiausias būdas gaminti detales, kurių paviršiaus šiurkštumo tolerancija yra iki 0,8 Ra, yra tekinant pjovimo greičiu 200 m/min, pastūma 0,05 mm/aps, pjovimo gyliu 1 mm. Paviršinių sluoksnių paveiktų tekinimo tyrime sužinota, kad dėl aukštos temperatūros paviršiai gali ne tik sukietėti, bet ir būti paveikti terminio minkštėjimo. Iš šio tyrimo sužinota, kad skirtingi pjovimo režimai tiksliojo apdirbimo metu gali sukietinti paviršių nuo 6 HV iki 46 HV, o pjovimo metu veikianti deformacija ir temperatūra paveikia sluoksnius nuo 0,15 mm iki 0,45 mm. Terminis minkštėjimas pastebėtas 6 iš 9 bandinių, o sukeliamą žalą gali sumažinti galutinių gaminių atsparumą dilimui, nes pastebėta, kad kai kuriais atvejais paviršiaus kietumas sumažinamas net 20 HV, o suminkštėjusio sluoksnio gylis gali siekti net iki 0,15 mm.

Brasas Algimantas. Investigation of Duplex Steel Machinability in Turning. Master's Final Degree Project, supervisor lect. Virginija Gylienė; 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: Duplex; turning; surface roughness; hardness.

Kaunas, 2024. 59 p.

Summary

Duplex stainless steel EN 1.4462 is difficult-to-cut material due to its low thermal conductivity and unbreakable chip, which causes various problems during precision machining. The main objective of this work is to investigate the machinability of this steel to ensure optimal cost for the best surface finish. This study investigated the effect of cutting speed (150-250 m/min), feed (0,05-0,15 mm/rev), depth of the cut (0,5-1,5mm) on the final product characteristics when emulsion cooling is used. The study found that the precision machining time can vary up to 3,45 times for selected cutting parameters, that the tendency of chips to break increases with increasing feed and cutting speed, that the hardness of the surface layers is mainly influenced by cutting speed and chip formation, it was also found that surface roughness up to 0,433 Ra can be achieved by turning and that the chip deformation coefficient decreases with increasing of a feed and cutting speed. The results show that the most effective and efficient way to produce parts with a surface roughness tolerance of up to 0,8 Ra is by turning at a cutting speed of 200 m/min, a feed rate of 0,05 mm/rev, and a cutting depth of 1 mm. The study of surface layers affected by turning has shown that high temperatures can not only cause hardening but also thermal softening on surfaces. From this study it was found that different cutting regimes in precision machining can harden the surface from 6 HV to 46 HV, and the deformation and temperature during cutting affects layers from 0,15 mm to 0,45 mm. Thermal softening has been observed in 6 out of 9 samples, and the damage caused can reduce the wear resistance of the final products, as it has been observed that in some cases the surface hardness is reduced by 20 HV, and the depth of the softened layer reaches 0,15 mm.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Įvadas.....	11
1. Nerūdijantis plienas.....	13
1.1. Duplex nerūdijantis plienas	14
1.1.1. Duplex nerūdijantis plienas EN 1.4462	14
1.1.2. Mechaninio apdirbimo poveikis kietumui.....	16
1.1.3. Paviršiaus šiurkštumas.....	19
1.2. SPV tekinimas	21
1.2.1. Pjovimo įrankiai	22
1.3. Skyriaus apibendrinimas	23
2. Apdirbimo savybių tyrimų metodika	24
2.1. Eksperimento planas.....	24
2.2. Eksperimentui atlikti naudojama įranga	26
2.2.1. SPV tekinimo staklės.....	26
2.2.2. Pjovimo įrankiai ir laikikliai.....	27
2.3. Matavimo įranga ir metodika	30
2.3.1. Paviršiaus šiurkštumo tyrimo metodika	30
2.3.2 Kietumo ir drožlių deformacijos tyrimo metodika.....	31
2.4. Skyriaus apibendrinimas	34
3. Apdirbimo savybių tyrimai	36
3.1. Apdirbimo laiko tyrimas.....	36
3.2. Drožlių tyrimai	37
3.3. Paviršiaus šiurkštumo tyrimas	42
3.4. Duplex 1.4462 mikrostruktūra.....	45
3.5. Pjovimo režimų poveikio kietumui tyrimas	45
3.6. Drožlių deformacijos tyrimas	51
3.7. Skyriaus apibendrinimas	53
4. Eksperimento rezultatų teikiamos naudos.....	55
4.1. Skyriaus apibendrinimas	57
Išvados	59
Literatūros sąrašas	60
Priedai.....	63
1 priedas. Paviršiaus šiurkštumo tyrimų lentelė	63
2 priedas. Haas DS 30 Y techniniai parametrai.....	71
3 priedas. Refraktrometras.....	74
4 priedas. Tekinimo programos kodas.....	75

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Įprastinė DSS cheminė sudėtis.....	14
2 lentelė. Įprastinė EN 1.4462 cheminė sudėtis	14
3 lentelė. EN 1.4462, AISI 316L ir AISI 446 savybių ir charakteristikų palyginimas [5].....	15
4 lentelė. Paviršiaus šiurkštumo tolerancijos.....	20
5 lentelė. Eksperimente naudojami pjovimo režimai	24
6 lentelė. Standartinės apdirbimo sąlygos	24
7 lentelė. Taguchi metodu optimizuota pjovimo parametrų lentelė	26
8 lentelė. Eksperimentinė parametrų lentelė.....	26
9 lentelė. <i>BMP 65 AW.103.065.25.755</i> matmenys	28
10 lentelė. <i>DNMG150604-MF1 CP500</i> plokštelės charakteristikos	29
11 lentelė. <i>Mitutoyo SJ-210</i> techninės charakteristikos.....	31
12 lentelė. <i>SMARTLAM 2.0</i> techninės charakteristikos.....	32
13 lentelė. Tekinimo laiko lentelė	36
14 lentelė. Paviršiaus šiurkštumo tyrimo rezultatų lentelė	43
15 lentelė. Drožlės storio matavimų suvestinė su apskaičiuotais vidurkiais	51
16 lentelė. Drožlės deformacijos koeficiento skaičiavimo suvestinė	51
17 lentelė. Medžiagos pašalinimo greičio skaičiavimo lentelė	56
18 lentelė. Kainos skaičiavimo lentelė	56
19 lentelė. Tinkamiausi pjovimo režimai, pagal paviršiaus šiurkštumo tolerancijas	57

Paveikslų sąrašas

1 pav. Nerūdijančio plieno gamybos apimtys pasaulyje	13
2 pav. Įtempių šaltiniai apdirbimo procese.....	16
3 pav. pjovimo greičio ir pastūmos poveikis mikrokietumui [7]	17
4 pav. Pjovimo greičio poveikis mikrokietumui, kai (a) feritas, o (b) austenitas [8]	18
5 pav. Ra grafinis atvaizdavimas [12]	19
6 pav. R_{z1max} ir R_z grafinis atvaizdavimas [12].....	20
7 pav. Standartinė SPV staklių sandara [22]	21
8 pav. Kairėje išilginio tekinimo operacija, dešinėje frezavimo operacija [22].....	22
9 pav. Ruošinio įstatymas	25
10 pav. SPV tekinimo staklės <i>Haas DS 30Y</i>	27
11 pav. <i>BMP 65 AW.103.065.25.755</i> laikiklio vizualizacija	27
12 pav. Plokštelių laikiklio <i>PDJRN/L 2525M15</i> vizualizacija	28
13 pav. <i>DNMG150604-MF1 CP500</i> vizualizacija	28
14 pav. Eksperimento sąranka	29
15 pav. Profilometras <i>Mitutoyo SJ-210</i>	30
16 pav. Profilometru matuojamas bandinys	30
17 pav. Perpjautas bandinys elektroerozinio pjovimo vieta staklėse	31
18 pav. Poliravimo mašina <i>SMARTLAM 2.0</i>	32
19 pav. Mikroskopas <i>AXIO Scope A</i> , kamera <i>ZEISS Axiocam 208 color</i> ir programinis paketas <i>Labscope</i>	33
20 pav. Universalus kietumo matuoklis <i>INNOVATEST VERZUS 750 CCD</i>	33
21 pav. Supaprastinta kietumo matavimų schema.....	34
22 pav. Laiko priklausomybė nuo pastūmos, skirtingo pjovimo greičio ribose.....	37
23 pav. Eksperimento nr.1 drožlė	38
24 pav. Eksperimento nr.2 drožlė	38
25 pav. Eksperimento nr.3 drožlė	39
26 pav. Eksperimento nr.4 drožlė	39
27 pav. Eksperimento nr.5 drožlė	40
28 pav. Eksperimento nr.6 drožlė	40
29 pav. Eksperimento nr.7 drožlė	41
30 pav. Eksperimento nr.8 drožlė	41
31 pav. Eksperimento nr.9 drožlė	42
32 pav. Paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo pastūmos ir pjovimo gylio	43
33 pav. Paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo pastūmos ir pjovimo greičio	44
34 pav. <i>Duplex 1.4462</i> mikrostruktūra padidinta 20 kartus	45
35 pav. <i>Duplex 1.4462</i> mikrostruktūra padidinta 5 kartais	45
36 pav. Eksperimento nr.1 paviršiaus kietumo priklausomybė paviršiaus atžvilgiu.....	46
37 pav. Eksperimento nr.2 paviršiaus kietumo priklausomybė paviršiaus atžvilgiu.....	46
38 pav. Eksperimento nr.3 paviršiaus kietumo priklausomybė paviršiaus atžvilgiu.....	47
39 pav. Eksperimento nr.4 paviršiaus kietumo priklausomybė paviršiaus atžvilgiu.....	47
40 pav. Eksperimento nr.5 paviršiaus kietumo priklausomybė paviršiaus atžvilgiu.....	48
41 pav. Eksperimento nr.6 paviršiaus kietumo priklausomybė paviršiaus atžvilgiu.....	48
42 pav. Eksperimento nr.7 paviršiaus kietumo priklausomybė paviršiaus atžvilgiu.....	49
43 pav. Eksperimento nr.8 paviršiaus kietumo priklausomybė paviršiaus atžvilgiu.....	49

44 pav. Eksperimento nr.9 paviršiaus kietumo priklausomybė paviršiaus atžvilgiu.....	50
45 pav. Drožlių storio matavimo nuotraukos	51
46 pav. Deformacijos koeficiento priklausomybė nuo pjovimo greičio ir pastūmos.....	52
47 pav. Deformacijos koeficiento priklausomybė nuo pjovimo greičio ir pjovimo gylio	52
48 pav. Deformacijos koeficiento priklausomybė nuo pastūmos ir pjovimo gylio.....	53

Išvadas

Mechaninis apdirbimas yra pagrindinis mašinų elementų gamybos būdas. Šioje pramonės šakoje gaminami įvairūs mechaniniai komponentai, be kurių neveiktų praktiškai visi pasaulyje naudojami įrenginiai, automobiliai, laivai ar lėktuvai. Didėjant žmonių populiacijai vis labiau atsigręžiama į vandens, jūrų ir vandenynų infrastruktūrą, taip pat auganti chemijos pramonė ir aukšti aplinkosauginiai reikalavimai priverčia žmoniją keisti požiūrį ir ieškoti naujų būdų ar galimybių, kad būtų užtikrinama santarvė tarp gamtos ir žmogaus. Taip pat metalurgijos pramonė išmeta milžinišką kiekį anglies dvideginio į aplinką, kai yra išgaunama įvairių metalų rūda, taip pat jų apdirbimo procese, transportavime. Tai priveda prie poreikio ieškoti nors ir brangesnių, bet saugesnių gamtai ir turinčių ilgesnį tarnavimo laiką alternatyvų. Augant infrastruktūros kiekiui, kuri naudojama atšiauriomis sąlygomis, vis dažniau atsigręžiama į konstrukcines nerūdijančias medžiagas, tokias kaip nerūdijantys plienai, aliuminis, titano lydiniai. Tačiau medžiagos, kurios yra atsparios atšiaurioms sąlygoms, dilimui, dažnai yra atsparios ir mechaniniam apdirbimui, dėl ko tampa sunku jas apdirbti. Nelūžtanti drožlė, greitai dylantys pjovimo įrankiai, aukšta temperatūra apdirbimo zonoje, reikalingi mažesni pjovimo režimai, prastas paviršiaus išbaigimas, didelis sukimo momentas reikalingas pjauti medžiagą ir įvairios kitos problemos yra įprasti iššūkiai šių medžiagų apdirbime. Greitas įrankių dilimas, žemi pjovimo režimai, nelūžtanti drožlė kelia didelę riziką, kad bus sugadintas apdirbamas paviršius arba paviršiaus švarumas netenkins užsakovo lūkesčių. Paviršiaus topografija yra esminis faktorius, atsakingas už gaminių ilgaamžiškumą. Paviršiniai defektai yra įtempių susikaupimo vieta, taip pat ties jais dažniausiai kyla korozijos židiniai. Šiame darbe tirsime nerūdijančio plieno *Duplex* 1.4462 paviršiaus charakteristikas po atlikto tiksliojo tekinimo, nes tai yra ypač svarbus galutinio gaminio aspektas. Šis nerūdijantis plienas pasižymi nuostabiomis mechaninėmis savybėmis, kurios yra geresnės už dažniausiai naudojamų austenitinių nerūdijančių plienų, ir taip pat yra atsparesni korozijai, bet šiai medžiagai yra būdinga labai tarsi ir nelinkusi lūžti drožlė, o mažas medžiagos šiluminis laidumas yra atsakingas už aukštą temperatūrą apdirbimo zonoje. Dėl aukštos temperatūros poveikio tekinimo plokštelės labai sparčiai dyla. Plokštelių dilimas neigiamai veikia paviršiaus išbaigimą. Dėl šios priežasties yra svarbu rasti tinkamus apdirbimo parametrus, kad būtų galima žinoti mažiausią pasiekiamą paviršiaus šiurkštumą ir žinoti ribas, iki kurių galima naudoti tekinimą, o kada jau reikia naudoti šlifavimo operacijas. Šios žinios yra ypač svarbios vienietinėje arba smulkiaserijinėje gamyboje, nes joje dažniausiai daugiausia laiko užtrunka staklių suderinimas, o ne pačios detalės gamyba. Taip pat sužinota, kaip tikslaus tekinimo pjovimo režimai paveikia paviršiaus kietumą, kuris lemia pagaminto gaminio atsparumą dilimui. Ši medžiaga pasižymi koroziniu pleišėjimu, tai yra, kad medžiaga yra linkusi koroduoti ties paviršiaus pažeidimais, tai parodo, kad šios medžiagos paviršiaus išbaigimas yra ypač svarbus, kad gaminiai būtų ilgaamžiai. Šio darbo eigoje sužinota pjovimo parametrų daroma įtaka tiksliojo apdirbimo laikui. Tai yra ypač svarbu daugiaserijinėje ir masinėje gamyboje, nes kiekviena sutaupyta sekundė apdirbimo metu, leidžia padidinti įmonės gaunamą pelną ir leidžia užsakovams pasiūlyti mažesnę gaminio kainą, taip padidinant įmonės konkurencingumą rinkoje. Optimalūs pjovimo režimai suteikia galimybę gaminti aukščiausios kokybės produktus už mažiausią kainą.

Tikslas: ištirti *Duplex* plieno apdirbimo savybes tekinant.

Uždaviniai:

1. įvertinti *Duplex* plieno apdirbimo galimybes;
2. atlikti tekinimo eksperimentus skirtingais pjovimo režimais;
3. ištirti aptekintų bandinių kokybę paviršiaus atžvilgiu ir paviršinio sukietinimo atžvilgiu;
4. pateikti rekomendacijas užsigrūdinančio plieno tekinimui.

Hipotezė: *Duplex* plieno paviršiaus kietumas ir paviršiaus šiurkštumas skiriasi, kai medžiaga apdirbama skirtingais pjovimo režimais ne tik rupiojo, bet ir tiksliojo apdirbimo metu.

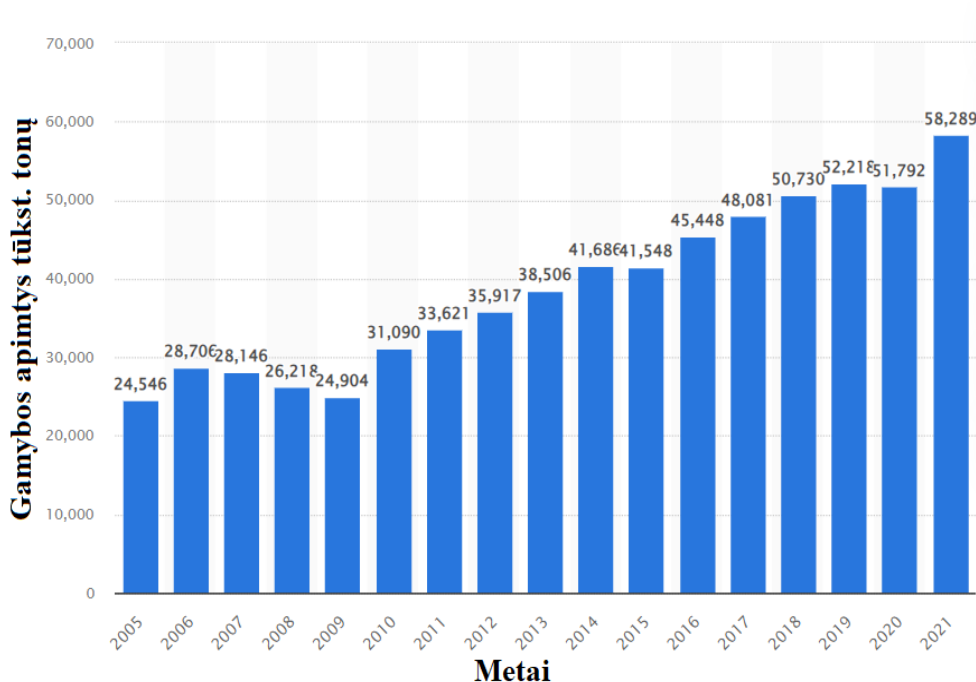
1. Nerūdijantis plienas

Nerūdijantis plienas – tai geležies pagrindo lydinys, kurio sudėtyje yra ne mažiau kaip 10,5 procento chromo. Be chromo nerūdijančiuose plienuose didžiausią procentinę dalį sudaro nikelis, kurio kiekis lydinyje gali pasiekti net 25 %. Nerūdijančio plieno paviršiuje dėl medžiagos sąveikos su deguonimi ir vandeniu susidaro chromu prisotinta oksido plėvelė. Ši plėvelė yra savaime gyjanti ir ji saugo medžiagą nuo korozijos. Nerūdijantys plienai yra skirstomi į 5 pagrindines grupes [1]:

- *austenitiniai* nerūdijantys plienai;
- *martensitiniai* nerūdijantys plienai;
- *feritiniai* nerūdijantys plienai;
- *Duplex* nerūdijantys plienai;
- dispersinio kietėjimo nerūdijantys plienai.

Nerūdijantis plienas yra plačiai naudojamas. Jo pritaikymas galimas ir gaminant tarą maistui, gėrimams, virtuvės įrangai gaminti, taip pat pritaikomas medicinoje. Iš nerūdijančio plieno gaminama chirurginė įranga, implantai, ortodontiniai prietaisai, įvairūs vamzdžiai, rezervuarai, apdirbimo mašinos ir transporto priemonės [1].

Iš 1 paveikslėlio galima matyti, kad nerūdijančio plieno gamybos apimtys nuolat didėja. Nuo 2005 metų iki 2021 metų nerūdijančio plieno gamybos apimtys pasaulyje išaugo 2,37 karto. Ši diagrama parodo, kad nerūdijantys plienai yra neįprastai svarbūs 21 amžiuje. Be nerūdijančių plienų sunku įsivaizduoti tokią didelę pažangą aeronautikos, medicinos srityse ir maisto pramonėje.



1 pav. Nerūdijančio plieno gamybos apimtys pasaulyje [2]

XXI amžius yra stebinantis inovacijomis, nuolatiniu tobulėjimu visose srityse, taipogi skiriamas labai didelis dėmesys visuomenės saugui užtikrinti, tuo pat metu siekiant daryti kuo mažesnę neigiamą įtaką gamtai. Nerūdijantys plienai ir kitos atsparios korozijai medžiagos yra itin svarbios sprendžiant šiuos kylančius iššūkius. Plėtojantis jūrinei infrastruktūrai ir aeronautikos sritims, ypatingas dėmesys skiriamas medžiagoms, kurios atsparios korozijai, ypač sūrioje ar net rūgštingose terpėse.

Nerūdijantys plienai užtikrina komponentų, struktūrų ilgaamžiškumą, kuris padeda sumažinti ne tik eksploatacines išlaidas, bet ir sumažina panaudojamos medžiagos kiekį. Sumažinus panaudojamą medžiagos kiekį taip pat sumažėja ir anglies dvideginio emisijos, kurios būtų išmetamos į orą medžiagos gamyboje, apdirbime, transportavime ir kitose operacijose. Įprastiniai nerūdijantys plienai dažnai nėra tokie ilgaamžiai arba ne taip gerai pritaikyti naudoti atšiauriomis sąlygomis kaip nauji, daug sudėtingesni lydiniai.

1.1. Duplex nerūdijantis plienas

Duplex nerūdijantis plienas – tai plienas, po kurio sukūrimo stipriai išsiplėtė nerūdijančių plienų pritaikymo ribos. Šio plieno vienas iš esminių požymių yra tai, kad jo mikrostruktūra yra sudaryta iš praktiškai lygių dalių – 50 % ferito ir 50 % austenito. Dar vienas šių nerūdijančių plienų grupei būdingas ir išskirtinis požymis yra tai, kad šios kategorijos medžiagos yra feromagnetikai. Feromagnetines savybes lemia ferito mikrostruktūros dalis, nes šis mikroelementas turi kristalinę kubinę struktūrą, kuri yra centruota į vidų. Šio tipo kategorijai priskiriami nerūdijantys plienai, palyginti su austenitiniais nerūdijančiais plienais, yra daug atsparesni korozijai, ypač terpėse, kuriose yra daug chlorido jonų. Taip pat *Duplex* nerūdijantys plienai yra tinkamesni įvairioms konstrukcijoms dėl aukštesnės stiprumo ribos. Šio tipo plienai dažnai naudojami naftos, chemijos ir jūros pramonėje, o plačiausiai pritaikoma vamzdynų, slėginių indų ir įvairių konteinerių gamyboje. Palyginti su *feritiniais* ir *austenitiniais* nerūdijančiais plienais, kaip privalumą galima dar išskirti aukštesnes atsparumo tempimui ir takumo ribos vertes. *Duplex* klasei priskiriamiems plienams yra būdinga tai, kad cheminėje sudėtyje vyrauja cheminiai elementai pateikti 1 lentelėje (žr. 1 lentelę) [3]:

1 lentelė. DSS sudėčiai būdingi cheminiai elementai

Cheminis elementas	Chromas	Nikelis	Anglis	Molibdenas
Procentinė masės dalis, %	24–28 %	4,8 %	0,1 % <	2,5 % <

Be cheminių elementų esančių 1 lentelėje DSS naudojami ir kiti legiruojantieji elementai: varis, titanas ir niobis [3].

Apibendrinant pagrindinius nerūdijančių *Duplex* plienų bruožus, reikia paminėti, kad jie yra feromagnetikai, kurių mikrostruktūrą sudaro panašiomis dalimis pasiskirstę ferito ir austenito mikroelementai. Iš cheminės sudėties matyti, kad legiruojantieji elementai sudaro daugiau kaip 30 % šio plieno masės, iš to galima suprasti, kad ši plienų rūšis yra ypač atspari korozijai ir mechaniniam apdirbimui.

1.1.1. Duplex nerūdijantis plienas EN 1.4462

Duplex nerūdijantis plienas *EN 1.4462* yra plačiausiai naudojamas iš visų *Duplex* kategorijai priskiriamų plienų. Šio nerūdijančio plieno sunaudojimas siekia net 60% viso *DSS* kategorijai priskiriamų plienų sunaudojimo. *EN 1.4462* plieno mikrostruktūra sudaryta iš ferito ir austenito, o vienos iš jų turinė dalis negali būti mažesnė, nei 30 %. Šiam nerūdijančiam plienui yra būdinga cheminėje sudėtyje turėti tokius elementus, kaip yra pateikta 2 lentelėje (žr. 2 lentelę) [4]:

2 lentelė. Įprastinė EN 1.4462 cheminė sudėtis

Cheminis elementas	Chromas	Nikelis	Molibdenas
Procentinė masės dalis, %	22 %	4,5 %	2,5 %

Duplex nerūdijančio plieno EN 1.4462 charakteristikų ir mechaninių savybių, atsparumo korozijai, kainos, gamybos metu išskiriamos anglies dioksido emisijos ir kitų parametų palyginimą su *austenitiniu* nerūdijančiu plienu AISI 316L ir *feritiniu* AISI 446 galima pamatyti 3 lentelėje (žr. 3 lentelę) [5]:

3 lentelė. EN 1.4462, AISI 316L ir AISI 446 savybių ir charakteristikų palyginimas [5]

Savybės ir charakteristikos	EN 1.4462	AISI 316L	AISI 446
Mechaninės savybės			
Takumo riba prie 20 °C	460-510 MPa	170-310 MPa	275-350 MPa
Tamprumo riba prie 20 °C	680-880 MPa	515-560 MPa	480-615 MPa
Santykinis pailgėjimas prie 20 °C	20-25%	30-50 %	15-20 %
Jungo modulis prie 20 °C	195-205 GPa	195-205 GPa	195-205 GPa
Kietumas	230-340 HV	150-160 HV	150-180 HV
<i>Charpy V</i> Smūginio stiprumo testas prie 0 °C	250 J	175 J	-
<i>Charpy V</i> Smūginio stiprumo testas prie -100 °C	50 J	175 J	-
Atsparumas nuovargiui po 10 ⁷ ciklų	260-290 MpžPa	260-310 MPa	240-270 MPa
Atsparumas lūžimui	145-195 MPa√m	55-75 MPa√m	75-125 MPa√m
Apdirbamumas			
Karštasis formavimas	Priimtinas	Puikus	Priimtinas
Šaltasis formavimas	Ribotas	Puikus	Ribotas
Suvirinimas	Geras	Puikus	Geras
Eksploatacinė temperatūra			
Tirpimo temperatūra	1410-1465 °C	1375-1400 °C	1430-1510 °C
Didžiausia eksploatacinė aplinkos temperatūra	300 °C	870 °C	1180 °C
Mažiausia eksploatacinė aplinkos temperatūra	-50 °C	-200 °C	-75 °C
Jautrumas trapumui prie 475 °C	Labai didelis	Nėra	Labai didelis
Jautrumas sigmos fazės trapumui	Labai didelis	Žemas	Didelis
Atsparumas korozijai			
PREN	30-38	23-28	23-31
Taškinė ir plyšinė korozija	Aukštas	Vidutinis	Vidutinis
Įtempių korozijos pleišėjimas (chloridas)	Nejautrus	Lengvai jautrus	Nejautrus
Tarpkristalinė suvirinimo juostos korozija	Puikus	Geras	Geras
Neorganinės rūgštys	Geras	Vidutinis	Ribotas
Jūros vanduo	Geras	Geras	Geras
Rūgšti nafta ir dujos	Geras	Vidutinis	Ribotas
Kitos savybės			
Kaina	6,3-6,9 USD/kg	3,1-3,7 USD/kg	1,6-1,7 USD/kg
Medžiagos gamybos CO ₂ emisija	4,4-4,9 $\frac{CO_2 kg}{kg}$	5,3-5,9 $\frac{CO_2 kg}{kg}$	3,4-3,8 $\frac{CO_2 kg}{kg}$

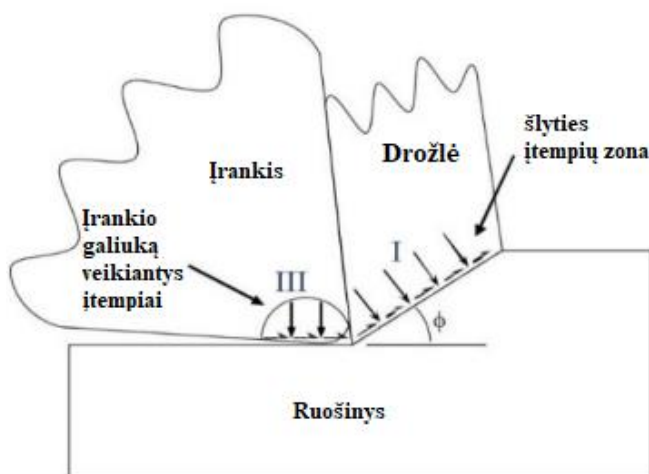
Iš 3 lentelės galima matyti, kad *Duplex EN 1.4462* pasižymi geromis mechaninėmis savybėmis, tokiomis kaip kietumas, stiprumas, plačiu atsparumo korozijai spektru, taip pat visai neblogomis suvirinamumo savybėmis, kas parodo, kad šis plienas turi didelę perspektyvą plečiant jo panaudojimo ribas. Lyginant šią plieno rūšį su *feritiniais* ir *austenitiniais* nerūdijančiais plienais, ji turi didesnę atsparumą smūgiams, geresnes mechanines savybes, o aukštesnis *PREN* rodiklis parodo, kad yra ir atsparesnis korozijai. Didžiausias šios medžiagos apribojimas, kad šio plieno ilgaamžiškumui didžiulę įtaką daro apdirbimo, gamybos, suvirinimo ir eksploatavimo metu veikianti temperatūra. Saugi eksploatacinė temperatūra svyruoja nuo -50 °C iki 300 °C [5].

1.1.2. Mechaninio apdirbimo poveikis kietumui

Apdirbamo ruošinio paviršius yra labiausiai pažeidžiama zona. Užsigrūdinimas apdirbimo metu pagrinde atsiranda dėl paviršiaus modifikacijų, kurios yra pakankamai stiprios, kad sukeltų liekamąsias deformacijas. Šiuo atžvilgiu, paviršiniai sluoksniai visada yra aukščiausių įtempių zonos, nes įtempiai linkę koncentruotis prie geometrinių paviršiaus defektų (įtrūkimų, įpjovimų, skylių, geometrinių netolygumų) [6]. Ši zona daro didžiausią įtaką mechaninėms savybėms. Pjovimo operacijų metu vykstanti plastinė deformacija, kuri yra sukeliamą didelės mechaninės apkrovos ir aukštos temperatūros, gali netgi pakeisti apdirbamos medžiagos paviršinių sluoksnių mechanines savybes, dažniausiai kietumą ir stiprumą. Šis reiškinys įvardijamas kaip užsigrūdinimas apdirbimo metu, dėl kurio prastėja apdirbimo savybės. Kai kurioms medžiagoms šis procesas sugeba neigiamai paveikti tolimesnį medžiagos apdirbimą. Užsigrūdinimo apdirbimo metu sukeliama neigiami efektai [7]:

- aukštesnė temperatūra apdirbimo zonoje;
- didesnė jėga reikalinga pjovimo operacijai atlikti;
- didesnė įrankio dilimo sparta;
- trumpesnis įrankio darbinis laikas.

Pjovimo įrankio sukeltos deformacijos ir įtempių formavimosi vietos apdirbimo procese pateiktos 2 paveikslėlyje.

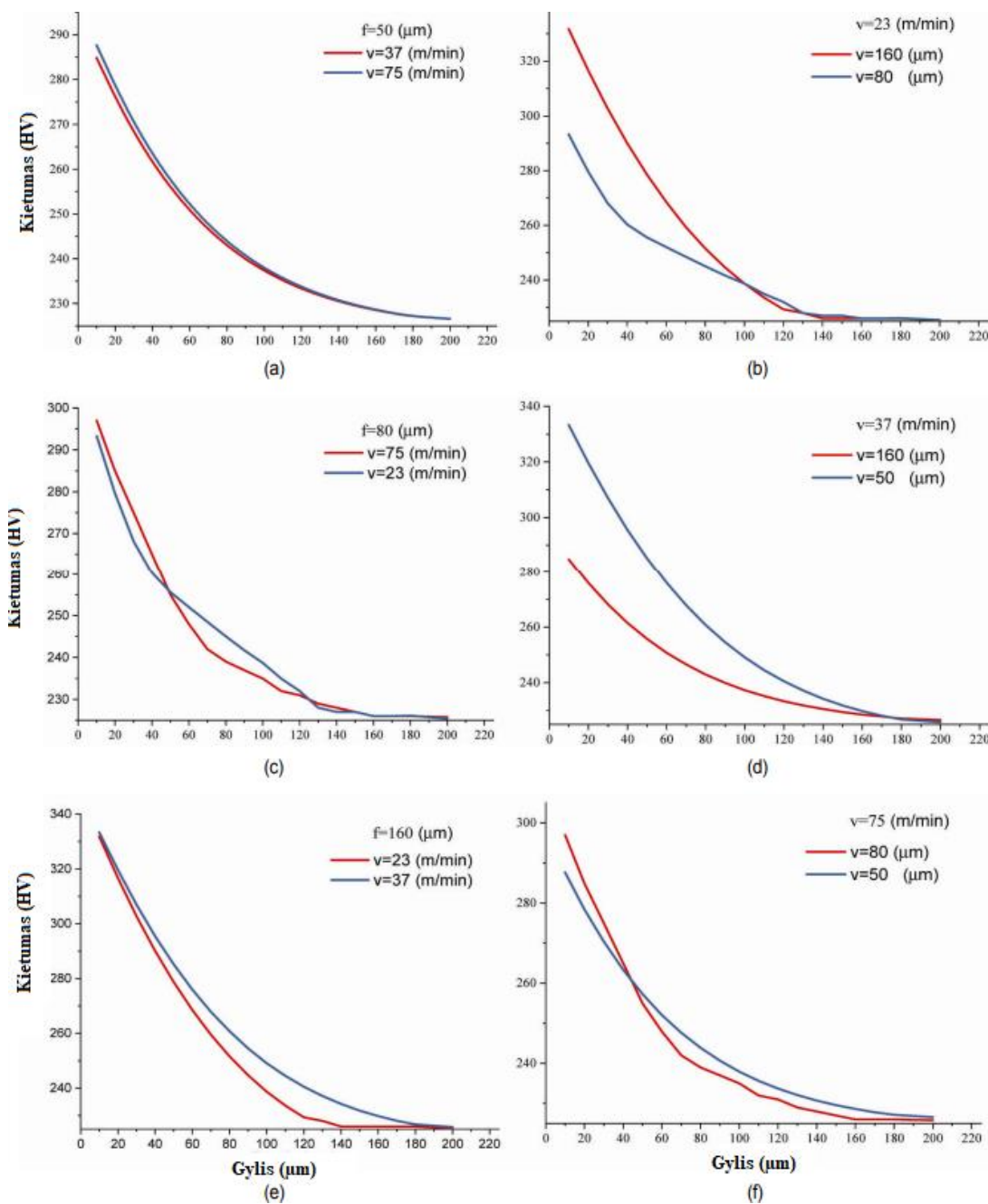


2 pav. Įtempių šaltiniai apdirbimo procese [7]

Iš 2 paveikslėlio matoma, kad pjovimo įrankis pjaudamas drožlę deformuoja priešakyje ir po įrankio pagalbinės pjovimo briaunos, ir ties įrankio viršūne esančią medžiagą. Įrankį ir ruošinį pjovimo metu intensyviai veikia ne tik trintis tarp ruošinio, bet ir aukšta temperatūra ruošinio ir pjovimo briaunos

sąlyčio taške. Intensyvi deformacija ir temperatūra ypač paveikia medžiagos paviršinius sluoksnius. Apdirbimo metu vyksta įvairūs fizikiniai ir cheminiai procesai, kurie tiesiogiai daro įtaką apdirbtos detalės paviršiaus topografijai. Paviršiniai sluoksniai nuo aukštos temperatūros ir deformacijos yra linkę užsigrūdinti, tai yra ruošinio paviršinių sluoksnių kietumas, stiprumas ir trapumas didėja.

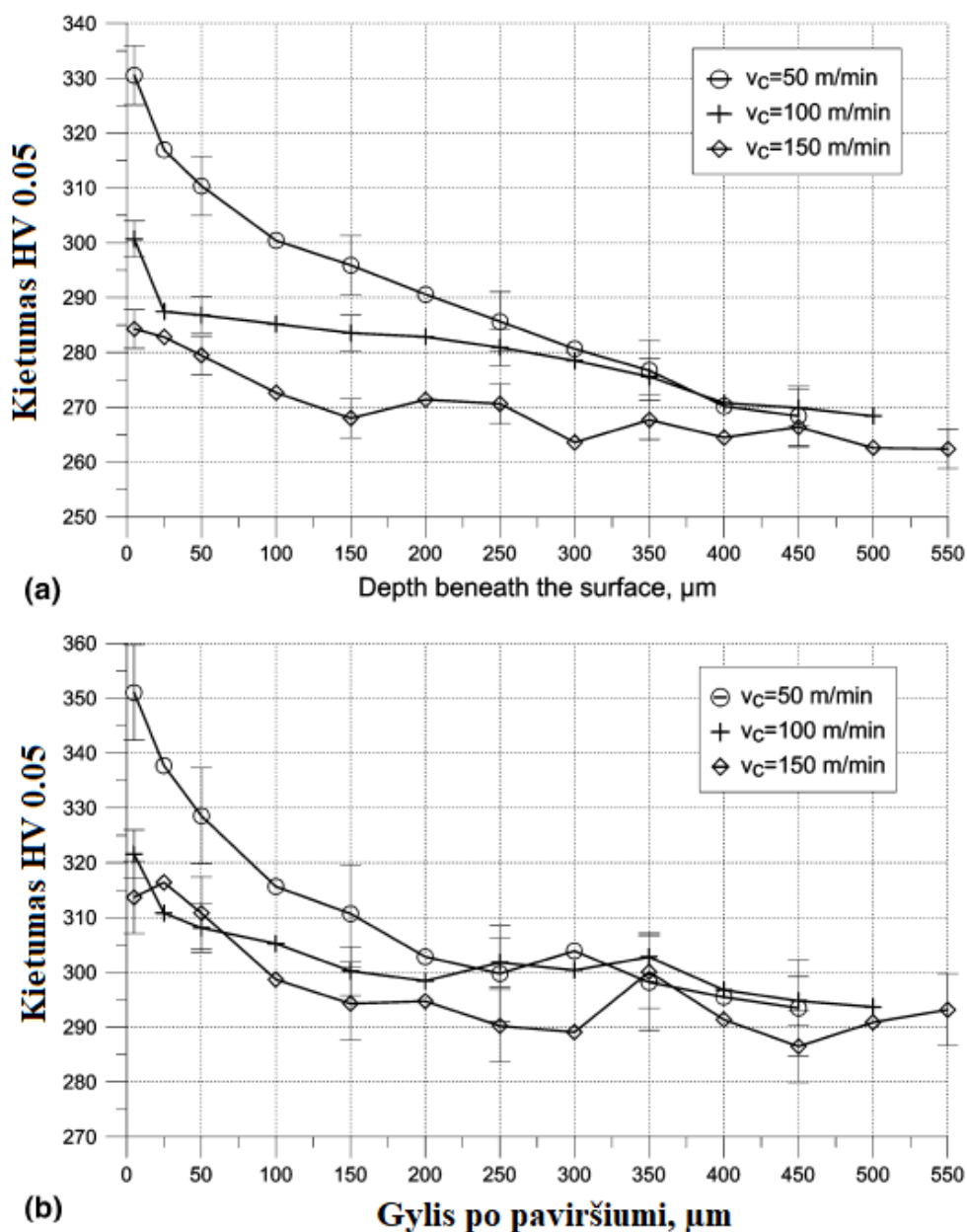
Nors mikrokietumo ir paviršinių sluoksnių užsigrūdininimo laipsnio ir gylio tyrimai literatūroje sutinkami gana dažnai, tačiau *Duplex EN 1.4462* užsigrūdininimo tyrimų tekinimo operacijų metu atlikta labai mažai. 3 paveikslėlyje matomi frezavimo eksperimento gauti rezultatai, kurio metu buvo tirtas *Duplex EN 1.4462* užsigrūdininimo laipsnis skirtinguose gyliuose po paviršiumi, o pagrindiniai kintamieji buvo pjovimo greitis ir pastūma.



3 pav. Pjovimo greičio ir pastūmos poveikis mikrokietumui [7]

Iš diagramų esančių 3 paveikslėlyje matoma, kad frezavimo metu stipriai pakinta medžiagos kietumas. Rezultatai parodo, kad medžiagos dalies, kuri buvo nepaveikta apdirbimo, kietumas buvo

mažesnis nei 230 HV. Eksperimento rezultatuose matoma, kad mikrokietumas aukščiausiam taške pasiekė net 330 HV, o užsigrūdinimo gylis pasiekė 0,2 milimetro.



4 pav. Pjovimo greičio poveikis mikrokietumui, kai (a) feritas, o (b) austenitas [8]

4 paveikslėlyje pateiktas mikrokietumas tekimo eksperimento, kurio metu buvo stebima pjovimo greičio ir plokštelės padengimo daroma įtaka mikrokietumui. Eksperimente naudotas pjovimo gylis 2 mm, pastūma 0,3 mm/aps [8]. Palyginus 3 ir 4 paveikslėlius galima matyti, kad tekime nerūdijantis plienas *Duplex 1.4462* užsigrūdina iki 10 HV daugiau, o užsigrūdinimo gylis didesnis net 2,5 karto.

Apžvelgta informacija parodo, kad užsigrūdinimas apdirbimo metu yra dėmesio vertas procesas, kuris iššaukia didelius pokyčius *Duplex 1.4462* paviršiniuose sluoksniuose. Šie pokyčiai daro neigiamą įtaką apdirbimo procesui. Apdirbimo metu reiktų atsižvelgti į paviršių užsigrūdinimą, o ypač parenkant pjovimo įrankius, nes ne visi pjovimo įrankiai yra pritaikyti apdirbinėti kietas medžiagas. Neteisingai parinkti pjovimo įrankiai gali lemti aukštus kaštus gaminant detales iš šios medžiagos.

1.1.3. Paviršiaus šiurkštumas

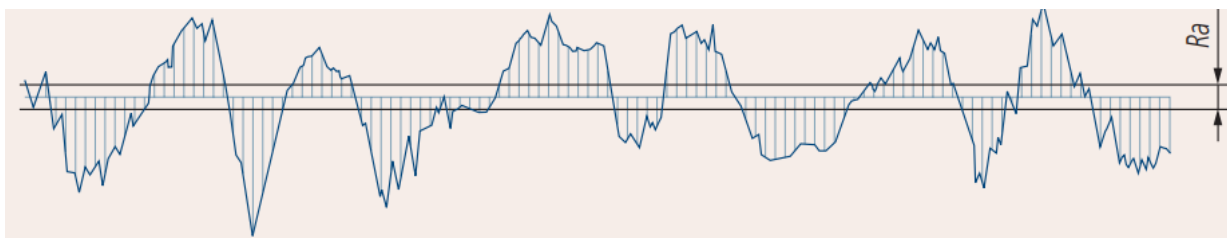
Nustatyta, kad paviršiaus šiurkštumas yra viena svarbiausių gaminio savybių [9]. Paviršiaus šiurkštumas – tai apdirbimo metu atsirandančių mikroskopinių geometrinių įdubimų ir iškilimų visuma ant apdirbto paviršiaus [10]. Paviršiaus nelygumai apdirbimo metu atsiranda dėl pjovimo įrankio ir apdirbamo ruošinio sąveikos. Paviršiaus šiurkštumo tyrimai yra svarbūs, nes įprastai siekiant gauti mažiausią paviršiaus šiurkštumą yra pasinaudojama turima apdirbimo patirtimi, įrankio parametrais, apdirbimo režimų koregavimu, taip sunaudojamais papildomais resursais detalei pagaminti [11]. Paviršiaus šiurkštumui didžiausią įtaką daro [9, 11]:

- pjovimo gylis;
- pastūma;
- pjovimo greitis;
- įrankio geometrija;
- naudojamų pjovimo įrankių nusidėvėjimas;
- sūklės deformacija;
- įrankio vibracija;
- ruošinio elastinis atsistatymas;
- temperatūra apdirbimo zonoje;
- aušinimo sąlygos.

Šių parametru įtakos įvertinimas yra neatsiejama paviršiaus šiurkštumo tyrimų dalis. Paviršiaus šiurkštumas svarbus dėl [9, 10]:

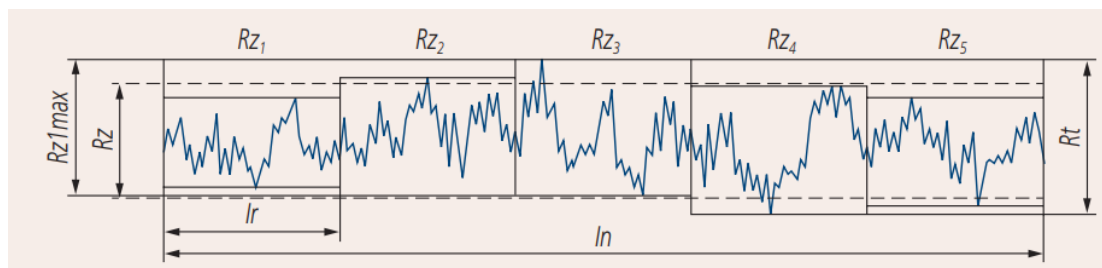
- gaminio ilgaamžiškumo;
- eksploatacinio veikimo;
- kokybės;
- vientisumo;
- sandarumo;
- atsparumo dilimui;
- atsparumo nuovargiui;
- kontaktiniam standumui;
- mechaninių savybių;
- atsparumo korozijai;
- kliento reikalavimų išpildymo.

Paviršiaus šiurkštumui apibrėžti dažniausiai naudojami parametrai R_t , R_a ir R_z . 5 paveikslėlyje matomas parametro R_a atvaizdavimas. R_a – šiurkštumo dydžio aritmetinis vidurkis. Jis parodo, kiek nutolęs aritmetinis vidurkis nuo šiurkštumo profilio vidurkio linijos. Tai dažniausiai naudojamas paviršiaus šiurkštumo parametras [12].



5 pav. R_a grafinis atvaizdavimas [12]

Rt ir Rz parametrų atvaizdavimas pateiktas 6 paveikslėlyje. Rt - tai paviršiaus šiurkštumo profilio aukštis, tai yra skirtumas tarp žemiausios ir aukščiausio taškų diagramoje. Rz - tai vidutinis paviršiaus šiurkštumo gylis, tai yra 5 Rzi matavimų vidurkis, o Rz1max – didžiausias šiurkštumo gylis iš 5 Rz reikšmių [12].



6 pav. Rz1max ir Rz grafinis atvaizdavimas [12]

4 lentelėje yra pateiktos paviršiaus šiurkštumo tolerancijos, kurios aprašytos LST EN ISO 1302:2002 standarte (žr. 4 lentelę) [13] :

4 lentelė. Paviršiaus šiurkštumo tolerancijos [13]

Paviršiaus šiurkštumas Ra, μm	Paviršiaus šiurkštumo tolerancijos numeris
50	N12
25	N11
12,5	N10
6,3	N9
3,2	N8
1,6	N7
0,8	N6
0,4	N5
0,2	N4
0,1	N3
0,05	N2
0,025	N1

1 priede yra matoma *Duplex* 1.4462 nerūdijančio plieno atliktų tyrimų rezultatų lentelė [14, 15, 16, 17, 18, 19, 20]. Iš šios lentelės matoma, kad eksperimentuose naudotų kintamųjų sklaida yra:

- linijinis pjovimo greitis V_c – 50 – 200 m/min;
- pastūma f_r – 0,1 – 0,6 mm/aps;
- pjovimo gylis a_p – 0,5 – 4,5 mm;
- plokštelės viršūnės suapvalinimo spindulys r – 0,4 – 2,4 mm;
- aušinimas – emulsija, be aušinimo, šaltas oras.

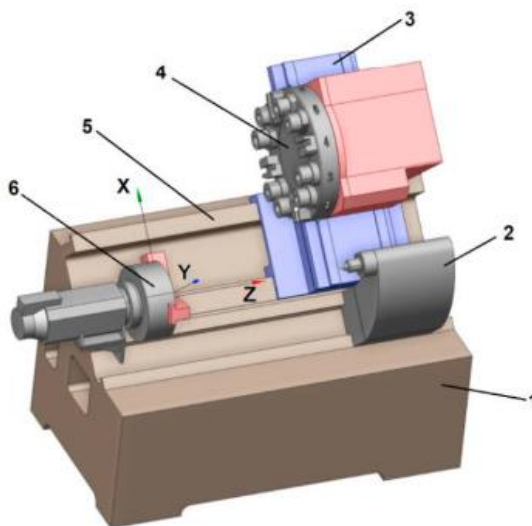
Literatūros apžvalga [14, 15, 16, 17, 18, 19, 20] parodo didžiulę tyrimų spragą. Praktiškai visi atlikti tekimo tyrimai apdirbant *Duplex* 1.4462 nerūdijantį plieną yra atlikti dideliais pjovimo gyliais, didele pastūma, ir plokštelėmis, kurių suapvalinimo spindulys yra 0,8 mm ir didesnis. Tai parodo, kad tyrimų rezultatai labiau pritaikyti rupiam tekimui, o ne tiksliam apdirbimui. Kaip matoma 1

priede esančioje lentelėje [14, 15, 16, 17, 18, 19, 20] mažiausias paviršiaus šiurkštumas gaunamas, kai pastūma mažesnė, geriausios vertės gautos, kai pastūma 0,1 mm/aps.

1.2. SPV tekimas

SPV – skaitmeninis programinis valdymas, tai yra koncepcija gamyboje, kurioje automatizuotos staklės atlieka joms iš anksto numatytas funkcijas, suprantamas iš pateiktų instrukcijų. Šiuolaikinėje gamyboje SPV tekimas yra plačiai paplitęs dėl staklių suteikiamos galimybės nebrangiai gaminti aukštos kokybės komponentus su labai mažomis matmenų nuokrypomis. Siekiant optimalaus tekimo proceso yra svarbu parinkti teisingus įvesties parametrus, taip tinkamai išnaudojant staklių galimybes [21].

Apdirbimas yra viena iš svarbiausių gamybos pramonės operacijų. Apdirbimas atliekamas, kad būtų pasiekama optimali, norima ir vartotojo poreikius tenkinanti gaminio forma, pašalinant nepageidaujamą medžiagos dalį nuo ruošinio. Apdirbimui reikalingas įrankis, kuris yra pagamintas iš kietesnės medžiagos negu apdirbama medžiaga. Apdirbimas vyksta dėl šlyties deformacijos, kurios metu medžiaga veikama šlyties deformacijos yra pašalinama drožlės forma. Iš visų apdirbimo operacijų populiariausias yra tekimas. PVS tekimas nuolat pakeičia tradicines tekimo operacijas, nes didėja klientų noras ieškoti pigesnių, aukštesnės kokybės, didesnio tikslumo, geresnės paviršiaus topografijos gaminių [21]. SPV tekimo staklių galimybės nuolat plečiasi. Šiuolaikinės tekimo staklės dažnai galima sutikti ne tik X ir Z ašis, tačiau ir C, Y ašis, aktyvius įrankius ir t.t. Nors SPV tekimo pagrindu išlieka gaminiai, kurie simetriški centrinės ašies atžvilgiu, tačiau papildomi moduliai išplečia šių staklių galimybes, taip leidžiant atlikti kiek platesnį spektrą funkcijų.

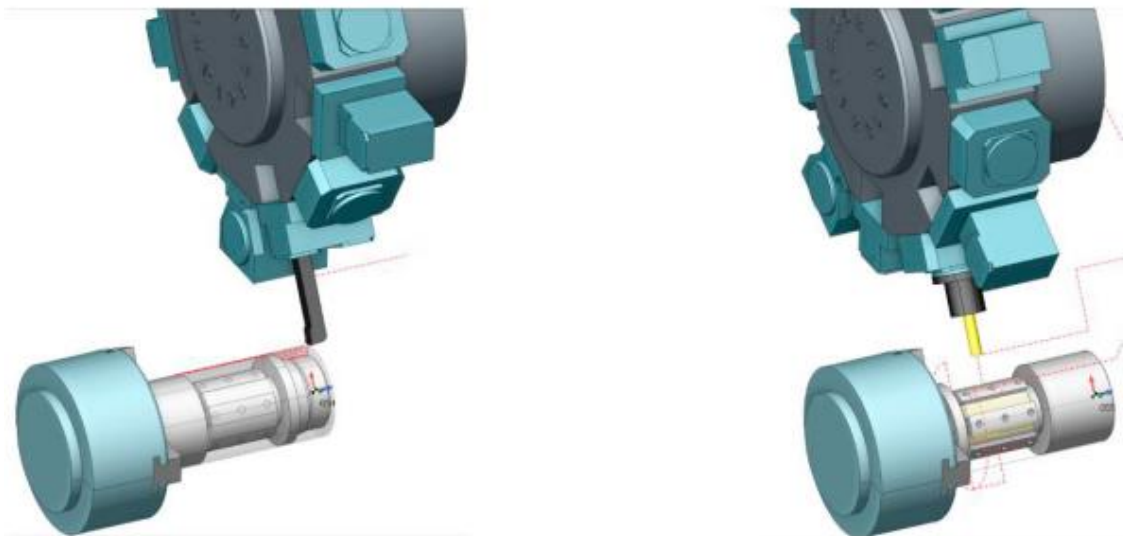


7 pav. Standartinė SPV staklių sandara [22]

Standartinės SPV staklių sandara matoma 7 paveikslėlyje. Pagrindiniai elementai [22]:

1. staklių korpusas;
2. arkliukas;
3. X ašies kreipiančiosios;
4. revolverinė galvutė;
5. Z ašies kreipiančiosios;
6. Suklys.

Šiuolaikinės programinio valdymo staklės nebeapsiriboja įprastomis tekimo operacijomis – vidinio ir išorinio išilginio ir galinio tekimo operacijomis. Modernios tekimo staklės, kaip matoma 8 paveikslėlyje, pasinaudojus aktyviais įrankiais ir Y ašimi gali atlikti ir frezavimo operacijas [22].



8 pav. Kairėje išilginio tekimo operacija, dešinėje frezavimo operacija [22]

Apžvelgta informacija parodo, kad SPV tekimas nebeapsiriboja išilginio, galinio tekimo operacijomis, tačiau gali atlikti ir frezavimo, gręžimo, sriegimo, centravimo operacijas, ne tik gaminio simetrijos ašyje, bet ir išoriniame ruošinio diametre, galiniame paviršiuje nutolus nuo ašinės linijos X ašies kryptimi.

1.2.1. Pjovimo įrankiai

Metalo pjovimas - tai procesas, kurio metu pjovimo įrankiu pašalinama perteklinė medžiaga drožlės pavidalu. Pjovimo įrankiai ir naudojami technologiniai parametrai yra patys svarbiausi faktoriai, kurie lemia pagaminto gaminio kokybę ir jo apdirbimo kainą. Pjovimo operacijai atlikti naudojamos plokštelės įprastai kenčia nuo stiprios pjovimo jėgos, nusidėvėjimo, aukštos temperatūros, trinties. Dėl šių veiksnių labai svarbu tinkamai parinkti plokšteles, kad būtų užtikrinamas sklandus apdirbimo procesas [23]. Mechaninio apdirbimo sferos pažangą visada lydėjo pjovimo įrankių tobulėjimas. Šis tobulėjimas leido stipriai padidinti pjovimo įrankių našumą. Našumo augimui didžiausią įtaką darė pjovimo įrankių dangų atsiradimas ir jų progresas. Ši pažanga siejama su plonomis dangomis ant pjovimo įrankių. Daugiasluoksnės nano dangos suteikia tinkamiausius savybių rinkinius, kurie pritaikyti kiekvienai apdirbimo sąlygai. Dažniausiai apdirbimo metu yra naudojami CVD ir PVD metodais dengti pjovimo įrankiai [24].

Cheminio nusodinimo garais (CVD) būdu dengiamos plokštelės pasižymi atsparesnėmis dangomis nei PVD būdu padengtos plokštelės. Šio tipo plokštelių dengimas ypač tinka SiAlON pagrindo plokštelėms, nes tarp dangos ir plokštelės susidaro stiprus jungiamasis sluoksnis tarp atomų. CVD plokštelių įprastinės dangos yra [25]:

- titano karbidas (TiC);
- titano karbonitridas (TiCN);
- titano nitridas (TiN).

- aliuminio oksidas (Al_2O_3);
- titano aliuminio nitridas (TiAlN).

Fizikinio garų nusodinimo (PVD) dangomis dengtos plokštelės dažniausiai naudojamos mechaninio apdirbimo pramonėje norint pagerinti ne tik mechanines, bet ir tribologines, šilumines įrankių savybes. Tai parodo, kad dangos ant pjovimo įrankių gali padėti sumažinti apdirbimo sąnaudas, pagerinti pjovimo įrankių savybes, padidinti apdirbimo našumą. PVD būdu plokštelėms dengti dažniausiai naudojamas TiAlN . Šios dangos savybėms didžiausią įtaką daro liekamieji įtempimai. Jie turi poveikį dangos kietumui, sukibimui ir atsparumui lūžiams [26]. Šio tipo plokštelėmis pasiekiamas geresnis paviršiaus šiurkštumas, lyginant jas su CVD danga padengtomis plokštelėmis [27], tačiau paminėta, kad jos yra ne tokios ilgaamžės, todėl rupiam apdirbimui būtų rekomenduojama rinktis CVD tipo metodu dengtas plokšteles [24].

Atlikta plokštelių analizė parodo, kad norint rasti optimalius apdirbimo režimus, kad būtų gautas mažiausias paviršiaus šiurkštumas, reikia rinktis PVD dangomis padengtas tekimo plokšteles, nes CVD plokštelėmis apdirbant gaunamas didesnis paviršiaus šiurkštumas.

1.3. Skyriaus apibendrinimas

Apibendrinant kas prieš tai aptarta, galima teigti, kad nerūdijančio plieno gaminių kiekvienais metais gaminama vis daugiau. Per 17 metų šio tipo plienų panaudojimas padidėjo 2,37 karto. Remiantis teorine medžiaga galima išskirti nerūdijančius plienus į 5 pagrindines kategorijas – *austenitinius*, *feritinius*, *martensitinius*, *Duplex* ir *dispersinio kietėjimo*. Nustatyta, kad *Duplex EN 1.4462* nerūdijantis plienas yra plačiausiai naudojamas iš visų *Duplex* plienų, jo panaudojimas siekia net 60 % visų *Duplex* kategorijai priskiriamų plienų. Literatūros analizė parodė, kad jis atsparesnis įvairaus tipo korozijai lyginant su *austenitiniais* plienais, taip pat šio plieno gamyboje yra išmetama mažiau anglies dvideginio. Įvertinant, kad šis plienas yra atsparesnis korozijai, parodo jo teikiamą naudą konstrukcijose, kurios turi būti ilgaamžės. Pastebėta, kad frezavimo eksperimentuose mikrokietumas po apdirbimo gali išaugti 100 HV, o užsigrūdinimo gylis pasiekti 0,2 mm, o tekimo eksperimentuose užsigrūdinimo gylis siekia net 0,5 mm. Taip pat sužinota, kad paviršiaus šiurkštumui apdirbimo metu įtaką daro pjovimo gylis, pastūma, pjovimo greitis, įrankio geometrija, įrankių nusidėvėjimas, vibracijos, ruošinio elastinis atsistatymas, temperatūra susidaranti apdirbimo zonoje ir aušinimo sąlygos. Taip pat sužinota, kad geras paviršiaus šiurkštumas daro teigiamą įtaką gaminių ilgaamžiškumui, eksploataciniam veikimui, kokybei, vientisumui, sandarumui, atsparumui dilinimui, nuovargiui, kontaktiniam standumui, mechaninėms savybėms, atsparumui korozijai ir klientų poreikių išpildymui. Taip pat pastebėta, kad atlikta vos keletas paviršiaus šiurkštumo tyrimų siekiant rasti tinkamiausius pjovimo režimus. Paviršiaus šiurkštumo ir mikrokietumo tyrimai yra ypač svarbūs gaminant kokybiškus gaminius.

Vienetinėje ir mažaserijinėje gamyboje didžiausius kaštus sudaro programų rašymo ir staklių derinimo laikas. Paviršiaus šiurkštumo tyrimas kai kuriais atvejais gali leisti atsisakyti šlifavimo operacijos, kas leistų stipriai sumažinti kaštus vienetinėje ir smulkiaserijinėje gamyboje.

2. Apdirbimo savybių tyrimų metodika

Šiame projekte bus atliktas paviršiaus šiurkštumo tyrimas, siekiant surasti optimalius režimus apdirbinėjant nerūdijanti plieną *Duplex* EN 1.4462 ir įvertinti šių režimų įtaką kietumui, paviršiaus šiurkštumui, apdirbimo laikui, drožlės deformacijai. Nerūdijantys plienai yra priskiriami prie sunkiai apdirbamų medžiagų, nes drožlė sunkiai lūžta, o mažas medžiagos šiluminis laidumas neigiamai veikia pjovimo įrankį, nes perteklinė šiluma nėra pašalinama su drožle, o pereina į jį.

2.1. Eksperimento planas

1 priede surinkta informacija parodė [14, 15, 16, 17, 18, 19, 20], kad *Duplex* 1.4462 nerūdijančio plieno apdirbimo savybių tyrimuose didžiausias dėmesys buvo skiriamas rupiam apdirbimui. Didžiausia šių tyrimų dalis [14, 15, 16, 17, 18, 19, 20] atlikta nenaudojant aušinimo skysčio ir su plokštelėmis su 0,8 mm viršūnės suapvalinimo spinduliu, o pagrindiniai pjovimo parametrai svyravo:

- pjovimo greitis – 50 – 240 m/min;
- pastūma – 0,02 – 0,6 mm/aps;
- pjovimo gylis – 0,3 – 4,5 mm.

Šio eksperimento metu siekiama suprasti medžiagos reakciją į išbaigiamąjį, tai yra tikslųjį, apdirbimą. Atsižvelgiant į tai, kad tikslus apdirbimas dažniausiai atliekamas mažesnio viršūnės suapvalinimo spindulį turinčiomis plokštelėmis, eksperimentams parinktos naudoti plokštelės su 0,4 mm viršūnės suapvalinimo spinduliu ir režimai tinkami tiksliajam apdirbimui. Apdirbant mažas detales, velenus ar guolines skyles labai dažnai taikomos tolerancijos kampams, kad montuojamas guolis, krumpliaratis, įvorė ar koks kitas surinkimo elementas tinkamai užsimontuotų į jam numatytą vietą. Eksperimentui parinkti pjovimo režimai yra matomi 5 lentelėje (žr. 5 lentelę) :

5 lentelė. Eksperimente naudojami pjovimo režimai

numeracija	1	2	3
Pjovimo greitis m/min	150	200	250
Pastūma mm/aps	0,05	0,1	0,15
Pjovimo gylis mm	0,5	1	1,5

Eksperimentui atskaitos parametrai parinkti remiantis ISO 3685 standartu [28]. Šis standartas skirtas įrankių ilgaamžiškumui testuoti, kai naudojamosi vieno taško tekinimo įrankiais. Standartinės pjovimo įrankių testavimo sąlygos pateiktos 6 lentelėje (žr. 6 lentelę) [28]:

6 lentelė. Standartinės apdirbimo sąlygos

Apdirbimo sąlygos	A	B	C	D
Pastūma mm/aps	0,1	0,25	0,4	0,63
Pjovimo gylis mm	1	2,5	2,5	2,5
Viršūnės suapvalinimo spindulys mm	0,4	0,8	0,8	1,2

Šis standartas taip pat nusako, kad pjovimo gylis eksperimentuose privalo būti užtikrinamas su $\pm 5\%$ paklaida [28]. Kad būtų tiksliai nustatyta pjovimo gylio įtaka tiksliajam apdirbimui, pasirinkta atlikti tekinimo eksperimentą 2 praėjimais. 1 praėjimu pašalinami paviršiaus geometriniai netolygumai, panaikinama radialinio mušimo daroma įtaka. Abu praėjimai atliekami praktiškai identišku pjovimo

gyliu, nes tokiu būdu praktiškai panaikinama peilio ir ruošinio atstūmimo daroma įtaka. Kad būtų išvengiama vibracijų, pasirinktas tekintas *Duplex 1.4462* strypas, kurio diametras 30 mm, ir jis iš trijų kumštelių griebtuvo ištraukiamas 30,5 mm atstumu, kaip parodyta 9 paveikslėlyje.



9 pav. Ruošinio įstatymas

Pirma, pjovimo įrankis atvažiuoja į poziciją, kurioje ruošinio atstumas iki kumštelių yra $\pm 30,5$ mm, tada ranka ruošinys pritraukiamas prie išorinio tekinimo peilio ir užspaudžiamas trijų kumštelių griebtuvas. Tada nutekinamas galinis paviršius tam, kad būtų užtikrinamas identiškas ruošinio atstumas iki kumštelių. Po galinio paviršiaus nutekinimo ruošinys iš kumštelių lieka išlindęs apie 30 mm. Ruošinys laikomas standus, kai išsikišusi dalis iš už kumštelių yra mažesnė negu 2 ruošinio diametrai. Kai po galinio paviršiaus nutekinimo suformuojamas praktiškai identiškas ruošinio iškišimo iš kumštelių ilgis, staklės atlieka 10 sekundžių pauzę, kad ankstesnių tekinimo eksperimentų ir galinio paviršiaus nutekinimo metu suformuotos drožlės pasišalintų nuo konvejerio. Po pauzės atliekami du eksperimentiniai praėjimai su nauja plokšte. Po praėjimų staklės sustoja ir tuo metu surenkamos drožlės tolimesniems tyrimams. Ir galiausiai ruošinys pjaunamas iki 2 mm, kad nenukristų ir nebūtų pažeistas tiriamasis paviršius, bet būtų nulaužiamas nuo likusios ruošinio dalies ranka. Kai nulaužiamas nupjautas ruošinys, dar kartą paleidžiama programa nuo išilginio paviršiaus tekinimo, kad būtų užfiksuojamas teisingas tiksliojo tekinimo laikas. Po eksperimento išoriniam paviršiui tekinti naudota plokštelė yra pakeičiama nauja, kurios vienodo įtvirtinimo į plokštelių laikiklį užtikrinimui naudojamas 3 Nm fiksuotas dinamometrinis atsuktuvus, kuris sukamas, kol pajaučiama atlaisvinimo eiga, nurodanti, kad tvirtinimo varžtas priveržtas tinkamai [29]. 4 priede esantis kodas yra pritaikytas 8 lentelėje pažymėtam pirmajam eksperimentui, kurio pjovimo greitis 150 m/min, pastūma 0,05 mm/aps, o pjovimo gylis 0,5 mm. Apdirbimo eksperimento vaizdą matome 16 paveikslėlyje.

4 Priede matoma SPV tekinimo eksperimente naudota apdirbimo programa. Ji sudaryta iš:

- privažiavimo;
- galinio paviršiaus nutekinimo;
- išilginio paviršiaus tekinimo 2 praėjimų;
- nupjovimo.

Programiniu paketu *Minitab 19* atlikus eksperimento parametrų optimizavimą *Taguchi* metodu, sudaryta eksperimentinė variantų lentelė, kuri pateikta 7 lentelėje (žr. 7 lentelę).

7 lentelė. *Taguchi* metodu optimizuota pjovimo parametrų lentelė

Eksperimento numeris	Pjovimo greičio numeracija	Pastūmos numeracija	Pjovimo gylio numeracija
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8.	3	2	1
9.	3	3	2

Minitab 19 programiniu paketu optimizuota variantų lentelė su realiais duomenimis pateikta 8 lentelėje (žr. 8 lentelę):

8 lentelė. Eksperimentinė parametrų lentelė

Numeracija	Pjovimo greitis m/min	Pastūma mm/aps	Pjovimo gylis mm
1	150	0,05	0,5
2	150	0,1	1
3	150	0,15	1,5
4	200	0,05	1
5.	200	0,1	1,5
6.	200	0,15	0,5
7.	250	0,05	1,5
8.	250	0,1	0,5
9.	250	0,15	1

Pastaba: kiekvienas eksperimentas buvo atliekamas su nauja plokštele.

2.2. Eksperimentui atlikti naudojama įranga

Šiame skyriuje bus pateikta eksperimento atlikimui reikalinga įranga, matavimo prietaisai ir jų pagrindinės techninės charakteristikos, leidžiančios užtikrinti tinkamą eksperimento atlikimą ir matuojamų charakteristikų patikimumą. Taip pat bus pateikta informacija kaip atlikti matavimai, kad jų rezultatai būtų patikimi.

2.2.1. SVP tekinimo staklės

Eksperimentui atlikti naudotos dvisuklės SPV tekinimo staklės *Hass DS 30Y*. Šių staklių nuotrauką matome 10 paveikslėlyje.



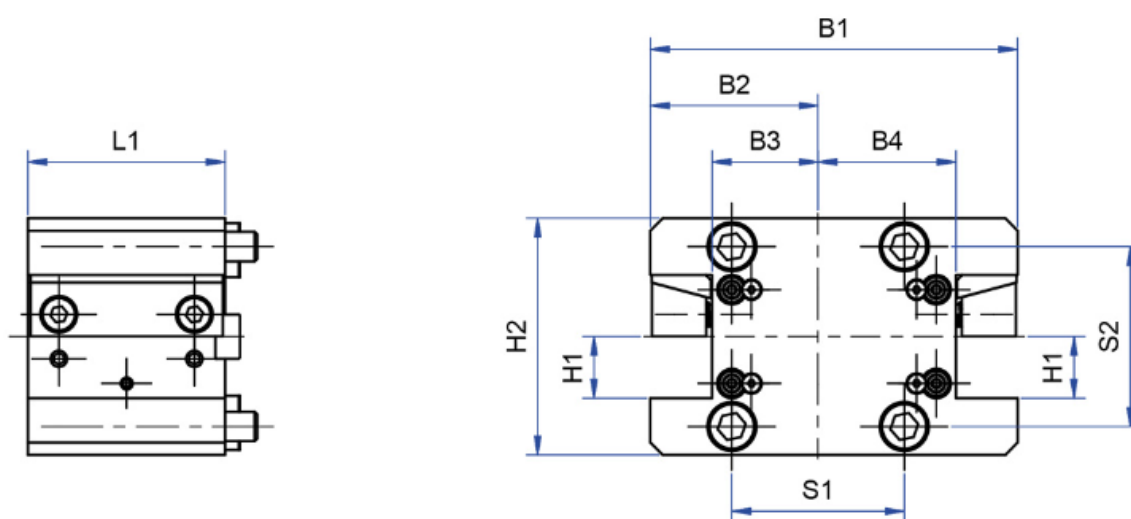
10 pav. SPV tekimo staklės Haas DS 30Y

SPV tekimo staklių Haas DS 30Y staklių techniniai parametrai pateikti lentelėje 2 priede. Svarbiausias staklių parametras – maksimalus sūčiai 4500 aps/min. [30]. Staklės 1.5 metų senumo, o tai leidžia tikėtis, kad staklių mazgai yra pakankamai nauji ir nesudilę, dėl ko neturėtų atsirasti neigiamų veiksnių, tokių kaip vibracijos.

Eksperimento metu aušinimui naudota emulsija *Rhenus*. Emulsijos koncentracijai išmatuoti naudotas refraktrometras pateiktas 3 priede. Išmatuota emulsijos koncentracija eksperimento metu – 7 %.

2.2.2. Pjovimo įrankiai ir laikikliai

Plokštelių laikiklio tvirtinimui į revolverinę galvutę naudojamas BMP 65 laikiklis – AW.103.065.25.755. Laikiklio vizualizacija matoma 11 paveikslėlyje [31].



11 pav. BMP 65 AW.103.065.25.755 laikiklio vizualizacija

Išoriniam ir vidiniam įrankių aušinimui pritaikyto Haas ST-Linie BMP 65 AW.103.065.25.755 laikiklio, sveriančio 7,55 kilogramo matmenys pateikti 9 lentelėje (žr. 9 lentelę) [31]:

9 lentelė. BMP 65 AW.103.065.25.755 matmenys

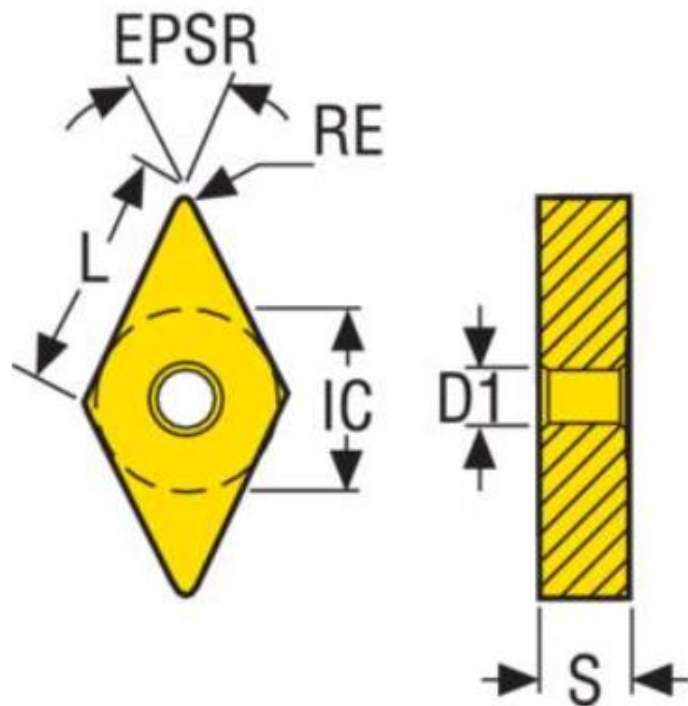
Žymėjimas	B1	B2	B3	B4	H1	H2	L1	S1	S2
Matmuo mm	149	68	43	56	25	96	80	70	73

Tekinimo eksperimentui pasirinktas kairinis *QuicTurn* serijos plokštelių laikiklis, kurio ISO kodas *PDJRN/L 2525M15*. Šio peilio vizualizaciją galima pamatyti 12 paveikslėlyje [32]:



12 pav. Plokštelių laikiklio *PDJRN/L 2525M15* vizualizacija

Tekinimo eksperimentui pasirinktos tekimo plokštelės *DNMG150604-MF1 CP500*. Šių plokštelių vizualizaciją matoma 13 paveikslėlyje [33].



13 pav. *DNMG150604-MF1 CP500* vizualizacija

Plokštelės *DNMG150604-MF1 CP500* matmenų, pažymėtų 13 paveikslėlyje, paaiškinimai ir kitos plokštelės charakteristikos pateiktos 10 lentelėje (žr. 10 lentelę) [33, 34]:

10 lentelė. DNMG150604-MF1 CP500 plokštelės charakteristikos

Pavadinimas	Apibūdinimas	Vertė
ESPR	Viršūnės kampas	55°
RE	Viršūnės suapvalinimo spindulys	0,4 mm
IC	Apskritimo diametras	12,7 mm
D1	Tvirtinimo skylės diametras	5,2 mm
S	Plokštelės storis	6,35 mm
L	Teorinis pjovimo briaunos ilgis	12,7 mm
Masė	Grynoji masė	0,014 kg
Tipas	Padengimo tipas	PVD
Danga	Padengimo medžiaga	TiAlN/TiN

Pilna tekinimo eksperimento sąranka matoma 14 paveikslėlyje:



14 pav. Eksperimento sąranka

14 paveikslėlyje matomas iš trijų kumštelių griebtuvo su nustatyta 200 barų slėgio užspaudimo jėga įtvirtintas *Duplex 1.4462* nerūdijančio plieno ruošinys, kuris iškištas 30,5 mm atstumu nuo kumštelių. Taip pat matomas pjovimo įrankio laikiklis *BMP 65 - AW.103.065.25.755*, kuriame įtvirtintas plokštelių laikiklis *PDJRN/L 2525M15* su 0,4 mm viršūnės suapvalinimo spindulį turinčia plokštele *DNMG150604-MF1 CP500*.

2.3. Matavimo įranga ir metodika

Matavimo įranga ir matavimuose naudojama metodika yra esminiai faktoriai, užtikrinantys teisingą rezultatų surinkimą. Su neteisingai parinkta matavimo metodika galima gauti iškreiptus ar neteisingus rezultatus, dėl kurių tyrimas netenka praktinės naudos. Matavimuose naudojama įranga privalo būti teisingai suderinta ir sukalibruota, kad būtų užtikrinamos mažos rezultatų paklaidos.

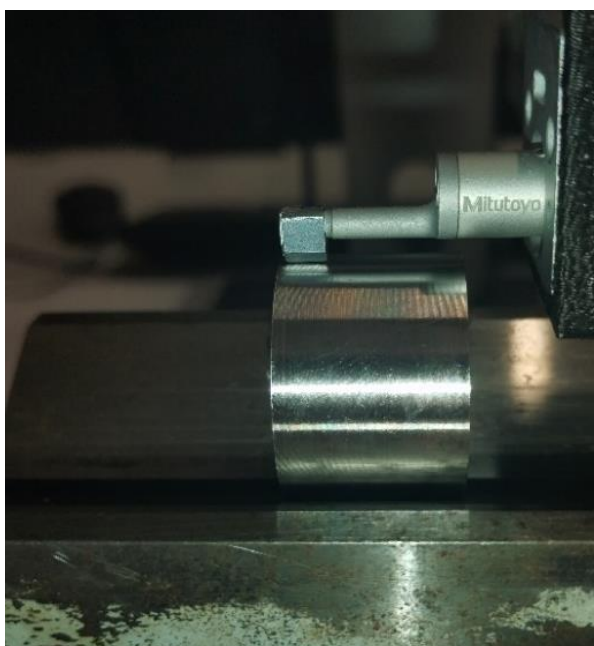
2.3.1. Paviršiaus šiurkštumo tyrimo metodika

Paviršiaus šiurkštumo tyrimui atlikti naudotas *Mitutoyo SJ-210* paviršiaus šiurkštumo profilometras, kuris remiasi ISO 1997:4287 standartu. Matavimo prietaisas su 8 bandinio rezultatu pateiktas 15 paveikslėlyje.



15 pav. Profilometras *Mitutoyo SJ-210*

Matavimai atlikti naudojant 0,5 mm/s matavimo greitį, matuojant 5 atkarpas po 2,5 mm. 16 paveikslėlyje pateiktas matuojamas ruošinys uždėtas ant prizmės.



16 pav. Profilometru matuojamas bandinys

Mitutoyo SJ-210 pagrindinės techninės charakteristikos pateiktos 11 lentelėje (žr. 11 lentelę) [35]:

11 lentelė. Mitutoyo SJ-210 techninės charakteristikos

Matuojamas atstumas	16 mm
Eiga	17,5 mm
Matavimo greitis	0,25 mm/s; 0,5 mm/s; 0,75 mm/s
Matavimo liestuko suapvalinimo spindulys	2 μ m
Matavimo jėga	0,75 mN
Matavimo liestuko kampas	60°
Matavimo metodas	Diferencialinio induktyvumo metodas
Liestuko galiuko medžiaga	Deimantas
R _z matavimo atstumai	0,08 mm; 0,25 mm; 0,8 mm; 2,5 mm

2.3.2. Kietumo ir drožlių deformacijos tyrimų metodika

Kietumo ir drožlių deformacijos tyrimams bandinių pasiruošimas atliktas labai panašiai. Bandinių pasiruošimo seka:

- drožlių/ruošinio užpylimas epoksidine derva;
- paviršių šlifavimas 180/800/1500/2500 rupumo švitriniais popieriais;
- paviršių poliravimas poliravimo popieriumi.

Prieš šias 3 operacijas kietumo bandiniai išilgai tekinto paviršiaus perpjauti elektroerozinio pjovimo viela (EDM) staklėmis. Perpjautas bandinys elektroerozinio pjovimo viela staklėse pateiktas 17 paveikslėlyje.



17 pav. Perpjautas bandinys elektroerozinio pjovimo viela staklėse

Šlifavimas ir poliravimas atliktas šlifuojant 3 ruošinius vienu metu poliravimo mašina SMARTLAM 2.0, kuri pateikta 18 paveikslėlyje, o pagrindiniai techniniai parametrai, darantys įtaką bandinių paruošimui, yra pateikti 12 lentelėje (žr. 12 lentelę) [36].

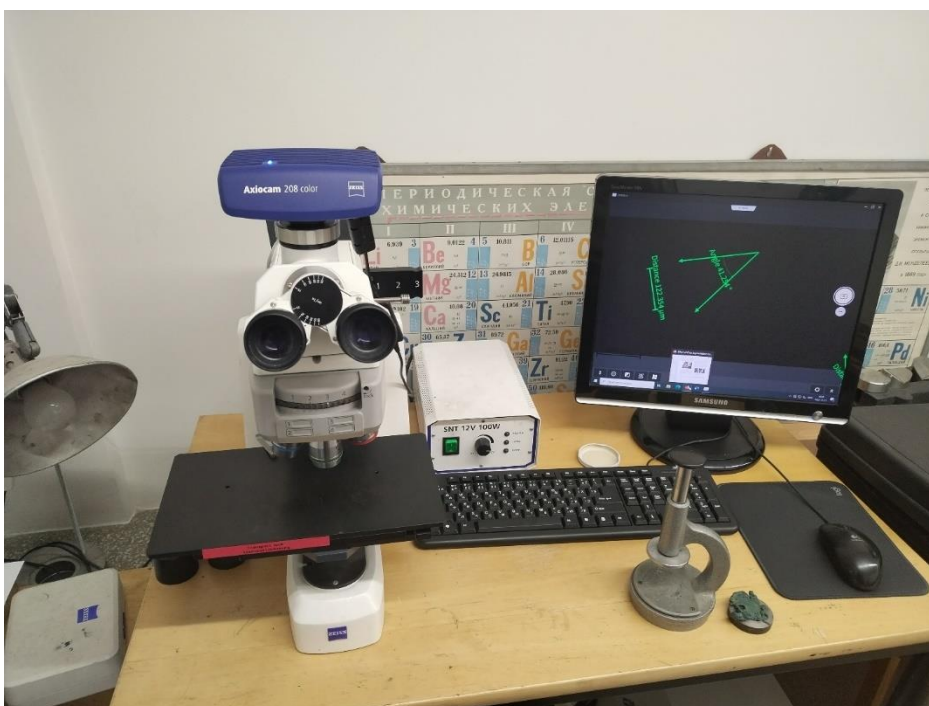


18 pav. Poliravimo mašina SMARTLAM 2.0

12 lentelė. SMARTLAM 2.0 techninės charakteristikos

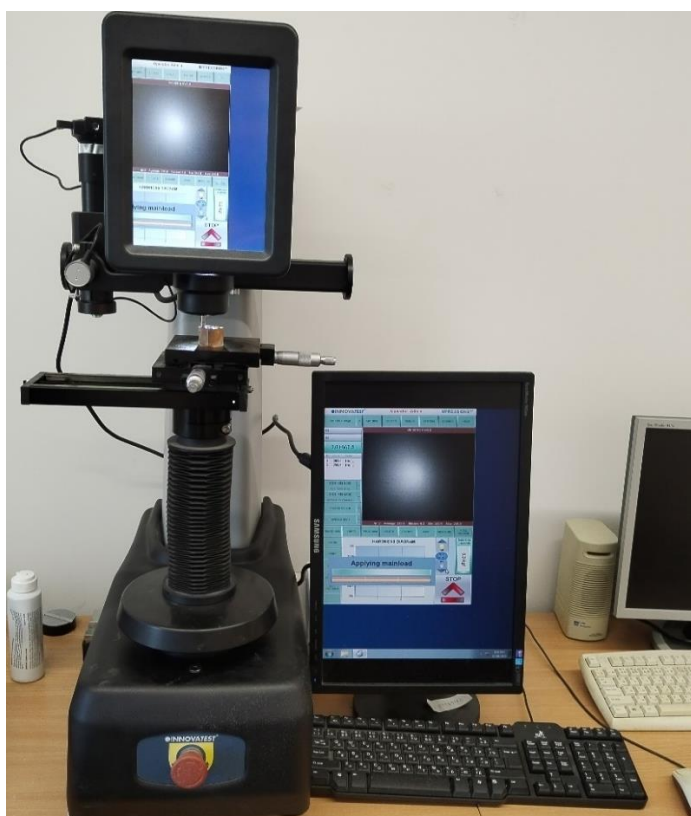
Šlifavimo pado diametras	Ø200 - Ø300 mm
Padu sukimosi greitis	20 - 650 aps/min
Galia	0,75 kw
Užspaudimo jėga	0-250 N
Mėginių laikiklis	3 mėginiai Ø20-32 mm

Šlifavimas atliktas naudojant 300 aps/min greitį. 180 rupumo švitrinis popierius bandiniai buvo šlifuojami, kol drožlės atsiveria storiu taip, kad būtų galima išmatuoti, o ruošinių paviršius būtų per visą plotą nušlifluotas. Vėliau pakeičiamas švitrinis popierius į 800 rupumo, bandiniai nuplaunami, pakeičiama sukimosi kryptis ir šlifuojama 10 minučių. Po to vėl bandiniai nuplaunami, pakeičiamas švitrinis popierius į 1500 rupumo, pakeičiama sukimosi kryptis ir vėl šlifuojama 10 minučių. Pakeitus į 2500 rupumo švitrinį popierių, vėl nuplaunami ruošiniai, pakeičiama sukimosi kryptis ir šlifuojama 10 minučių. Pabaigoje švitrinis popierius pakeičiamas poliravimo popieriumi, nuplaunami ruošiniai ir pakeičiama sukimosi kryptis, pradžioje poliruojama minimaliu aušinimu, kad vanduo vos lašėtų, po 10 minučių padidinama vandens srovė, kad būtų išplaunamos visos dulkės, ir poliruojama taip dar 5 minutes. Po poliravimo ruošiniai tikrinami ant mikroskopo, jeigu matoma įbrėžimų ant poliruoto paviršiaus, tai dar kartą atliekamas poliravimas, kad juos panaikinti. Mikrostruktūros stebėsenai, drožlių storiui išmatuoti ir stebėti, ar ruošiniai tinkamai nupoliruoti, buvo naudotas mikroskopas AXIO Scope A su 5 ir 20 kartų didinančiais objektyvais. Taip pat nuotraukų užfiksavimui ir drožlių storio matavimams buvo naudota kamera ZEISS Axiocam 208 color ir programinis paketas Labscope. Visa išvardinta įrangą pateikta 19 paveikslėlyje



19 pav. Mikroskopas *AXIO Scope A*, kamera *ZEISS Axiacam 208 color* ir pograminis paketas *Labscope*

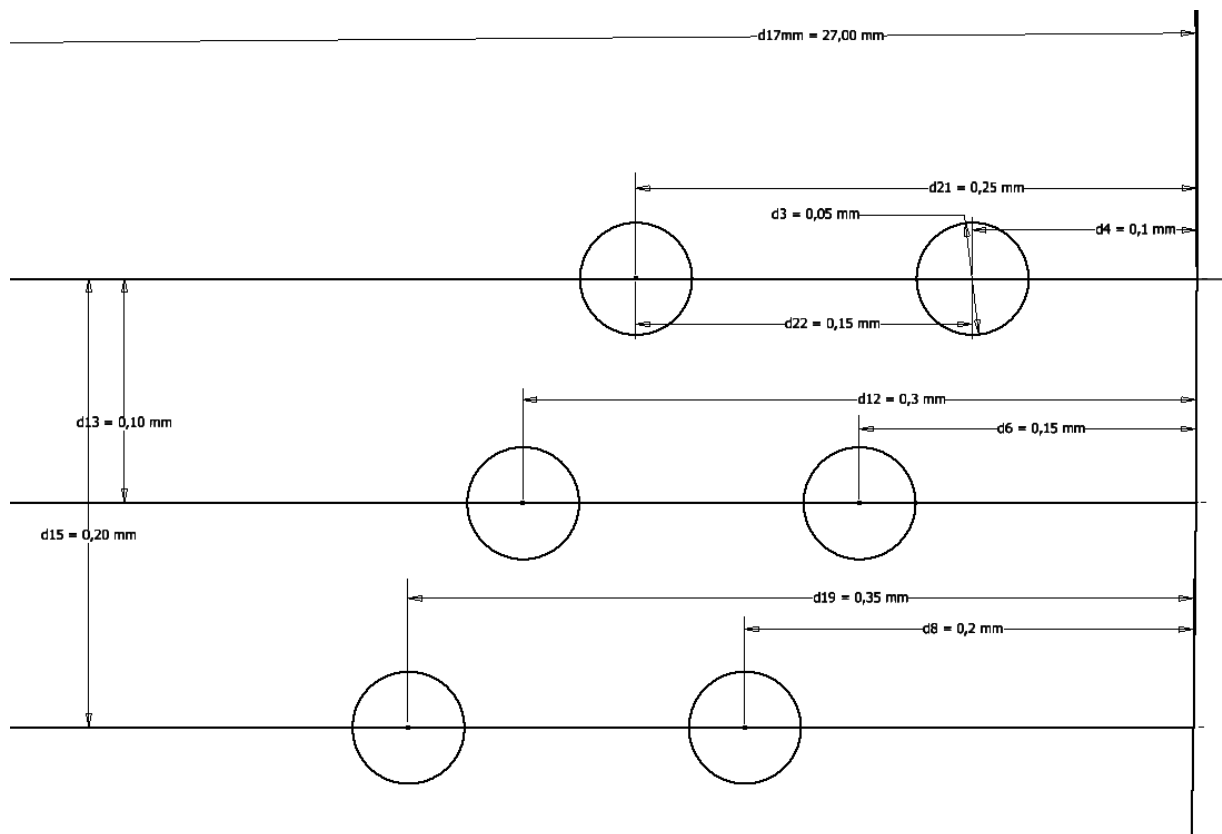
Kietumo tyrimai buvo atlikti universaliu kietumo matuokliu *INNOVATEST VERZUS 750 CCD*, kuris pateiktas 20 paveikslėlyje:



20 pav. Universalus kietumo matuoklis *INNOVATEST VERZUS 750 CCD*

Matavimai atlikti šachmatų principu, kuris supaprastintai atvaizduotas 21 paveikslėlyje. Matavimai atlikti pradedant 0,1 mm gylyje ir matuojant kas 0,05 mm, kol medžiagos kietumas 3 iš eilės matavimuose nusistovi ties 230 HV. Ši kietumo vertė buvo išmatuota ant netekintos medžiagos dalies.

Kad būtų išsiaiškinta, kiek pasikeičia atstumas nuo tekinto paviršiaus, įbrėžta linija statmenai ašinės linijos *AUTODESK Inventor Professional 2024* programiniame pakete. Per 0,2 mm, kai ruošinio diametras 27 mm, atstumas pasikeičia šiek tiek daugiau negu 0,002 mm. Kadangi matavimai atliekami kas 0,05 mm, tai 4 % atstumo paklaida tarp matavimų dėl skirtingo atstumo iki išorinio diametro neturi didelės reikšmės.



21 pav. Supaprastinta kietumo matavimų schema

Iš 21 paveikslėlio galima matyti, kad kietumo matavimai atlikti 3 eilėmis, kad kiekvienoje eilėje tarp atliktų kietumo matavimų būtų 0,15 mm tarpas, tokia metodika pasirinkta dėl to, kad kietumo matavimams nekenktų deimantinio antgalio įėjimo metu deformuotas paviršius. Deformacija sutankina paviršinius sluoksnius. Sutankinti paviršiniai sluoksniai visada yra kietesni už nesutankintus sluoksnius.

Drožlių deformacijai ištirti naudota formulė [37]:

$$K_0 = \frac{a}{a_0} \quad (3.1)$$

Čia, K_0 – deformacijos koeficientas, pagal drožlės storį; a – nupjautos drožlės storis, μm ; a_0 – teorinis drožlės storis, μm .

a_0 – reikšmė yra lygi naudotai pastūmai [38].

2.4. Skyriaus apibendrinimas

Šiame skyriuje apžvelgta įranga ir apdirbimo sąlygos, reikalingos užtikrinti tinkamą eksperimento ir matavimų atlikimą. Eksperimentinei tekinimo daliai, buvo pasirinktos SPV dvisuklės tekinimo staklės *Hass DS 30Y*, kuriose tekinimo eksperimento metu naudotas kairinis *QuicTurn* serijos plokštelių

laikiklis, kurio ISO kodas *PDJRN/L 2525M15* buvo įtvirtintas *BMP 65* laikiklyje - *AW.103.065.25.755*. Anksčiau apžvelgta literatūra parodė, kad PVD danga dengtomis tekinimo plokštelėmis gaunamas geresnis gaminių paviršiaus šiurkštumas, dėl to pasirinkta naudoti *DNMG150604-MF1 CP500* PVD tipo plokštes, kurios padengtos *TiAlN/TiN* danga.

Atlikta eksperimentų analizė parodė neištirtas pjovimo parametrų ribas, apdirbant *Duplex* nerūdijantį plieną tekinant. Iš šios analizės ir ISO 3685 standarto keliamų sąlygų apdirbimo eksperimentams pasirinkti 3 kintamieji, pjovimo gylis 0,5-1,5 mm, pastūma 0,05-0,15 mm/aps ir pjovimo greitis 150-250 m/min. Taip pat pasirinktas 30 mm diametro ruošinys, kuris iškištas 30 mm iš kumštelių, kad būtų užtikrinamas standumas.

Paviršiaus šiurkštumo matavimams buvo naudotas *Mitutoyo SJ-210*, kuriuo 3 kartus buvo matuojami bandiniai ir išvedamas vidurkis. Matavimai atlikti matuojant 5 atkarpas po 2,5 mm. Kietumo matavimams, mikrostruktūros fotografavimui ir drožlių deformacijai ištirti reikalingi bandiniai buvo paruošiami šlifuojant ir poliruojant bandinius poliravimo mašina *SMARTLAM 2.0*. Šlifavimai atlikti naudojant 180/800/1500/2500 rupumo švitrinius popierius ir užbaigti poliruojant poliravimo popieriumi, ant kurio užtepama deimantinė poliravimo pasta. Vėliau naudojami 5x ir 20x vaizdą didinantys objektyvai mikroskope *AXIO Scope A*, taip pat kamera *ZEISS Axiocam 208 color* ir pograminis paketas *Labscope* drožlių matavimams atlikti. Kietumui matuoti pasirinktas naudoti universalus kietumo matuoklis *INNOVATEST VERZUS 750 CCD*. Kietumo matavimai atlikti šachmatų principu, kad būtų panaikinama ankstesnio matavimo metu atsirandančios deformacijos įtaka. Po kietumo matavimų bandiniai nuėsdinami, kad būtų nufotografuotos mikrostruktūros nuotraukos.

3. Apdirbimo savybių tyrimai

Šiame skyriuje bus apžvelgti apdirbimo laiko, drožlių formavimosi, drožlių deformacijos, paviršiaus šiurkštumo ir paviršinių sluoksnių užsigrūdinimo tyrimai. Šie tyrimai yra ypač svarbūs mechaniniame apdirbime. Apdirbimo laiko tyrimas parodys, kiek laiko užtrunka tikslaus tekinimo operacijos, tekinant 20 mm ilgio detalę. Šis tyrimas leidžia suprasti, kiek laiko užtrunka operacija su saugiu įrankio privažiavimu, tekinimu ir saugiu įrankio atsitraukimu iš apdirbimo zonos. Drožlių formavimasis yra esminis faktorius, į kurį reikia atsižvelgti kuriant technologinį apdirbimo kelių detalių gamybą, nes netinkamas drožlės formavimasis gali lėtinti ar stabdyti apdirbimo procesą dėl galimo paviršiaus subraižymo, pjovimo įrankių nepataisomo sugadinimo ir kitų problemų. Mikrostruktūros nuotraukos gali parodyti pjovimo įrankių daromą žalą/naudą apdirbamai medžiagai, taip pat išsiaiškinti, ar medžiaga yra kokybiška ir neturi didelio kiekio nemetalinių ar kitokių priemaišų, ir taip pat parodyti, kokia tai medžiaga ir iš ko jos mikrostruktūra sudaryta. Paviršiaus šiurkštumo tyrimai yra ypač svarbūs. Šiuos tyrimus rekomenduojama atlikti su skirtingomis medžiagomis ir skirtingais pjovimo įrankiais, nes tik taip galima tinkamai įvertinti technologinio proceso galimybes. Tinkamas technologinio proceso įvertinimas gali leisti sumažinti išlaidas apdirbimui ir kartais atsisakyti šlifavimo operacijos, taip dar labiau sumažinant transportavimo įmonės viduje išlaidas, gamybos laiką ir atlaisvinti šlifavimo stakles detalėms, kurios negali būti pagamintos be šlifavimo operacijos. Paviršinių sluoksnių užsigrūdinimo laipsnio tyrimas svarbus pjovimo įrankių parinkimui, taip pat galima panaudoti žinias siekiant gaminti kokybiškesnę produkciją, kurioje pjovimo režimai būtų panaudoti sukietinti paviršių, kad jis būtų atsparesnis dilimui ir deformacijai.

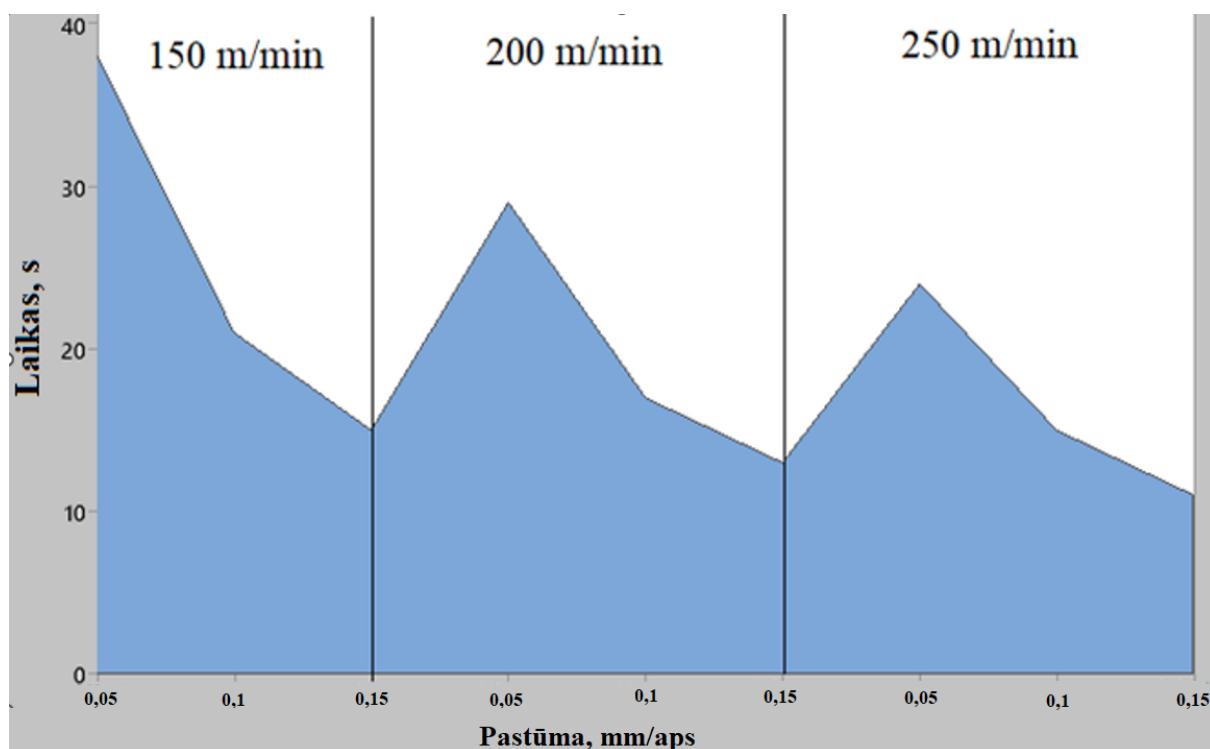
3.1. Apdirbimo laiko tyrimas

Mechaniniu apdirbimu užsiimančiose įmonėse 3 svarbiausi aspektai yra laikas, kokybė ir kaina. Apdirbimo laiko sumažinimas gali leisti sumažinti gaminamos produkcijos savikainą, kas leistų įmonėms ne tik kad daugiau uždirbti, bet ir padidinti konkurencingumą rinkoje dėl mažesnės gaminių kainos. Todėl yra svarbu rasti optimalius apdirbimo režimus, kurie suteiktų galimybę greitai gaminti kokybišką produkciją. Tekinimo eksperimento metu buvo atliktas tiksliojo apdirbimo laiko stebėjimas, kurio suvestinė pateikta 13 lentelėje (žr. 13 lentelę):

13 lentelė. Tekinimo laiko lentelė

Numeracija	Pjovimo greitis, m/min	Pastūma, mm/aps	Pjovimo gylis, mm	Laikas, s
1	150	0,05	0,5	38
2	150	0,1	1	21
3	150	0,15	1,5	15
4	200	0,05	1	29
5.	200	0,1	1,5	17
6.	200	0,15	0,5	13
7.	250	0,05	1,5	24
8.	250	0,1	0,5	15
9.	250	0,15	1	11

Iš 13 lentelės galima matyti pjovimo režimų įtaką tekinimo laikui, į kurį įskaičiuotas saugus privažiavimas, tikslus tekinimas ir saugus atsitraukimas iki įrankių keitimui saugios padėties. Iš šios lentelės matoma, kad tekinimo laikas svyruoja nuo 11 sekundžių iki 38 sekundžių. Šie rezultatai parodo, kad tos pačios operacijos trukmė gali skirtis iki 3,45 karto.



22 pav. Laiko priklausomybė nuo pastūmos, skirtingo pjovimo greičio ribose

Iš 22 paveikslėlio matoma, kad didesnis pjovimo greitis, pastūma leidžia sumažinti apdirbimo laiką. Mažiausia apdirbimo laiko vertė užfiksuota, kai pastūma 0,15 mm/aps, o linijinis sukimosi greitis siekė 250 m/min.

3.2. Drožlių tyrimai

Mechaninio apdirbimo metu drožlių formavimasis yra ypač svarbus klausimas. Kai apdirbimo metu drožlė nelūžta gali kilti problemų, tokių kaip:

- prastas paviršiaus šiurkštumas dėl subraižymų;
- tekinimo/ištekinimo plokštelių nuskėlimas;
- ištekinimo plokštelių laikiklių sugadinimas;
- dažnesnės ir ilgesnės prastovos dėl drožlių valymo;
- sunku apdirbti tikslus paviršius dėl pjovimo įrankių nevienodo atstūmimo, kurį sukelia spaudžiama drožlė;
- pakeliamos drožlės nuo konvejerio;
- užblokuojamas aušinimo skysčio patekimas į apdirbimo zoną;
- atsirandantis papildomas temperatūros šaltinis – trintis tarp drožlės, tekinimo plokštelės ir apdirbamo ruošinio.

Eksperimento metu buvo surenkamos ir fotografuojamos drožlės, kad būtų galima palyginti jų formavimąsi, kai medžiaga apdirbama tikslaus apdirbimo sąlygomis. Šios nuotraukos pateiktos paveikslėliuose pažymėtuose numeriais 23-31.



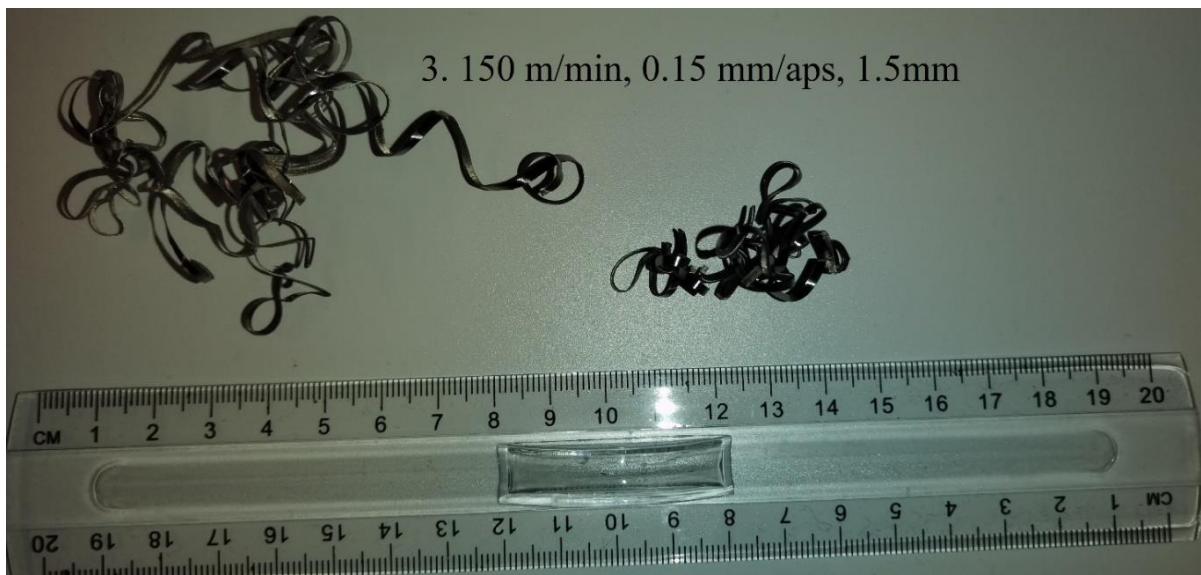
23 pav. Eksperimento nr.1 drožlė

23 paveikslėlyje pateikta drožlė, kuri gauta tekinant bandinį 150 m/min pjovimo greičiu, 0,05 mm/aps pastūma ir 0,5 mm gyliu. Iš šio paveikslėlio galima matyti, kad drožlė yra apsivijusi viena apie kitą, o tai indikuoja, kad drožlė pjovimo metu nebuvo šalinama iš apdirbimo zonos. Kai drožlė pinasi apdirbimo zonoje, tai apsunkina emulsijos patekimą ir leidžia temperatūrai kilti, todėl pjovimo įrankių ilgaamžiškumas stipriai sumažėja. Šio eksperimento metu fiksuotas didžiausias drožlės susikaupimas tekinimo zonoje.



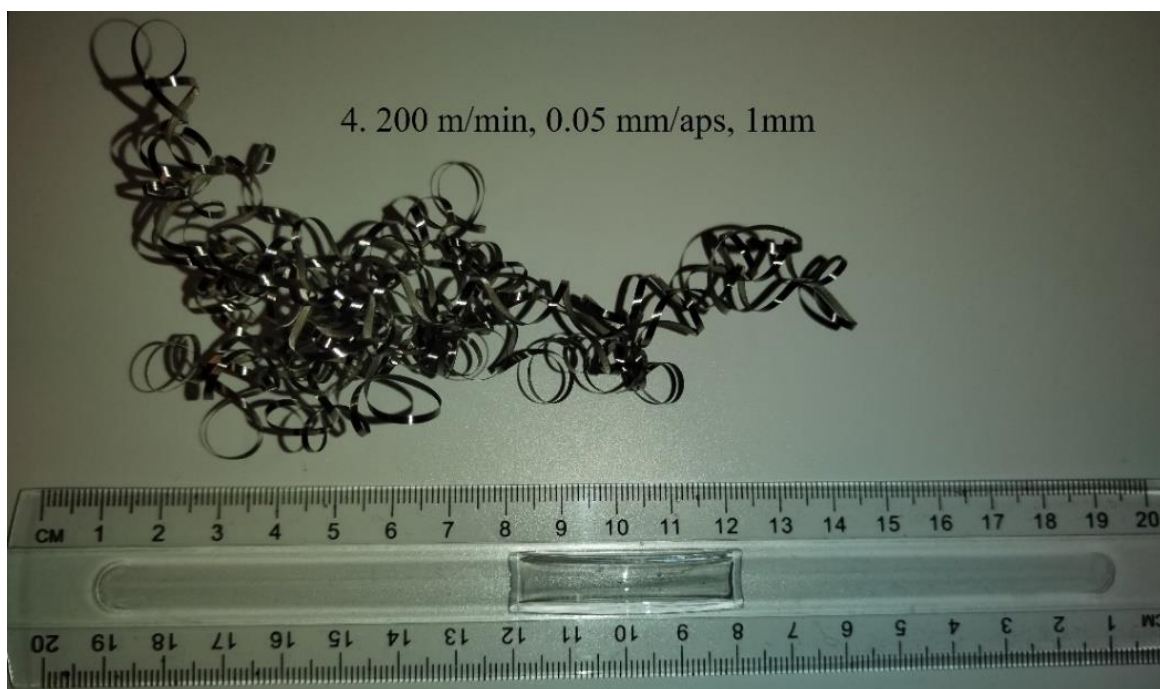
24 pav. Eksperimento nr 2. drožlė

24 paveikslėlyje pateikta drožlė, kuri gauta tekinant bandinį 150 m/min pjovimo greičiu, 0,1 mm/aps pastūma ir 1 mm gyliu. Iš šio paveikslėlio galima matyti, kad drožlė yra apsivijusi viena apie kitą, tai indikuoja, kad drožlė pjovimo metu nebuvo šalinama iš apdirbimo zonos. Kai drožlė pinasi apdirbimo zonoje, tai apsunkina emulsijos patekimą ir leidžia temperatūrai kilti, todėl pjovimo įrankių ilgaamžiškumas stipriai sumažėja. Šioje nuotraukoje matomas mažesnis kiekis drožlės, o tai rodo, kad pjovimo metu aušinimo skysčio patekimas į apdirbimo zoną nebuvo taip slopinamas kaip 23 paveikslėlyje.



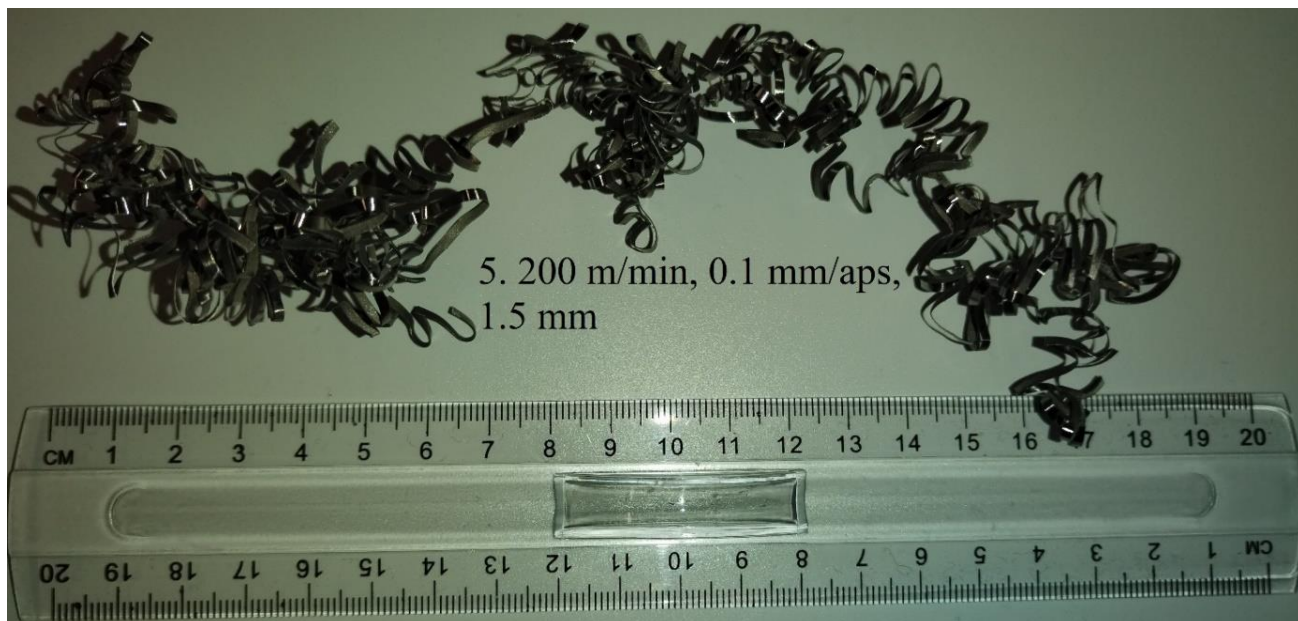
25 pav. Eksperimento nr 3. drožlė

25 paveikslėlyje pateikta drožlė, kuri gauta tekinant bandinį 150 m/min pjovimo greičiu, 0,15 mm/aps pastūma ir 1,5 mm gyliu. Iš šio paveikslėlio galima matyti, kad drožlė, nors yra linkusi susisukti, tačiau drožlės kiekis parodo, kad ji yra linkusi lūžti ir pasišalinti iš apdirbimo zonos. Linkusi lūžti drožlė leidžia aušinimo skysčiui patekti į apdirbimo zoną. Tinkamas aušinimo skysčio kiekio patekimas į apdirbimo zoną užtikrina ilgesnį įrankio tarnavimo laiką, o lūžtanti drožlė kelia mažesnę riziką subraižyti tekinamą paviršių.



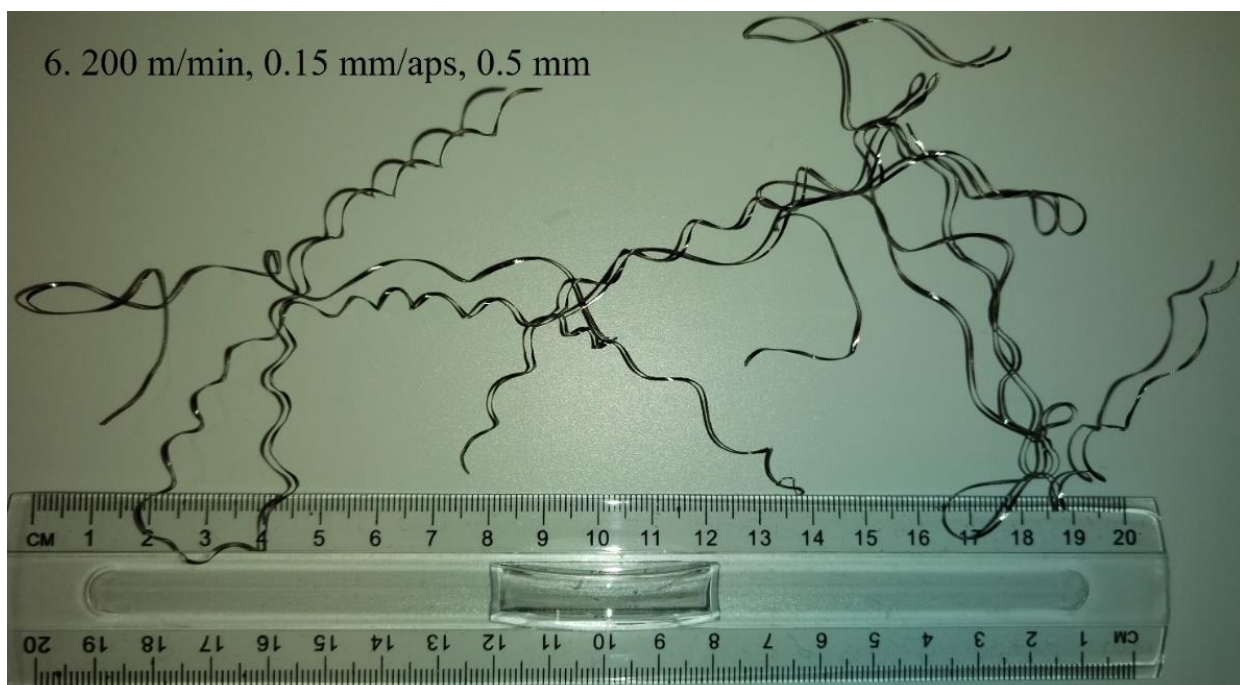
26 pav. Eksperimento nr 4. drožlė

26 paveikslėlyje pateikta drožlė, kuri gauta tekinant bandinį 200 m/min pjovimo greičiu, 0,05 mm/aps pastūma ir 1 mm gyliu. Iš šio paveikslėlio galima matyti, kad drožlė yra apsivijusi viena apie kitą, tai indikuoja, kad drožlė pjovimo metu nebuvo šalinama iš apdirbimo zonos. Kai drožlė pinasi apdirbimo zonoje, tai apsunkina emulsijos patekimą ir leidžia temperatūrai kilti, todėl pjovimo įrankių ilgaamžiškumas stipriai sumažėja.



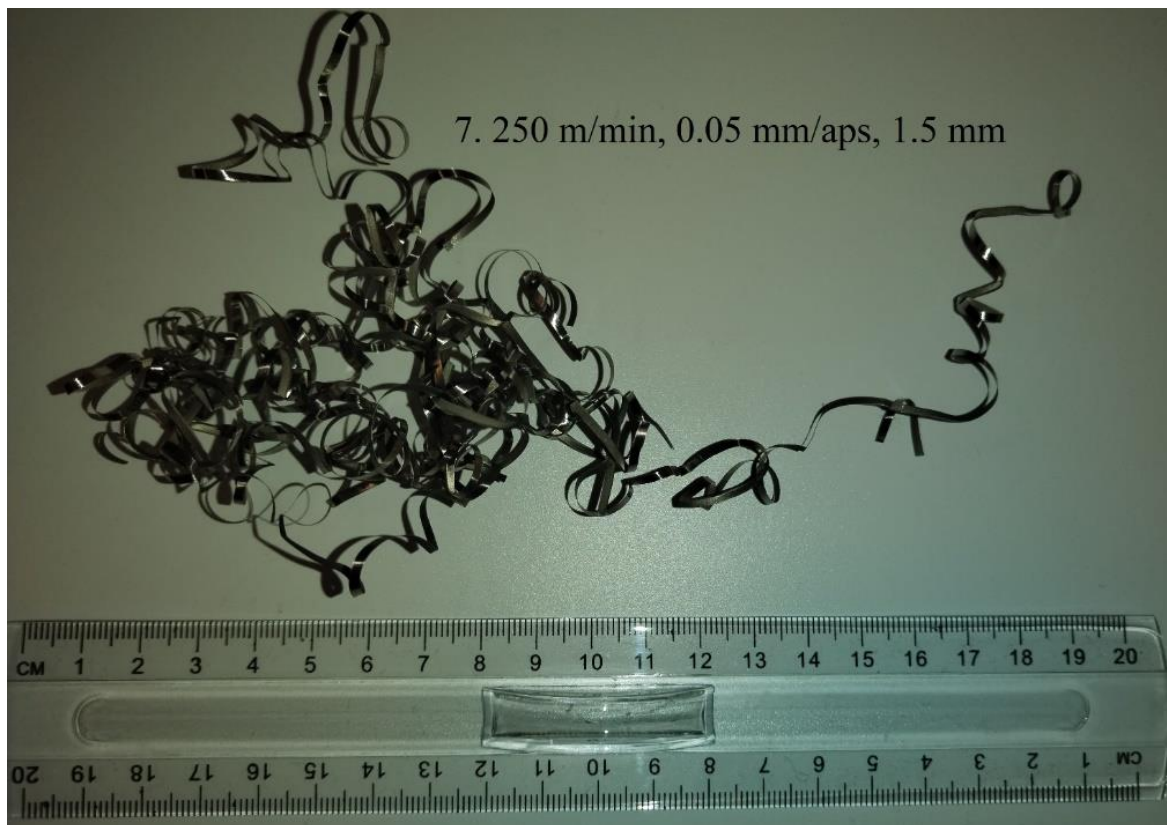
27 pav. Eksperimento nr 5. drožlė

27 paveikslėlyje pateikta drožlė, kuri gauta tekiant bandinį 200 m/min pjovimo greičiu, 0,1 mm/aps pastūma ir 1,5 mm gyliu. Iš šio paveikslėlio galima matyti, kad drožlė yra apsivijusi viena apie kitą, tačiau ilgesnė forma indikuoja, kad tik maža dalis drožlės pjovimo metu buvo apdirbimo zonoje, o kita dalis buvo nukreipta konvejerio link. Kai drožlė pinasi apdirbimo zonoje, tai apsunkina emulsijos patekimą ir leidžia temperatūrai kilti, tačiau dėl drožlės formos ir to, kad mažas kiekis drožlės buvo apdirbimo zonoje, aušinimo skysčio patekimas į apdirbimo zoną nebuvo visiškai užblokuotas.



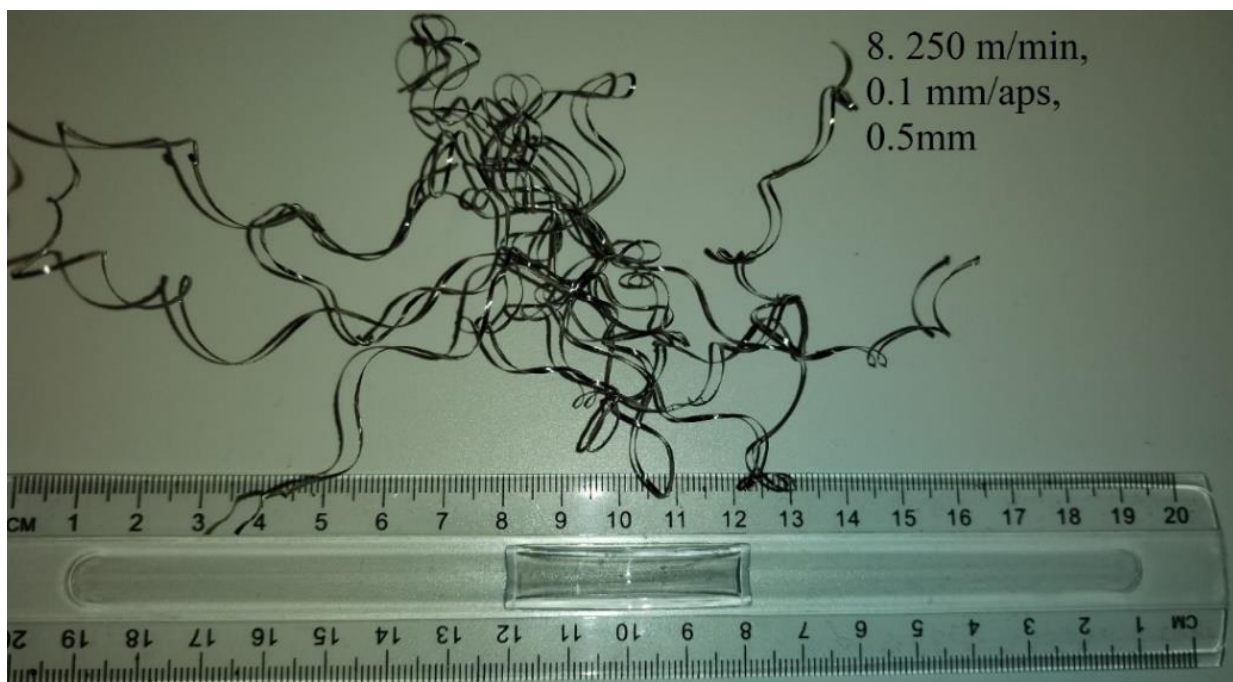
28 pav. Eksperimento nr 6. drožlė

28 paveikslėlyje pateikta drožlė, kuri gauta tekiant bandinį 200 m/min pjovimo greičiu, 0,15 mm/aps pastūma ir 0,5 mm gyliu. Iš šio paveikslėlio galima matyti, kad drožlė nesipina, tačiau yra tąsi. Iš formos ir šviesesnės spalvos galima matyti, kad ji tinkamai šalinta iš apdirbimo zonos ir nebuvo įkaitinta pjovimo režimū.



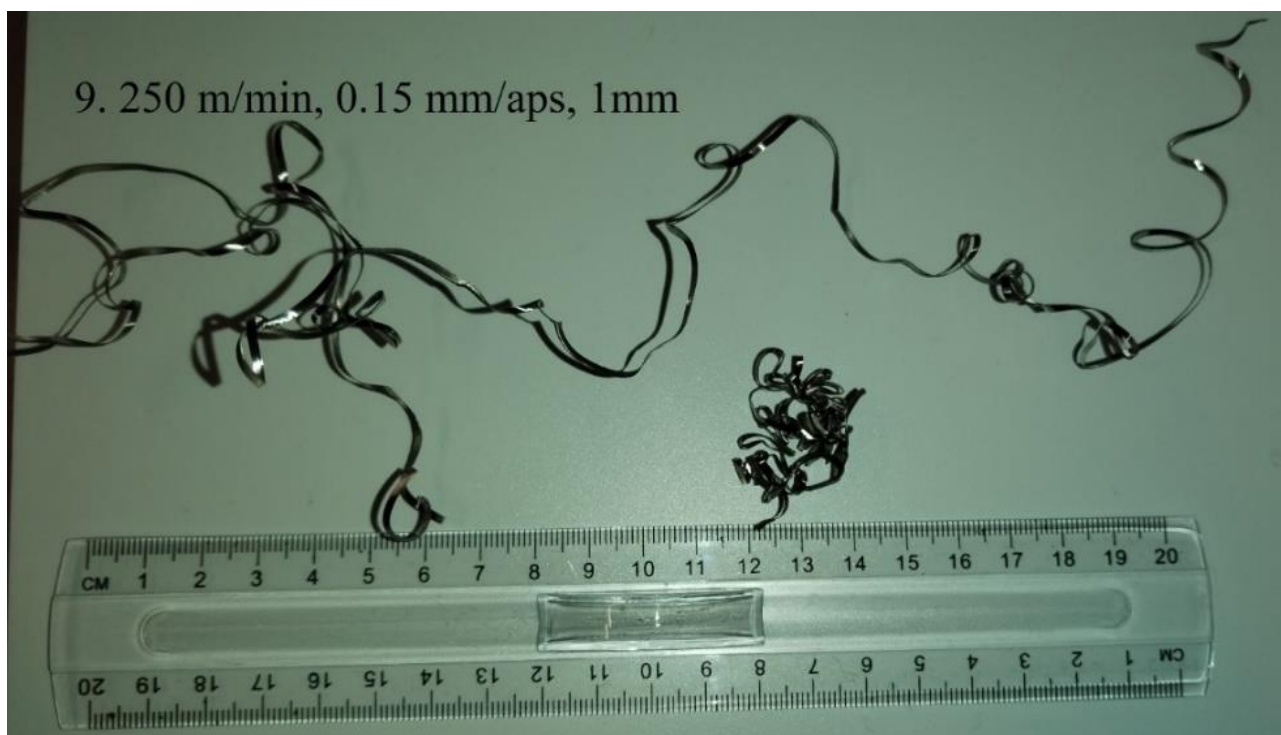
29 pav. Eksperimento nr 7. drožlė

29 paveikslėlyje pateikta drožlė, gauta tekinant bandinį 250 m/min pjovimo greičiu, 0,05 mm/aps pastūma ir 1,5 mm gyliu. Iš šio paveikslėlio galima matyti, kad palyginus šią drožlę su drožlėmis 23 ir 26 paveikslėliuose, galima matyti, kad mažesnis drožlės kiekis yra apsivijęs. Tai parodo, kad didėjant pjovimo greičiui, drožlė geriau šalinama iš apdirbimo zonos. Tačiau drožlė taip pat pinasi apdirbimo zonoje, o tai apsunkina emulsijos patekimą ir leidžia temperatūrai kilti, todėl pjovimo įrankių ilgaamžiškumas stipriai sumažėja.



30 pav. Eksperimento nr 8. drožlė

30 paveikslėlyje pateikta drožlė, gauta tekinant bandinį 250 m/min pjovimo greičiu, 0,1 mm/aps pastūma ir 0,5 mm gyliu. Iš šio paveikslėlio galima matyti, kad drožlė pinasi ženkliai mažiau ir yra tąsi. Iš formos ir šviesesnės spalvos galima matyti, kad ji tinkamai šalinama iš apdirbimo zonos ir nebuvo įkaitinta apdirbimo zonoje išsiskiriančios šilumos.



31 pav. Eksperimento nr 9. drožlė

31 paveikslėlyje pateikta drožlė, kuri gauta tekinant bandinį 250 m/min pjovimo greičiu, 0,15 mm/aps pastūma ir 1 mm gyliu. Iš šio paveikslėlio galima matyti, kad drožlė nesipina. Iš formos, šviesesnės spalvos galima matyti, kad ji tinkamai šalinama iš apdirbimo zonos ir nebuvo įkaitinta apdirbimo zonoje išsiskiriančios šilumos. Taip pat galima matyti, kad drožlė nėra vientisa, o tai indikuoja, kad ji apdirbimo zonoje kartais lūžta.

Iš 23-31 paveikslėliuose pateiktų drožlių nuotraukų galima matyti, kad tiksliajam apdirbimui pritaikytais režimais tekinant *Duplex 1.4462* nerūdijantį plieną drožlė nėra linkusi lūžti. 23, 24, 25, 26, 27, 29 paveikslėliuose pateiktos drožlės pjovimo metu išliko apdirbimo zonoje ir buvo stumiamos išorinio tekinimo plokštelės išilgai apdirbamos medžiagos, tai galima matyti iš drožlės suspaustos formos ir apsivijimo tarpusavyje. Drožlė rodė polinkį skilti tik prie 25 ir 31 paveikslėliuose pažymėtų pjovimo režimų, o iš pjovimo zonos drožlė buvo šalinama 25, 28, 30, 31 pažymėtų pjovimų režimų eksperimentuose.

3.3. Paviršiaus šiurkštumo tyrimas

Paviršiaus šiurkštumas, matmenų tolerancijos ir geometrinės tolerancijos yra esminiai brėžinio reikalavimai, kurie lengvai išmatuojami ir faktiškai nurodantys, kokio gaminio užsakovas tikisi. Šie parametrai yra esminiai gamyboje. Šių parametrų teisingas identifikavimas, suvokimas, patirtis ir įvairūs moksliniai tyrimai padeda mechaninių komponentų gamybos įmonėms sėkmingai dirbti. Žinios apie apdirbimo parametrų įtaką apdirbamai medžiagai, gali palengvinti apdirbimo procesą, sumažinti broko kiekį ir net pašalinti kai kurias apdirbimo operacijas. Atliktas *Duplex* nerūdijančio plieno šiurkštumo tyrimas, kurio rezultatai pateikti 14 lentelėje (žr. 14 lentelę).

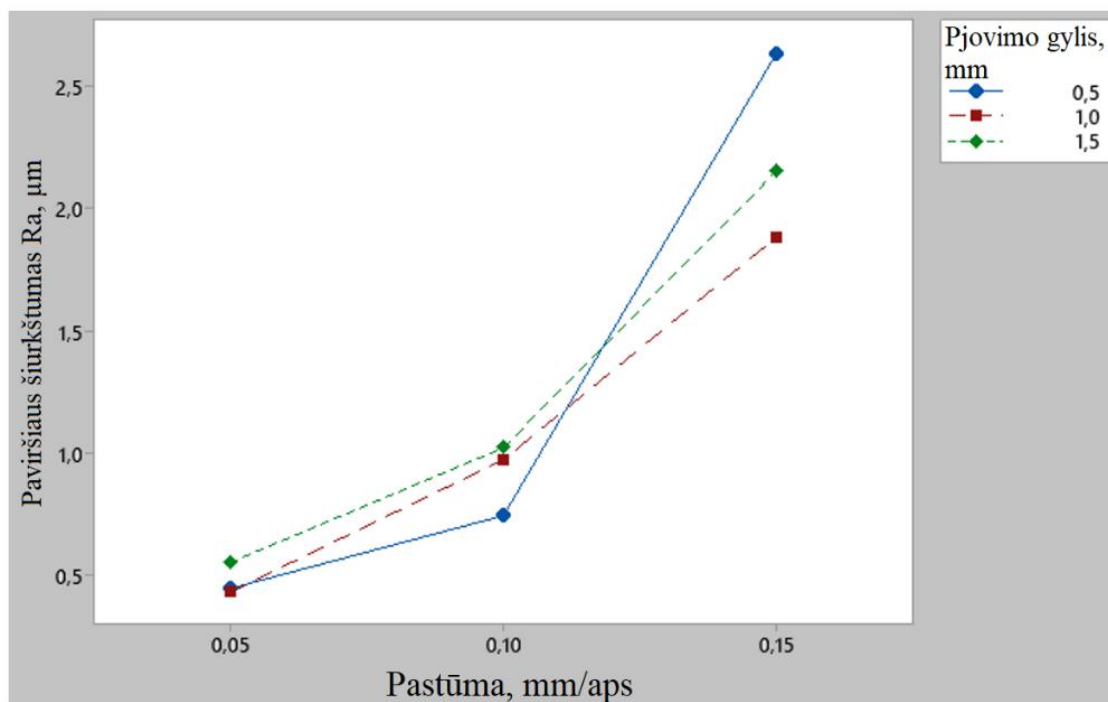
14 lentelė. Paviršiaus šiurkštumo tyrimo rezultatų lentelė

Numeracija	Pjovimo greitis, m/min	Pastūma, mm/aps	Pjovimo gylis, mm	Paviršiaus šiurkštumas, R_a , μm	Paviršiaus šiurkštumas, R_z , μm	Paviršiaus šiurkštumas, $R_{z1\text{max}}$, μm
1.	150	0,05	0,5	0,448	3,177	3,373
2.	150	0,1	1	0,974	5,696	6,502
3.	150	0,15	1,5	2,155	10,483	11,056
4.	200	0,05	1	0,433	3,133	3,512
5.	200	0,1	1,5	1,023	6,375	8,009
6.	200	0,15	0,5	2,637	11,993	12,854
7.	250	0,05	1,5	0,554	3,936	4,497
8.	250	0,1	0,5	0,746	4,41	5,098
9.	250	0,15	1	1,885	10,473	12,541

Iš paviršiaus šiurkštumo tyrimo rezultatų lentelės duomenų nubraižytoje diagramoje, kuri pateikta 32 paveikslėlyje, matoma paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo pjovimo gylio ir pastūmos. Tyrimo rezultatai parodo, kad tekinant naudojant 1,5 mm pjovimo gylį, paviršiaus šiurkštumas gaunamas didesnis, negu parinkus 1 mm pjovimo gylį. Atlikus vidurkių skaičiavimą galime matyti, kad vidutinis paviršiaus šiurkštumas skirtingais pjovimo gyliais išsidėsto taip:

- 0,5 mm pjovimo gylio paviršiaus šiurkštumo vidurkis – 1,227 R_a ;
- 1 mm pjovimo gylio paviršiaus šiurkštumo vidurkis – 1,097 R_a ;
- 1,5 mm pjovimo gylio paviršiaus šiurkštumo vidurkis – 1,244 R_a .

Iš 14 lentelės ir 32 paveikslėlio matoma, kad mažiausia paviršiaus šiurkštumo vertė užfiksuota, kai pjovimo gylis siekė 1 mm.



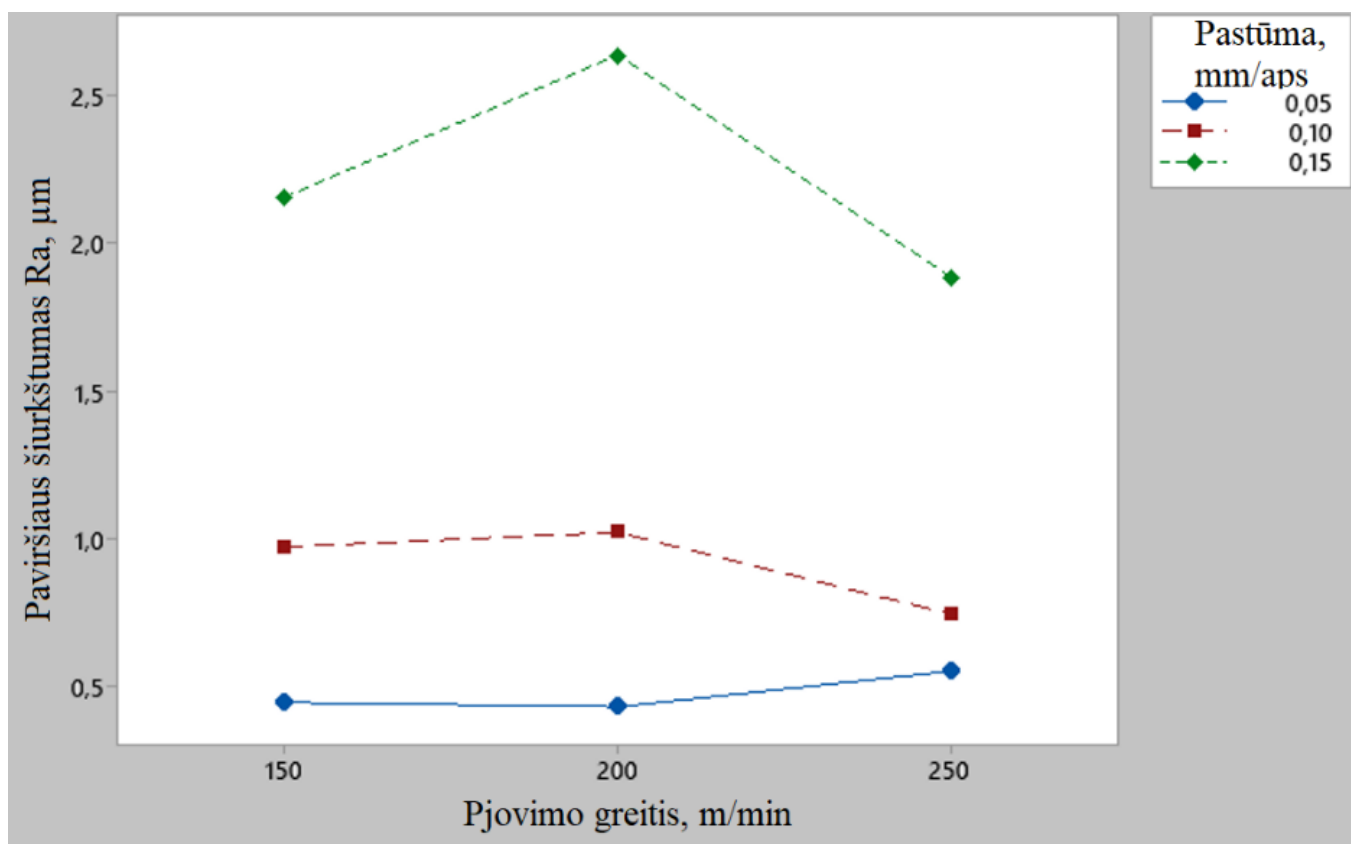
32 pav. Paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo pastūmos ir pjovimo gylio

Iš 33 paveikslėlio galima matyti, kad pastūma yra parametras, darantis didžiausią įtaką paviršiaus šiurkštumui. Didesnė pastūma lemia didesnį paviršiaus šiurkštumą. Taip pat atlikus vidurkių skaičiavimą siekiant išsiaiškinti optimalų linijinį pjovimo greitį matome, kad:

- 150 m/min pjovimo greičio šiurkštumo vidurkis – 1,192 Ra;
- 200 m/min pjovimo greičio šiurkštumo vidurkis – 1,364 Ra;
- 250 m/min pjovimo greičio šiurkštumo vidurkis – 1,062 Ra.

Iš rezultatų matyti, kad geriausia vidutinė vertė gauta, kai pjovimo greitis 250 m/min, o prasčiausia, kai 200 m/min. O atlikti paviršiaus šiurkštumo vidurkių skaičiavimo rezultatai:

- 0,05 mm/aps pastūmos šiurkštumo vidurkis – 0,478 Ra;
- 0,1 mm/aps pastūmos šiurkštumo vidurkis – 0,914 Ra;
- 0,15 mm/aps pastūmos šiurkštumo vidurkis – 2,226 Ra.

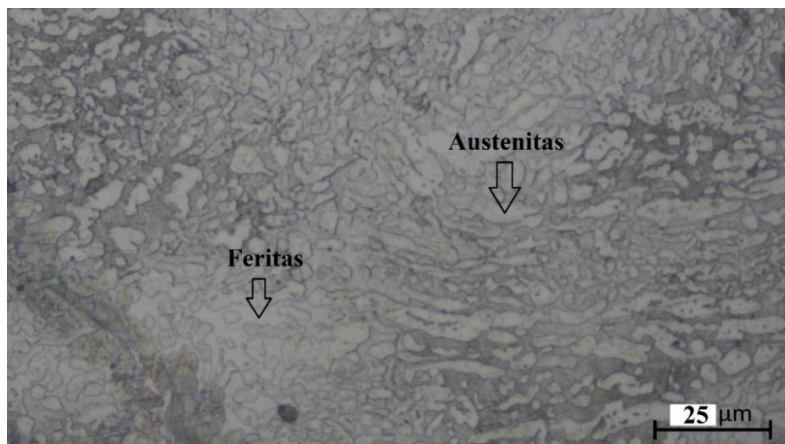


33 pav. Paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo pastūmos ir pjovimo greičio

Atliktas paviršiaus šiurkštumo tyrimas parodė, kad tyrimo metu pasiektas mažiausias paviršiaus šiurkštumas – 0,433 Ra, kai pjovimo greitis 200 m/min, pastūma 0,05 mm/aps, pjovimo gylis 1 mm. Tačiau iš vidurkių matoma, kad tinkamiausias pjovimo greitis yra 250 m/min, pastūma 0,05 mm/aps, pjovimo gylis 1 mm. Iš eksperimento galima matyti, kad apdirbant *Duplex* nerūdijanti plieną *DNMG* formos PVD plokštelėmis su TiAlN/TiN danga galima apdirbinėti paviršius, kurių paviršiaus šiurkštumo tolerancija yra iki 0,8 μm . Kai paviršiaus šiurkštumo tolerancija 0,4 μm arba mažesnė, rekomenduojama po tekinimo naudoti šlifavimo operaciją. Šio tyrimo rezultatai yra ypač svarbūs, nes net 2 iš 9 bandinių gautas paviršiaus šiurkštumas buvo mažesnis, o geriausiame rezultate užfiksuotas paviršiaus šiurkštumas net 18,3 % mažesnis už mažiausią vertę užfiksuotą 1 priedo lentelėje [14, 15, 16, 17, 18, 19, 20].

3.4. Duplex 1.4462 mikrostruktūra

34 paveikslėlyje pateikta 20 kartų padidinta Duplex 1.4462 nerūdijančio plieno mikrostruktūra. Iš mikrostruktūros galima matyti, kad šiame pliene yra dvi fazių dedamosios – austenitas ir feritas, ir jos sudaro apytiksliai lygias dalis.



34 pav. Duplex 1.4462 mikrostruktūra padidinta 20 kartų



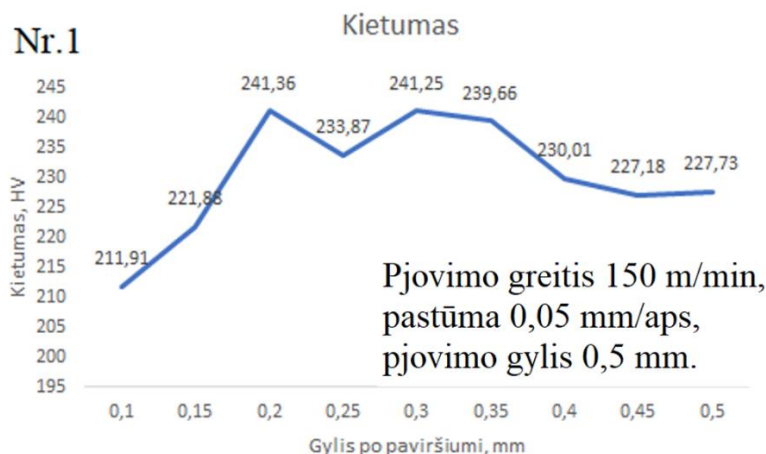
35 pav. Duplex 1.4462 mikrostruktūra padidinta 5 kartais

Mikrostruktūros tyrimai parodo, kokią įtaką pjovimo režimai ir kiti apdirbimo veiksniai daro paviršiui. Iš atliktų mikrostruktūros nuotraukų nesimato deformacijos ir temperatūros paveiktų zonų. Iš šio tyrimo taip pat galima matyti, kad medžiagos lydinyje yra nemetalinių priemaišų, kurios silpnina medžiagą. Šios priemaišos lydinyje matomos kaip juodi taškeliai, kurie 35 paveikslėlyje apibrėžti raudonais keturkampiais.

3.5. Pjovimo režimų poveikio kietumui tyrimas

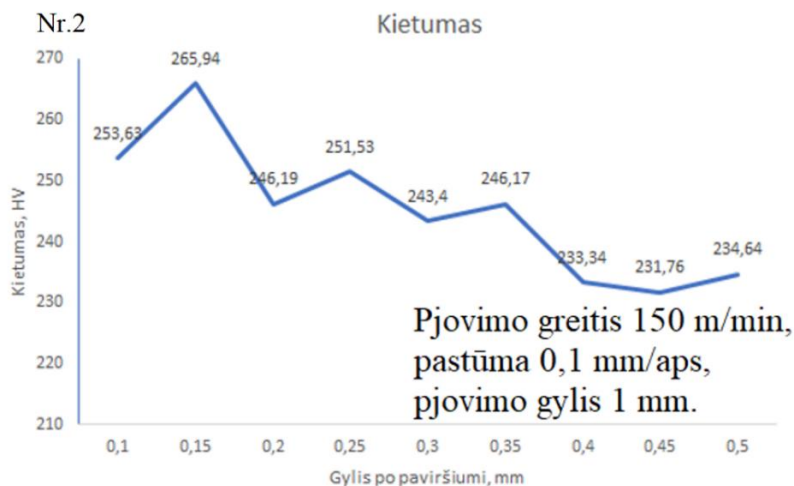
Medžiagos kietumas - tai medžiagos savybė, nusakanti jos atsparumą dilimui, deformavimui, pjovimui ir t.t. Medžiagos kietumas yra ypač svarbus parametras mechaniniame apdirbime. Visi apdirbime naudojami pjovimo įrankiai, plokštelės gali tinkamai ir ilgaamžiškai dirbti tik tada, kai apdirbimo sąlygos ir parametrai yra jiems tinkami. Kadangi apdirbimas pjovimu taip pat daro įtaką paviršiaus topografijai, dėl to yra esminga stebėti, kokia yra pjovimo parametrų įtaka paviršiaus kietumui, nes pjovimo metu sukeltas paviršinių sluoksnių sukietinimas gali būti žalingas pačiam apdirbimo įrankiui.

36 paveikslėlyje pateikta paviršiaus kietumo priklausomybė nuo pjovimo gylio, kai bandinys buvo apdirbtas naudojant 150 m/min pjovimo greitį, 0,05 mm/aps pastūmą ir tekinant ruošinį 0,5 mm gyliu. Iš diagramos galima matyti, kad iki 0,15 mm gylio ruošinio paviršius yra paveiktas terminio minkštėjimo. Terminio minkštėjimo zona rodo labai aukštą temperatūrą apdirbimo zonoje. Iš 23 paveikslėlyje pateiktos drožlės galima matyti, kad drožlės forma suspausta ir ji yra apsivijusi, o tai reiškia, kad eksperimento metu drožlė nebuvo šalinama iš apdirbimo zonos ir kaupėsi ant tekinamo paviršiaus ir pjovimo įrankio, todėl dėl didelio kiekio drožlės buvo blokuojamas aušinimo skysčio patekimas į apdirbimo zoną. Terminis minkštėjimas sumažino paviršiaus sukietinimo laipsnį, dėl kurio matoma, kad didžiausia vertė 241,36 HV, kuri tik 11-14 HV didesnė nei birios medžiagos sluoksnis.



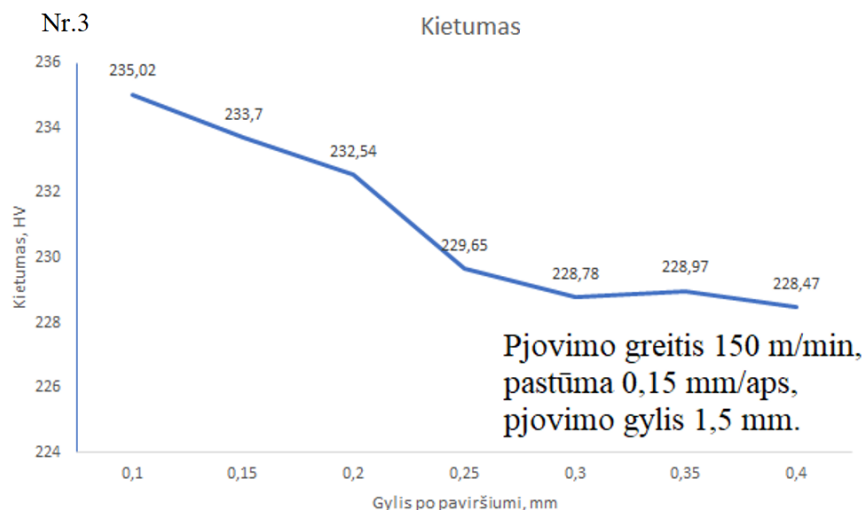
36 pav. Eksperimento nr.1 paviršiaus kietumo priklausomybė paviršiaus atžvilgiu

37 paveikslėlyje pateikta paviršiaus kietumo priklausomybė nuo pjovimo gylio, kai bandinys buvo apdirbtas naudojant 150 m/min pjovimo greitį, 0,1 mm/aps pastūmą ir tekinant ruošinį 1 mm gyliu. Didžiausias kietumas nustatytas 0,15 mm gylyje ir siekė 265,94 HV, o tai yra apie 32 HV daugiau nei sluoksnyje nepaveiktame tekinimo. Iš 38 paveikslėlio galima matyti, kad 0,1 mm gylyje kietumas yra 10 HV mažesnis nei 0,15 mm gylyje, tai parodo, kad dėl aukštos temperatūros stebimas terminis minkštėjimas. Iš mažesnės terminio minkštėjimo poveikio zonos galima spręsti, kad temperatūra apdirbimo zonoje buvo mažesnė. Iš 24 paveikslėlio matoma analogiška drožlė 1 eksperimentui ir pasikartojantis terminio minkštėjimo poveikis.



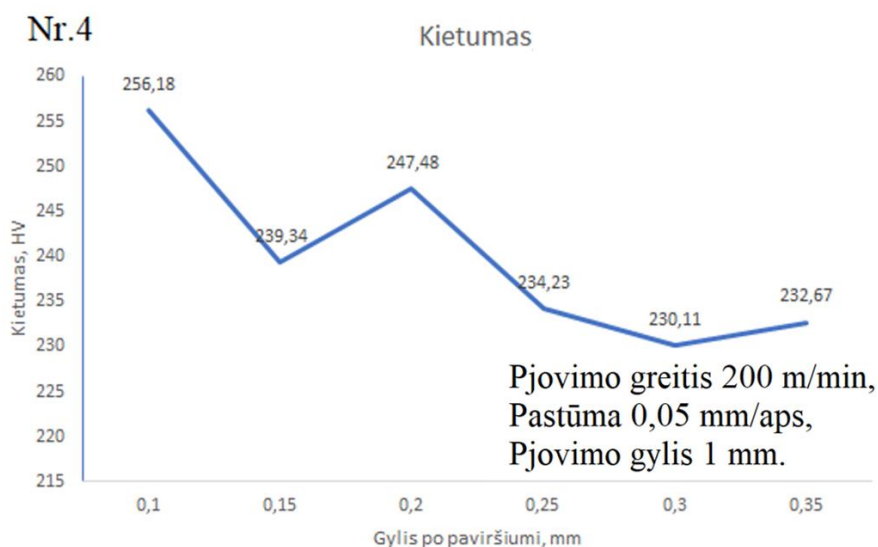
37 pav. Eksperimento nr.2 paviršiaus kietumo priklausomybė paviršiaus atžvilgiu

38 paveikslėlyje pateikta paviršiaus kietumo priklausomybė nuo pjovimo gylio, kai bandinys buvo apdirbtas naudojant 150 m/min pjovimo greitį, 0,15 mm/aps pastūmą ir tekinant ruošinį 1,5 mm gyliu. Taip pat matome, kad dėl patirtos deformacijos ir temperatūros medžiagos paviršinis sluoksnis sukietėjo tik apie 6-7 HV. Iš 25 paveikslėlio matome, kad drožlė nors ir susukta, tačiau iš jos kiekio galima įžvelgti, kad drožlė buvo linkusi lūžti. Dėl tinkamo drožlės šalinimo iš apdirbimo zonos emulsija pakankamai aušino tekinamą paviršių ir paviršinių sluoksnių užsigrūdinimas buvo minimalus, jo poveikio zona siekė tik 0,2 mm.



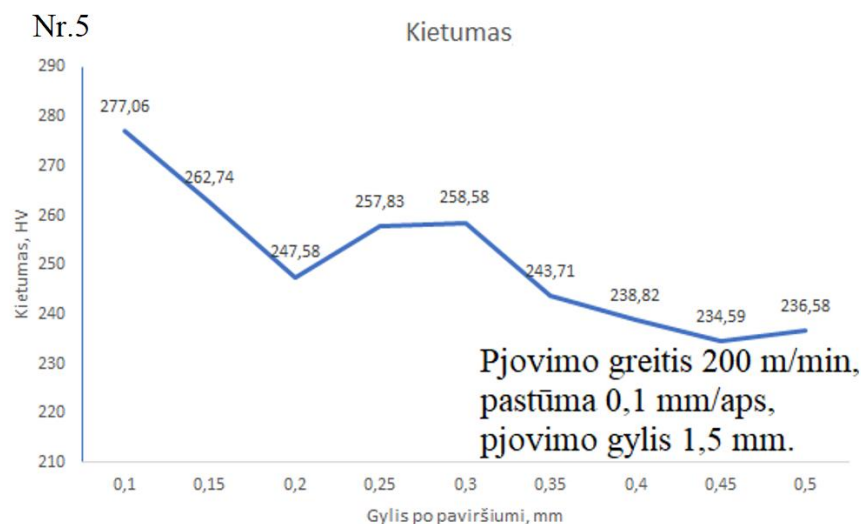
38 pav. Eksperimento nr.3 paviršiaus kietumo priklausomybė paviršiaus atžvilgiu

39 paveikslėlyje pateikta paviršiaus kietumo priklausomybė nuo pjovimo gylio, kai bandinys buvo apdirbtas naudojant 200 m/min pjovimo greitį, 0,05 mm/aps pastūmą ir tekinant ruošinį 1 mm gyliu. 39 paveikslėlyje nėra matomas terminis minkštėjimas, indikuojantis apie labai aukštą temperatūrą apdirbimo zonoje, tačiau temperatūros ir deformacijos įtaka yra matoma, nes aukščiausia užfiksuota kietumo vertė 256 HV yra apie 22-26 HV didesnė negu birios medžiagos, o paviršinių sluoksnių sukietėjimas matomas iki 0,2 mm gylio po paviršiumi. Nors iš 26 paveikslėlio matoma ir suspausta drožlė, tačiau temperatūra apdirbimo zonoje nepakilo pakankamai, kad būtų galima pastebėti terminio minkštėjimo efektą.



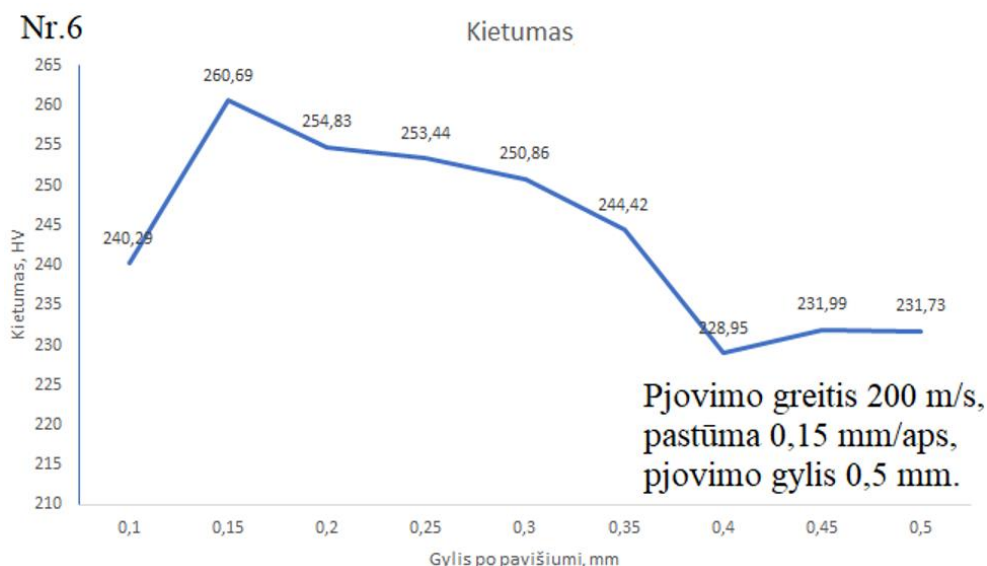
39 pav. Eksperimento nr.4 paviršiaus kietumo priklausomybė paviršiaus atžvilgiu

40 paveikslėlyje pateikta paviršiaus kietumo priklausomybė nuo pjovimo gylio, kai bandinys buvo apdirbtas naudojant 200 m/min pjovimo greitį, 0,1 mm/aps pastūmą ir tekinant ruošinį 1,5 mm gyliu. Iš šio grafiko matome, kad didžiausia kietumo vertė užfiksuota pirmame matavimo taške, kas parodo, kad nėra terminio minkštėjimo reiškinio apdirbant medžiagą šiais pjovimo režimais. Didžiausia kietumo vertė 277,06 HV yra apie 39-42 HV didesnė nei birios medžiagos sluoksnyje, o užsigrūdinimo gylis siekė iki 0,35 mm.



40 pav. Eksperimento nr.5 paviršiaus kietumo priklausomybė paviršiaus atžvilgiu

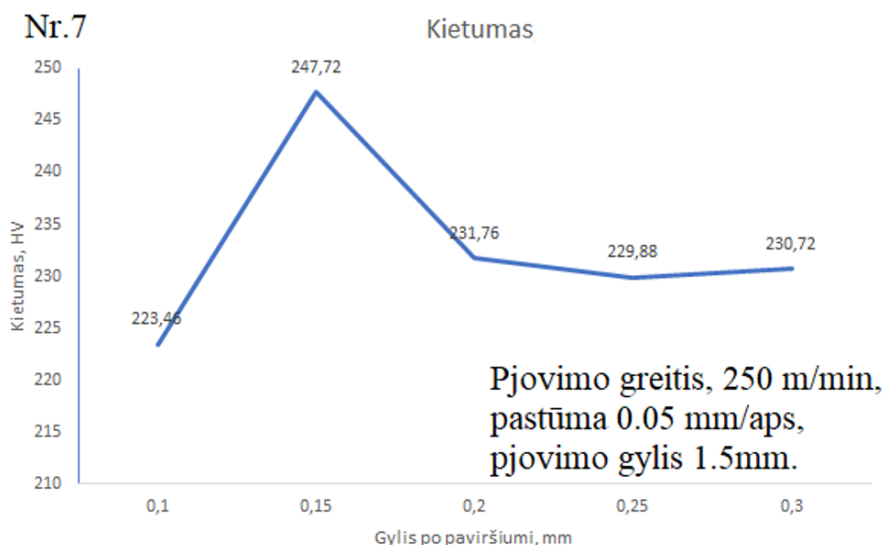
41 paveikslėlyje pateikta paviršiaus kietumo priklausomybė nuo pjovimo gylio, kai bandinys buvo apdirbtas naudojant 200 m/min pjovimo greitį, 0,15 mm/aps pastūmą ir tekinant ruošinį 0,5 mm gyliu. Terminio minkštėjimo efektas matomas iki 0,1 mm gylio po paviršiumi, o didžiausia kietumo vertė 0,15 mm gylyje. Skirtumas tarp didžiausios ir mažiausios kietumo vertės yra 29-31 HV, o užsigrūdinimo gylis siekia iki 0,35 mm.



41 pav. Eksperimento nr.6 paviršiaus kietumo priklausomybė paviršiaus atžvilgiu

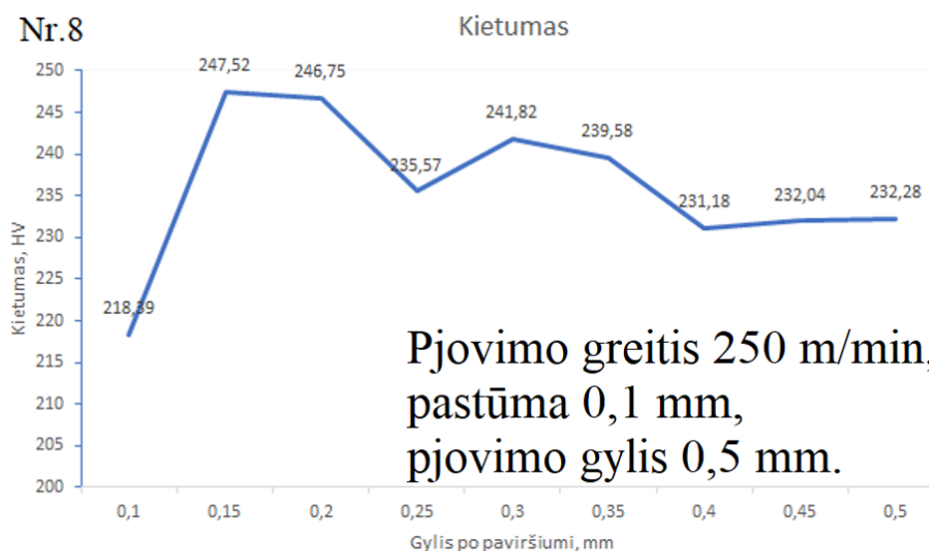
42 paveikslėlyje pateikta paviršiaus kietumo priklausomybė nuo pjovimo gylio, kai bandinys buvo apdirbtas naudojant 250 m/min pjovimo greitį, 0,05 mm/aps pastūmą ir tekinant ruošinį 1,5 mm gyliu. Iš linijinės diagramos matoma, kad terminis minkštėjimas matomas iki 0,1 mm gylio. Didžiausia

paviršiaus sukietėjimo vertė yra 247,72 HV, o tai 16-18 HV daugiau nei birios medžiagos. Užsigrūdinimo gylis siekė 0,15 mm.



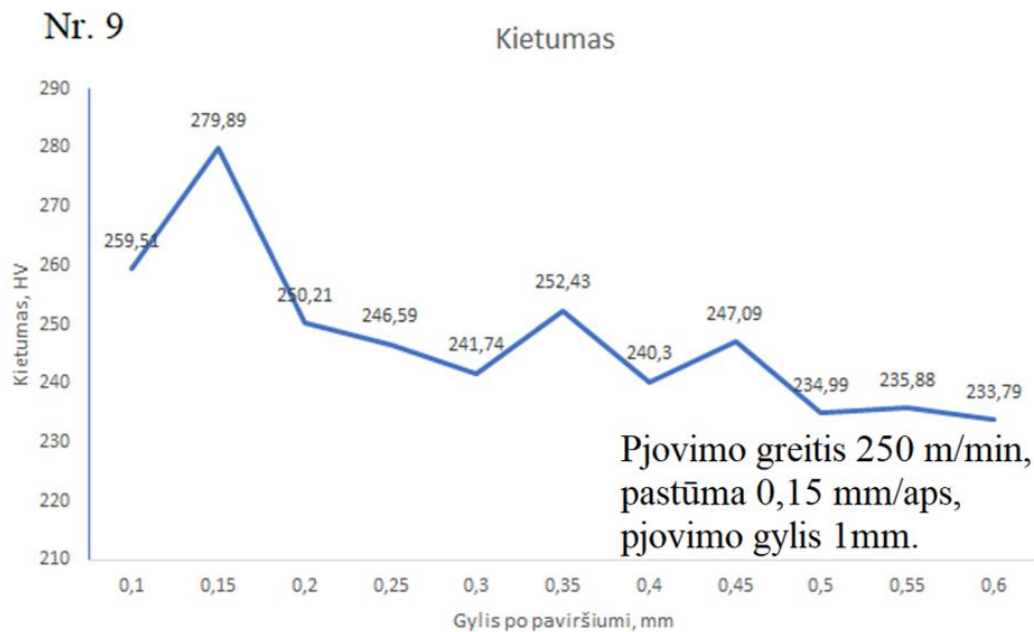
42 pav. Eksperimento nr.7 paviršiaus kietumo priklausomybė paviršiaus atžvilgiu

43 paveikslėlyje pateikta paviršiaus kietumo priklausomybė nuo pjovimo gylio, kai bandinys buvo apdirbtas naudojant 250 m/min pjovimo greitį, 0,1 mm/aps pastūmą ir tekinant ruošinį 0,5 mm gyliu. Iš diagramos matomas terminio minkštėjimo poveikis iki 0,1 mm gylio po paviršiumi, kurioje užfiksuotas 218,39 HV kietumas, kuris yra apie 13-14 HV mažesnis už birios medžiagos. Didžiausia kietumo vertė užfiksuota 0,15 mm gylyje ir siekė 247,52 HV. Ši vertė už birios medžiagos kietumą yra didesnė 15-16 HV.



43 pav. Eksperimento nr.8 paviršiaus kietumo priklausomybė paviršiaus atžvilgiu

44 paveikslėlyje pateikta paviršiaus kietumo priklausomybė nuo pjovimo gylio, kai bandinys buvo apdirbtas naudojant 250 m/min pjovimo greitį, 0,15 mm/aps pastūmą ir tekinant ruošinį 1 mm gyliu. Iš diagramos matomas terminis minkštėjimas 0,1 mm gylyje, nes 0,15 mm gylyje kietumo vertė 20 HV didesnė. Didžiausia kietumo vertė užfiksuota 0,15 mm gylyje ir siekė 279,89 HV. O skirtumas tarp didžiausios kietumo vertės ir birios medžiagos siekė 44-46 HV. Iš visų eksperimentų 9 užfiksuota tiek didžiausia užsigrūdinimo vertė, tiek užsigrūdinimo gylis, kuris siekė net 0,45 mm.



44 pav. Eksperimento nr.9 paviršiaus kietumo priklausomybė paviršiaus atžvilgiu

Iš skirtingais pjovimo režimais atliktų eksperimentų galima matyti, kad paviršinių sluoksnių didžiausias užsigrūdinimo pokytis svyravo nuo 6 HV iki 46 HV, o pjovimo metu veikianti deformacija ir temperatūra paveikė sluoksnius nuo 0,15mm iki 0,45 mm. 6 iš 9 eksperimentų buvo matomas terminio minkštėjimo efektas, kurio gylis svyravo nuo 0,1 mm iki 0,15 mm. Terminis minkštėjimas parodo, kad temperatūra apdirbimo zonoje buvo pakankamai aukšta, kad būtų suminkštinamas paviršius. Terminio minkštėjimo efektas nepastebėtas 3 bandiniuose:

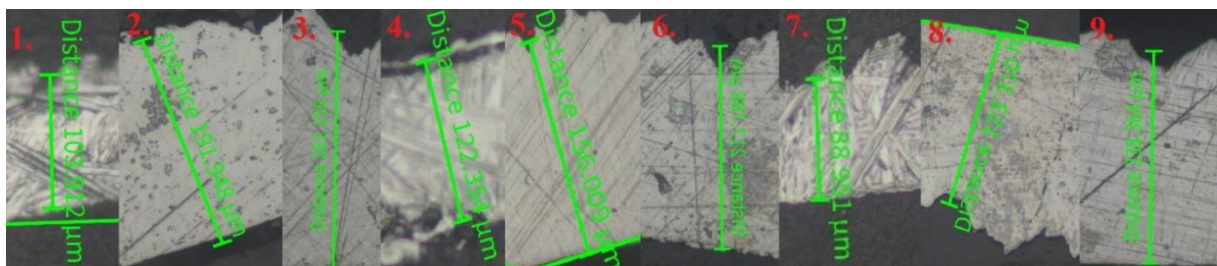
- 3. pjovimo greitis – 150 m/min, pastūma 0,15 mm/aps, pjovimo gylis 1,5 mm;
- 4. pjovimo greitis – 200 m/min, pastūma 0,05 mm/aps, pjovimo gylis 1 mm;
- 5. pjovimo greitis – 200 m/min, pastūma 0,1 mm/aps, pjovimo gylis 1,5 mm.

Šios trys pjovimo režimų kombinacijos rodo geriausias paviršinių sluoksnių savybes. Šių bandinių eksploatacinės savybės bus geriausios, nes ties pačiu paviršiumi medžiaga nėra suminkštėjusi, dėl to šie bandiniai bus atsparesni dilimui nei tie, kuriuose matomas paviršinių sluoksnių terminis minkštėjimas. Galima daryti prielaidą, kad bandiniuose, kuriuose buvo pastebėtas terminio minkštėjimo efektas, ties pačiu paviršiumi sluoksniai yra dar minkštesni, dėl ko dilimas būtų ypač didelis. Prielaidą galima daryti iš labiausiai terminio minkštėjimo paveikto 1 bandinio, iš kurio matoma, kad arčiau apdirbto paviršiaus esantys sluoksniai yra stipriau paveikiami terminio minkštėjimo efekto.

Iš 4 paveikslėlio matome, kad užsigrūdinimas iki 350 HV, o užsigrūdinimo gylis iki 0,45 mm. Šiame tyrime naudotas pjovimo gylis 2 mm, pastūma 0,3 mm/aps ir vienintelis kintamasis buvo tekinimo greitis 50-150 m/min, o eksperimente aušinimo skystis nebuvo naudojamas [8]. Šiame tyrime galima matyti tik 1 vietoje terminio minkštėjimo poveikio zoną. Esminiai skirtumai, lemiantys skirtingus rezultatus tarp eksperimentų, yra skirtingi pjovimo režimai, skirtingas aušinimas. Didesni pjovimo režimai lemia geresnį drožlės skilimą ir jos šalinimą iš apdirbimo zonos. Šiame darbe pastebėta, kad didelę įtaką paviršinių sluoksnių užsigrūdinimui gali lemti drožlės formavimasis, nes drožlė gali užblokuoti aušinimo skysčio patekimą į pjovimo zoną, o papildoma trintis tarp ruošinio, drožlės ir tekinimo įrankio gali dar padidinti temperatūrą apdirbimo zonoje.

3.6. Drožlių deformacijos tyrimas

45 paveikslėlyje pateiktos nuotraukos padarytos drožlių storio matavimų metu. Šios nuotraukos eilės tvarka išrikiuotos pagal eksperimentinį planą, esantį 6 lentelėje.



45 pav. Drožlių storio matavimo nuotraukos

15 lentelėje pateikti, visų drožlių matavimų rezultatai (žr. 15 lentelę). Iš gautų matavimų rezultatų apskaičiuotas vidurkis.

15 lentelė. Drožlės storio matavimų suvestinė su apskaičiuotais vidurkiais.

Eksperimento numeris	Drožlės storis, μm					Drožlės storio vidurkis, μm
1.	97,095	101,768	98,188	104,067	124,554	105,154
2.	191,948	172,283	185,086	193,377	202,546	189,048
3.	281,155	279,488	288,922	271,722	265,583	277,374
4.	117,810	120,284	126,171	103,942	115,085	116,658
5.	159,87	167,6	179,977	160,051	156,009	164,701
6.	217,788	225,988	198,960	191,721	207,189	208,329
7.	101,666	96,666	100,557	103,339	88,951	98,236
8.	159,467	153,370	175,259	148,980	166,267	160,669
9.	238,366	246,141	239,446	237,788	231,110	238,57

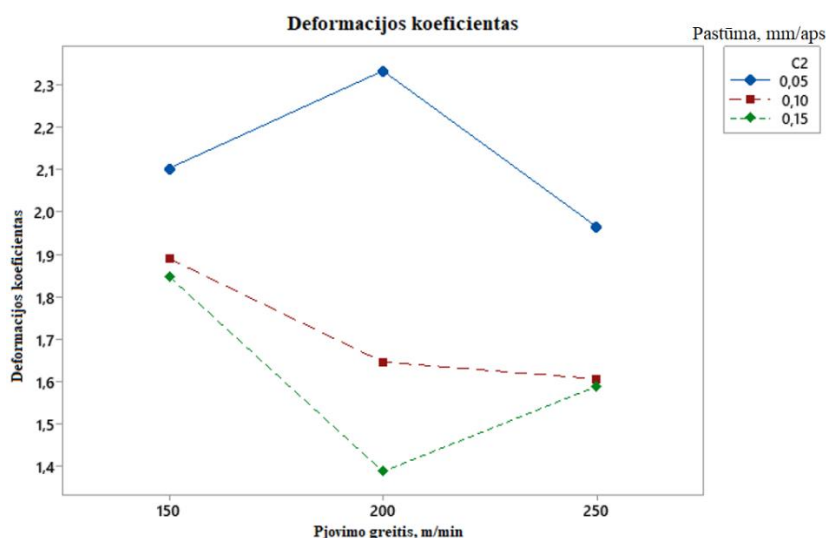
Iš 15 lentelės (žr. 15 lentelę) matoma, kad didėjant pjovimo greičiui drožlės storis mažėja. 16 lentelėje pasinaudojus drožlės storio vidurkiu, apskaičiuoti deformacijos koeficientai (žr. 16 lentelę).

16 lentelė. Drožlės deformacijos koeficiento skaičiavimo suvestinė

Eksperimento numeris	Deformacijos koeficientas, K_a
1.	2,103
2.	1,891
3.	1,849
4.	2,333
5.	1,647
6.	1,389
7.	1,965
8.	1,607
9.	1,59

46 paveikslėlyje pateikta deformacijos koeficiento priklausomybė nuo pjovimo greičio ir pastūmos. Iš priklausomybės galima matyti, kad deformacijos koeficientas mažėja didėjant pastūmai ir linijiniam pjovimo greičiui.

- kai pjovimo greitis 150 m/min, drožlės deformacijos koeficiento vidurkis – 1,948;
- kai pjovimo greitis 200 m/min, drožlės deformacijos koeficiento vidurkis – 1,79;
- kai pjovimo greitis 250 m/min, drožlės deformacijos koeficiento vidurkis – 1,721.

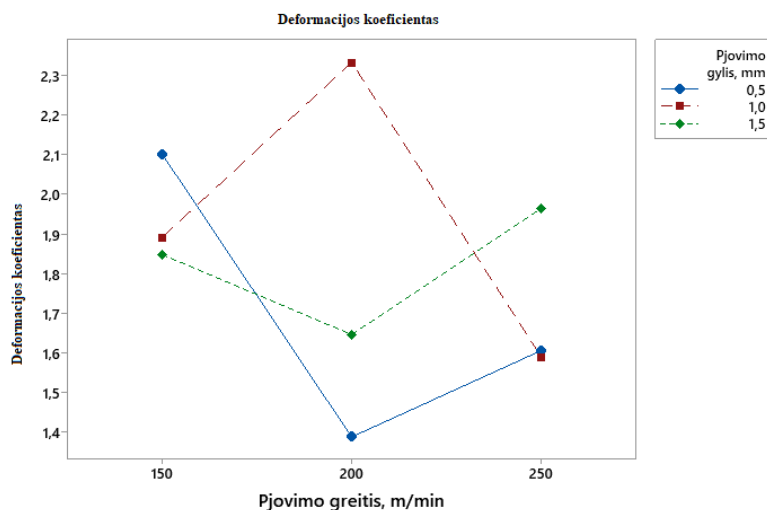


46 pav. Deformacijos koeficiento priklausomybė nuo pjovimo greičio ir pastūmos.

47 paveikslėlyje pateikta deformacijos koeficiento priklausomybė nuo pjovimo greičio ir pjovimo gylio. Iš šio linijinio grafiko galima matyti, kad deformacijos koeficientas nėra priklausomas nuo pjovimo gylio ir pjovimo greičio sąveikos.

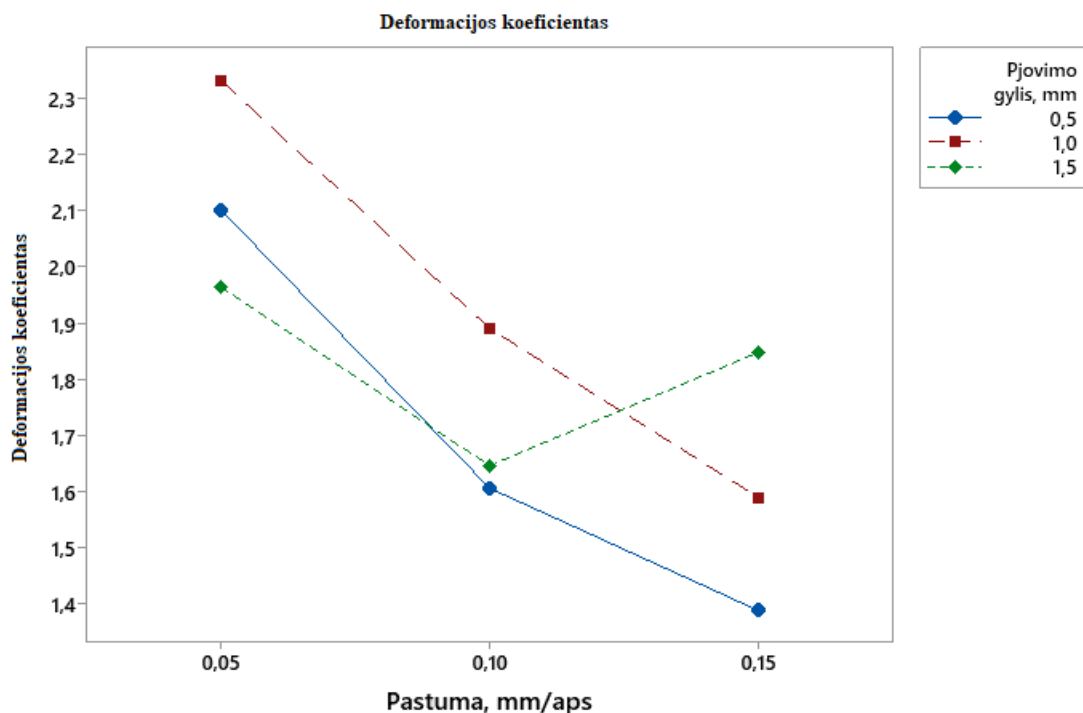
- kai pjovimo gylis 0,5 mm, drožlės deformacijos koeficiento vidurkis – 1,7;
- kai pjovimo gylis 1 mm, drožlės deformacijos koeficiento vidurkis – 1,938;
- kai pjovimo gylis 1,5 mm, drožlės deformacijos koeficiento vidurkis – 1,82.

Atlikta pjovimo gylio vidurkio analizė taip pat parodo, kad nuo šių dviejų kintamųjų sąveikos deformacijos koeficientas nepriklauso, nes rezultatai išsidėlioja ne tiesiškai.



47 pav. Deformacijos koeficiento priklausomybė nuo pjovimo greičio ir pjovimo gylio.

48 paveikslėlyje pateikta deformacijos koeficiento priklausomybė nuo pastūmos ir pjovimo gylio.



48 pav. Deformacijos koeficiento priklausomybė nuo pastūmos ir pjovimo gylio.

Iš 48 paveikslėlio yra matoma, kad pastūmai didėjant deformacijos koeficientas mažėja, tačiau taip pat galima pastebėti, kad šis koeficientas nėra priklausomas nuo pjovimo gylio.

- kai pastūma 0,05 mm/aps, drožlės deformacijos koeficiento vidurkis – 2,134;
- kai pastūma 0,1 mm, drožlės deformacijos koeficiento vidurkis – 1,715;
- kai pastūma 0,15 mm, drožlės deformacijos koeficiento vidurkis – 1,609.

Vidurkių analizė parodo, kad deformacijos koeficientas priklauso nuo pastūmos ir pjovimo greičio, tačiau jam įtakos nedaro pjovimo greitis. Didėjant pastūmai ir linijiniam pjovimo greičiui drožlės deformacijos koeficientas mažėja.

3.7. Skyriaus apibendrinimas

Tekinimo eksperimente atliktas tikslaus apdirbimo laiko tyrimas parodė, kad mažiausia apdirbimo laiko vertė buvo 11 sekundžių, kai buvo naudotas pjovimo greitis 250 m/min, pastūma 0,1 mm/aps, o pjovimo gylis 0,5 mm, o didžiausia 38 s, kai pjovimo greitis 150 m/min, pastūma 0,05 mm/aps ir pjovimo gylis 1,5 mm. Taip pat iš tyrimo pastebėta, kad didžiausią įtaką apdirbimo laikui daro pastūma.

Drožlių tyrimų metu buvo pastebėta, kad drožlės formavimasis gerėja didėjant tiek pjovimo greičiui, tiek pastūmai. Didėjant pjovimo greičiui, mažėja drožlės polinkis veltis ir susipinti su kitomis drožlėmis, forma darosi tiesesnė. Didėjant pastūmai drožlė buvo lengviau pašalinama iš darbinės zonos, o naudojant didžiausią tyrime nagrinėtą pastumą drožlė rodė polinkį lūžti.

Paviršiaus šiurkštumo tyrimai parodė, kad tekinant nerūdijantį plieną *Duplex EN 1.4462* galima pasiekti 0,433 paviršiaus šiurkštumą, kai pjovimo greitis 200 m/min, pastūma 0,05 mm/aps, pjovimo gylis 1 mm. Iš tyrimo rezultatų matoma, kad didžiausią įtaką daro pastūma. Atlikta vidurkių analizė

parodė, kad tinkamiausi parametrai tiksliam apdirbimui yra: pjovimo greitis 250 m/min, pastūma 0,05 mm/aps, pjovimo gylis 1 mm.

Iš medžiagos mikrostruktūros galima matyti, kad medžiaga sudaryta iš austenito ir ferito. Iš mikrostruktūros taip pat galima matyti, kad plienas yra kokybiškas, nes turi nedaug nemetalinių priemaišų.

Paviršiaus kietumo tyrime buvo pastebėta, kad 6 iš 9 bandinių fiksuotas terminio minkštėjimo efektas. Dėl šio efekto įsigalėjimo gaminių paviršiai būtų nekokybiški ir jų dilimas būtų labai spartus. Tyrime pastebėta, kad mažiausias pjovimo režimų poveikis užfiksuotas, kai ruošinys buvo tekintas 150 m/min pjovimo greičiu, 0,15 mm/aps pastūma ir 1,5 mm pjovimo gyliu. Iš eksperimento galima matyti, kad tik 3 pjovimų režimų kombinacijų panaudojimo metu nebuvo stebėtas terminis minkštėjimas:

- 3. pjovimo greitis – 150 m/min, pastūma 0,15 mm/aps, pjovimo gylis 1,5 mm;
- 4. pjovimo greitis – 200 m/min, pastūma 0,05 mm/aps, pjovimo gylis 1 mm;
- 5. pjovimo greitis – 200 m/min, pastūma 0,1 mm/aps, pjovimo gylis 1,5 mm.

Galima teigti, kad šios 3 tekimo režimų kombinacijos yra geriausios paviršiaus sukietinimo atžvilgiu apdirbant nerūdijantį plieną *Duplex EN 1.4462*.

Drožlės deformacijos koeficiento tyrimas parodė, kad apdirbant *Duplex EN 1.4462* nerūdijantį plieną šis koeficientas turi polinkį mažėti, kai didėja linijinis pjovimo greitis ir pastūma, tačiau pjovimo gylis jam neturi įtakos.

4. Eksperimentų rezultatų teikiamos naudos

Eksperimentų metu gauti rezultatai teikia ypatingą naudą mechaninio apdirbimo įmonėms. Ypatingą naudą šie tyrimai teikia vienetine ir smulkiaserijine gamyba užsiimančioms įmonėms. Šio tipo įmonės pasižymi tuo, kad didžioji dalis darbuotojų yra aukštos kvalifikacijos darbininkai, nes vienetinėje ir smulkiaserijinėje gamyboje didžiausia kaina dedamoji yra staklių derinimo ir programavimo laikas. Tačiau tokiose įmonėse atliekama mažai tyrimų ir dažnai viskas priklauso tik nuo operatoriaus patirties ir žinių. Dažnai vienetinėje gamyboje galima pamatyti tai, kad programos rašymas, staklių derinimas užima keletą valandų, bet detalės pagaminimas užtrunka vos iki 10 minučių. Dėl šio aspekto galutinio gaminio kaina gali būti stipriai išpučiama, jeigu operacijos yra išskaidomos ir atliekamos ant skirtingų įrenginių. Šiame darbe buvo ištirta pjovimo parametrų įtaka paviršiaus šiurkštumui. Kiekvienas technologinis procesas turi galimybių ribas, dėl to yra ypač svarbu ištirti, kiek šios ribos siekia. 14 lentelėje pateikti paviršiaus šiurkštumo rezultatai parodo, kad apdirbant *Duplex 1.4462* nerūdijantį plieną galima gauti 0,433 Ra paviršiaus šiurkštumą. Šis rezultatas parodo, kad galima tiksliai apdirbinėti detales tekinant ir nenaudoti papildomos šlifavimo operacijos iki 0,4 Ra paviršiaus šiurkštumo. Šių rezultatų teikiama nauda apdirbant detales, kurių paviršiaus šiurkštumo tolerancijos yra iki 0,4:

- sumažinama apdirbimo proceso technologinė grandinė;
- sumažinamos išlaidos gaminių transportavimui tarp apdirbimo operacijų;
- sumažinamas apdirbimo operacijų kiekis;
- sumažinama broko rizika dėl mažesnės žmogiškosios klaidos tikimybės;
- sumažinamas gaminių sandėliavimo laikotarpis;
- sumažinamas poreikis šlifavimo operacijos, kas leidžia priimti daugiau užsakymų;
- sumažinamas detalių įstatymo/išėmimo kiekis (pridėtinės vertės nekurianti veikla);
- sumažinama galutinė gaminio kaina;
- pagreitinamas gaminio apdirbimo procesas;
- padidinama apyvartinių lėšų cirkuliacija.

Vidutinio serijingumo ir stambiaserijinėje gamyboje staklių derinimas ir programavimas sudaro mažą dalį galutinės gaminio kainos. Gaminio kaina eksponentiškai krenta didėjant gaminamų detalių skaičiui. Šio tipo gamyba užsiimančioms įmonėms daug didesnę įtaką gaminio savikainai daro apdirbimo laikas. Šio tipo gamyboje pelno procentas nuo gaminio savikainos yra ženkliai mažesnis, nes rinkoje didesnė konkurencija, dėl to reikia atsižvelgti į daugiau aspektų negu vienetinėje arba smulkiaserijinėje gamyboje. 13 lentelėje tirtas tikslaus apdirbimo laikas padės suprasti, kokią įtaką apdirbimo laikas turi galutinei gaminio savikainai. Medžiagos pašalinimo greitis yra esminis parametras, naudojamas apdirbimo laiko modeliavimui. Šis parametras yra plačiausiai panaudojamas dėl paprasto apdirbimo laiko apskaičiavimo, kai žinomas nupjaunamas medžiagos tūris ir pjovimo parametrai, kurie bus naudojami apdirbimo eigoje. Šis parametras padės suprasti, kokią įtaką parinkti pjovimo parametrai daro apdirbimo proceso našumui. Tai leis plačiau įvertinti ir palyginti apdirbimo savybes, apdirbimo laiką ir apdirbimo našumą.

Medžiagos pašalinimo greitis yra apskaičiuojamas [39]:

$$MRR = 1000vfd \quad (4.1)$$

Čia: MRR – medžiagos pašalinimo greitis, mm³/min; v – pjovimo greitis, m/min; f – pastūma, mm/aps; d – pjovimo gylis, mm.

17 lentelė. Medžiagos pašalinimo greičio skaičiavimo lentelė

Numeracija	Pjovimo greitis, m/min	Pastūma, mm/aps	Pjovimo gylis, mm	Laikas, s	Medžiagos pašalinimo greitis, mm ³ /min
1	150	0,05	0,5	38	3750
2	150	0,1	1	21	15000
3	150	0,15	1,5	15	33750
4	200	0,05	1	29	10000
5.	200	0,1	1,5	17	30000
6.	200	0,15	0,5	13	15000
7.	250	0,05	1,5	24	18750
8.	250	0,1	0,5	15	12500
9.	250	0,15	1	11	37500

Medžiagos pašalinimo greitis nusako nupjaunamą medžiagos tūrį per minutę. Šis parametras padeda tinkamai įvertinti apdirbimo proceso našumą. Iš 17 lentelės galima matyti, kad našiausias tekinimas yra, kai naudojama 250 m/min pjovimo greitį, 0,15 mm/aps pastūmą ir 1 mm pjovimo gylį, o mažiausiai našus, kai naudojama 150 m/min pjovimo greitį, 0,05 mm/aps pastūmą ir 0,5 mm pjovimo gylį (žr. 17 lentelę).

Atsižvelgus į tai, kad įmonėse valandinis staklių įkainis stipriai svyruoja, tolimesniems skaičiavimas naudosime valandinį įkainį 30 EUR/h. Įvertinti tikslaus pjovimo laiko teikiamą naudą didesniai gaminių kiekiui naudosime 1000 vienetų detalių kaip atskaitos vertę.

18 lentelė. Kainos skaičiavimo lentelė

numeracija	Laikas, s	Kaina, EUR/vnt	Kiekis, vnt	Visas laikas, s	Visa kaina, EUR	Kaina su PVM, EUR
1.	38	0,32	1000	38000	316,67	383,17
2.	21	0,18	1000	21000	175	211,75
3.	15	0,13	1000	15000	125	151,25
4.	29	0,24	1000	29000	241,67	292,42
5.	17	0,14	1000	17000	141,67	171,42
6.	13	0,11	1000	13000	108,33	131,08
7.	24	0,2	1000	24000	200	242
8.	15	0,13	1000	15000	125	151,25
9.	11	0,09	1000	11000	91,67	110,92

Iš 18 lentelės galima matyti, kad vienos 20 mm ilgio detalės tiksliojo tekinimo operacijos kaina gali svyruoti nuo 0,09 euro iki 0,32 euro, o tai yra net 3,56 kartų skirtumas (žr. 18 lentelę). Teisingas pjovimo režimų parinkimas pagal technologinio brėžinio reikalavimus gali leisti efektyviau išnaudoti įmonės turimus resursus, padidinti apdirbimo spartą, taip sutaupant įmonės lėšas ir pagreitinant įmonės apyvartinių lėšų cirkuliaciją, atveriant galimybę priimti daugiau užsakymų.

Iš gautų rezultatų 14 (žr. 14 lentelę) ir 18 (žr. 18 lentelę) lentelėse, ir 4 lentelėje (žr. 4 lentelę) pateiktos paviršiaus šiurkštumo tolerancijų lentelės, ir 3.5 skyriuje atlikto paviršiaus užsigrūdinimo tyrimų rezultatų, sudaryta tinkamiausia pjovimo rezultatų suvestinė pateikta 19 lentelėje (žr. 19 lentelę).

19 lentelė. Tinkamiausi pjovimo režimai, pagal paviršiaus šiurkštumo tolerancijas

Tolerancija	Paviršiaus šiurkštumo tolerancija	Pjovimo parametrų numeris iš 12 lentelės	Paviršiaus šiurkštumas Ra,	Apdirbimo laikas, s	Vieneto kaina, Eur	Medžiagos pašalinimo greitis, mm ³ /min	Kietumas, HV 0.1 mm gylyje
N8 ir didesnės	>1,6	5.	1,023	17	0,14	30000	277,06
N7	1,6>x>0,8	5.	1,023	17	0,14	30000	277,06
N6	0,8>x>0,4	4.	0,433	29	0,24	10000	256,18

Iš 19 lentelės galima matyti, kad geriausi rezultatai paviršiaus šiurkštumo, apdirbimo laiko, kainos, kietumo atžvilgiais buvo gauti, kai naudoti parametrai yra:

- 4. pjovimo greitis – 200 m/min, pastūma 0,05 mm/aps, pjovimo gylis 1 mm;
- 5. pjovimo greitis – 200 m/min, pastūma 0,1 mm/aps, pjovimo gylis 1,5 mm.

4.1. Skyriaus apibendrinimas

Šiame skyriuje apžvelgtos tyrimo rezultatų teikiamos naudos gamyboje. Paviršiaus šiurkštumo tyrimo rezultatai leidžia gaminti detales iki 0,4 Ra paviršiaus šiurkštumo nenaudojant šlifavimo operacijos. Ši informacija ypač svarbi vienetine arba mažaserijine gamyba užsiimančioms įmonėms. Šio tipo gamybos įmonėse daugiausia laiko užima staklių derinimas ir programavimas, apdirbimo įrankių parinkimas, technologijos sudarymas. Dėl šio pakeitimo įmonėse būtų sumažinama apdirbimo proceso technologinė grandinė, sumažinamos išlaidos gaminių transportavimui tarp apdirbimo operacijų (pridėtinės vertės nekurianti veikla), sumažinamas apdirbimo operacijų kiekis, sumažinama broko rizika dėl mažesnės žmogiškosios klaidos tikimybės, sumažinamas gaminių sandėliavimo laikotarpis (pridėtinės vertės nekurianti veikla), sumažinamas poreikis šlifavimo operacijos, kas leidžia priimti daugiau užsakymų, sumažinamas detalių įstatymo/išėmimo kiekis (pridėtinės vertės nekurianti veikla), sumažinama galutinė gaminio kaina, pagreitinamas gaminio apdirbimo procesas, padidinama apyvartinių lėšų cirkuliacija. Šios teikiamos naudos stipriai padėtų sumažinti tam tikrų detalių gamybos savikainą. Sumažinta gaminių savikaina įmonėms leidžia ne tik sutaupyti lėšų, bet ir padidinti konkurencingumą rinkoje. Galint gaminti mažesne kaina nei konkurentai leistų gauti daugiau užsakymų, taip padidinant įmonės galimybę rinktis užsakymus pagal jų grįžtamąją vertę.

Iš atliktų skaičiavimų, galima matyti, kad gaminio tikslojo apdirbimo kaina gali svyruoti net 3,56 karto. Tai parodo, kokią didelę finansinę žalą įmonės gali patirti, dėl netinkamai parinktų pjovimo režimų ar žinių trūkumo. Atliktas tyrimas ir duomenų analizė parodė 2 pjovimo parametrų kombinacijas, kuriomis yra ne tik efektyvu gaminti detales, bet ir pjovimo režimai pagerina galutinio gaminio savybes. Padidėjęs gaminio paviršinių sluoksnių kietumas padidina gaminių atsparumą dilimui ir tuo pačiu ilgaamžiškumą. Mechaninių komponentų ilgaamžiškumas yra vienas svarbiausių faktorių. *Duplex EN 1.4462* nerūdijančiam plienui yra ypač svarbus geras paviršiaus išbaigimas, nes tai daro plieną dar labiau atsparų korozijai.

Iš 17 lentelės galima matyti, kad geriausios pjovimo režimų kombinacijos yra – pjovimo greitis 200 m/min, pastūma 0,05 mm/aps, pjovimo gylis 1 mm ir pjovimo greitis 200 m/min, pastūma 0,1 mm, pjovimo gylis 1,5 mm. Šie pjovimo režimai užtikrina didžiausią medžiagos kietumą, su geriausiu paviršiaus šiurkštumu, efektyviai tekinant medžiagą, kad būtų gaunama didžiausia įmanoma grąža gaminant kokybišką produkciją.

Išvados

1. Nerūdijantis plienas *Duplex EN 1.4462* - tai sunkiai apdirbama medžiaga, kurioje daugiausia problemų sukelia prastas drožlės formavimasis, reikalaujantis didelės pastūmos ir pjovimo greičio, kad priverstų drožlę skilti. Medžiaga turi aukštas stiprumo, tamprumo ribas, taip pat mažas šiluminis laidumas stipriai mažina pjovimo įrankių ilgaamžiškumą ir lėtina apdirbimo našumą, nes norint išlaikyti optimalų įrankių ilgaamžiškumą, reikia naudoti mažą pjovimo greitį.
2. Pagal *Taguchi* metodu sudarytą eksperimentinį planą atlikti tekinimo eksperimentai skirtingais pjovimo greičiais (150-250 m/min), pastūma (0,05-0,15 mm/aps), pjovimo gyliais (0,5-1,5 mm) užtikrinant vienodas tekinimo sąlygas visais aspektais.
3. Paviršiaus šiurkštumo tyrimai parodė, kad geriausias paviršiaus šiurkštumas 0,433 Ra gaunamas, kai tekinama pjovimo greičiu – 200 m/min, pastūma 0,05 mm/aps, pjovimo gyliu 1 mm. Taip pat tik 3 iš 9 bandinių paviršiniuose sluoksniuose nepastebėtas terminis minkštėjimas. Paviršiaus užsigrūdinimas svyravo nuo 6 HV iki 46 HV, o pjovimo metu veikianti deformacija ir temperatūra paveikė sluoksnius nuo 0,15 mm iki 0,45 mm
4. Apdoroti tyrimų rezultatų duomenys parodė, kad atsižvelgiant į pjovimų režimų įtaką paviršiaus šiurkštumo, paviršinių sluoksnių sukietinimo, apdirbimo laiko, apdirbimo našumo, drožlės formavimosi aspektais, geriausi tiksliojo tekinimo režimai nerūdijančiam plienui *Duplex EN 1.4462*, kai reikalingas paviršiaus šiurkštumas yra $0,4 > Ra > 0,8$ - pjovimo greitis – 200 m/min, pastūma 0,05 mm/aps, pjovimo gylis 1 mm, kai $Ra > 0,8$ pjovimo greitis – 200 m/min, pastūma 0,1 mm/aps, pjovimo gylis 1,5 mm.

Literatūros sąrašas

1. TAXELL, P. and HUUSKONEN, P. Toxicity Assessment and Health Hazard Classification of Stainless Steels. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. Interaktyvus, 2022, vol. 133. pp. 105227. [žiūrėta 2023-10-5].
2. Statista Research Department. *Global Stainless Steel Melt Shop Production from 2005 to 2021*. Interaktyvus. 2023. [žiūrėta 2023-10-5] Prieiga per: <https://www.statista.com/statistics/223028/world-stainless-steel-production/>.
3. MÉSZÁROS, I., BÖGRE, B. and SZABÓ, P.J. Magnetic and Thermoelectric Detection of Sigma Phase in 2507 Duplex Stainless Steel. Interaktyvus [žiūrėta 2023-10-07] *Crystals*, 2022, vol. 12, no. 4. pp. 527.
4. SHENG, J., et al. Deformation Mechanism of Bimodal Structured 2205 Duplex Stainless Steel in Two Yield Stages. Interaktyvus [žiūrėta 2023-10-07] *Journal of Wuhan University of Technology-Mater.Sci.Ed.*, 2023, vol. 38, no. 1. pp. 184-191.
5. de Farias Azevedo, Cesar Roberto, PEREIRA, H.B., WOLYNEC, S. and PADILHA, A.F. An Overview of the Recurrent Failures of Duplex Stainless Steels. Interaktyvus [žiūrėta 2023-10-08] *Engineering Failure Analysis*, 2019, vol. 97. pp. 161-188.
6. BOUNEZOUR, H., LAOUAR, L., BOURBIA, M. and OUZINE, B. Effects of Work Hardening on Mechanical Metal Properties—experimental Analysis and Simulation by Experiments. Interaktyvus [žiūrėta 2023-10-09] *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 101. pp. 2475-2485.
7. MOHAMMADI, Y. and AMIRABADI, H. Analytical Modeling of Work Hardening of Duplex Steel Alloys in the Milling Process. Interaktyvus [žiūrėta 2023-10-15] *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2022, vol. 36, no. 3. pp. 1437-1449.
8. KROLCZYK, G., NIESLONY, P. and LEGUTKO, S. Microhardness and Surface Integrity in Turning Process of Duplex Stainless Steel (DSS) for Different Cutting Conditions. Interaktyvus [žiūrėta 2023-10-04] *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, vol. 23. pp. 859-866.
9. IBRAHIM, M.A. and ŞAHIN, Y. *Surface Roughness Modelling and Prediction using Artificial Intelligence Based Models*. Interaktyvus [žiūrėta 2023-10-15] Springer, 2019.
10. HE, B., DING, S. and SHI, Z. A Comparison between Profile and Areal Surface Roughness Parameters. Interaktyvus [žiūrėta 2023-10-12] *Metrology and Measurement Systems*, 2021, vol. 28, no. 3. pp. 413-438.
11. LIU, D., et al. Kinematics and Improved Surface Roughness Model in Milling. Interaktyvus [žiūrėta 2023-10-16] *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022. pp. 1-22.
12. Mitutoyo. *QUICK GUIDE TO SURFACE ROUGHNESS MEASUREMENT. Reference Guide for Laboratory and Workshop*. [viewed dec, 2016]. Interaktyvus [žiūrėta 2023-10-17] Prieiga per: https://www.mitutoyo.com/webfoo/wp-content/uploads/1984_Surf_Roughness_PG.pdf.
13. *Geometrical Product Specifications (GPS) -- Indication of Surface Texture in Technical Product Documentation*. Interaktyvus [žiūrėta 2023-12-01]. 2002-02-14 Prieiga per: https://view.elaba.lt/standartai/view?search_from=aleph&id=1280470.
14. KOYEE, R.D., EISSELER, R. and SCHMAUDER, S. Application of Taguchi Coupled Fuzzy Multi Attribute Decision Making (FMADM) for Optimizing Surface Quality in Turning

- Austenitic and Duplex Stainless Steels. *Interaktyvus [žiūrėta 2023-10-17] Measurement*, 2014, vol. 58. pp. 375-386.
15. KROLCZYK, G.M. and LEGUTKO, S. Experimental Analysis by Measurement of Surface Roughness Variations in Turning Process of Duplex Stainless Steel. *Interaktyvus [žiūrėta 2023-10-17] Metrology and Measurement Systems*, 2014, vol. 21, no. 4. pp. 759-770.
 16. KROLCZYK, G., LEGUTKO, S. and GAJEK, M. Predicting the Surface Roughness in the Dry Machining of Duplex Stainless Steel (DSS). *Interaktyvus [žiūrėta 2023-10-18] Metalurgija*, 2013, vol. 52, no. 2. pp. 259-262.
 17. GOPAL, M. Prediction of Surface Roughness in Turning of Duplex Stainless Steel (DSS) using Response Surface Methodology (RSM) and Artificial Neural Network (ANN). *Interaktyvus [žiūrėta 2023-10-18] Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 47. pp. 6704-6711.
 18. AŞCIOĞLU, M. and BOY, M. Machining Characteristics Investigations of Duplex Stainless Steel by Considering Dual Effect of Chip Breaker and Cooling Conditions. *Interaktyvus [žiūrėta 2023-10-20] Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2022, vol. 236, no. 14. pp. 7885-7898.
 19. KALADHAR, M., et al. Evaluation and Optimization of Machinability Issues in Dry Turning of DSS 2205. *Interaktyvus [žiūrėta 2023-10-21] Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 2022. pp. 1-11.
 20. SELVARAJ, D.P., CHANDRAMOHAN, P. and MOHANRAJ, M. Optimization of Surface Roughness, Cutting Force and Tool Wear of Nitrogen Alloyed Duplex Stainless Steel in a Dry Turning Process using Taguchi Method. *Interaktyvus [žiūrėta 2023-10-21] Measurement*, 2014, vol. 49. pp. 205-215.
 21. DANDGE, S.S. and CHAKRABORTY, S. Decision Tree-Based Parametric Analysis of a CNC Turning Process. *Interaktyvus [žiūrėta 2023-10-21] Scientia Iranica*, 2021, vol. 28, no. 6. pp. 3653-3674.
 22. BREAZ, R.E., BOLOGA, O., RACZ, S.G. and CRENGANIŞ, M. Selecting between CNC Turning Centers using a Combined AHP and Fuzzy Approach. *Interaktyvus [žiūrėta 2023-10-21] Procedia Computer Science*, 2019, vol. 162. pp. 290-297.
 23. HUO, Y., et al. Turning Inserts the Selection Approach Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation. *Interaktyvus [žiūrėta 2023-10-22] Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2022, vol. 236, no. 11. pp. 6103-6116.
 24. MARTINHO, R.P., SILVA, F., MARTINS, C. and LOPES, H. Comparative Study of PVD and CVD Cutting Tools Performance in Milling of Duplex Stainless Steel. *Interaktyvus [žiūrėta 2023-10-22] The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 102. pp. 2423-2439.
 25. OSMOND, L., COOK, I. and SLATTER, T. Tribological Properties of Multilayer CVD Coatings Deposited on SiAlON Ceramic Milling Inserts. *Interaktyvus [žiūrėta 2023-10-23] Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2023, vol. 7, no. 2. pp. 67.
 26. ABDOOS, M., et al. The Influence of Residual Stress on the Properties and Performance of Thick TiAlN Multilayer Coating during Dry Turning of Compacted Graphite Iron. *Interaktyvus [žiūrėta 2023-10-23] Wear*, 2020, vol. 454. pp. 203342.

27. PAESE, E., et al. Assessment of CVD-and PVD-Coated Carbides and PVD-Coated Cermet Inserts in the Optimization of Surface Roughness in Turning of AISI 1045 Steel. Interaktyvus [žiūrėta 2023-10-23] *Materials*, 2020, vol. 13, no. 22. pp. 5231.
28. *Tool-Life Testing with Single-Point Turning Tools*. Interaktyvus [žiūrėta 2023-11-03] 1993-11-18 ed. Prieiga per: https://view.elaba.lt/standartai/view?search_from=aleph&id=1277028.
29. Hoffmann Group. *Dinamometrinis Atsuktuvus, Fiksuotas 3,0 Nm*. Interaktyvus [žiūrėta 2023-11-03] Prieiga per: https://www.hoffmann-group.com/LT/lt/metmatus/Metalo-apdirbimas-pjovimu/Kiaurym%C4%97s-apdirbimas/Kiaurymi%C5%B3-apdirbimas-%E2%80%93-atargin%C4%97s-dalys-ir-priedai/Dinamometrinis-atsuktuvus%2C-fiksuotas/p/211750-3%2C0?wayIntoCart=SRP_SPAREPARTS&referenceFor=659965-
30. Haas. *Ds-30y*. Interaktyvus [žiūrėta 2023-11-03] Prieiga per: https://www.haascnc.com/machines/lathes/dual-spindle/models/ds-30y.html?gclid=Cj0KCQjwm66pBhDQARIsALIR2zA_KV6amNJIIsHng7mjb8nevdaZTvY9u20sStygLKRjq7wmdijnewwaAkoqEALw_wcB.
31. *Toolholder with Square-Multi-Receptacle*. Interaktyvus [žiūrėta 2023-11-04]. Prieiga per: <https://www.kemmler-shop.de/en/haas-bmt-65/haas-bmt-65/4468/toolholder-with-square-multi-receptacle>.
32. Hoffmann Group katalogas. *Tekinimo Laikiklis Su Keičiama Plokštele 25/15 Mm*. Interaktyvus [žiūrėta 2023-11-05]. Prieiga per: <https://www.hoffmann-group.com/LT/lt/metmatus/Metalo-apdirbimas-pjovimu/Tekinimas/I%C5%A1ilginio-ir-plok%C5%A1tum%C5%B3-tekinimo-%C4%AFrankiai/Tekinimo-%C4%AFranki%C5%B3-laikikliai-ir-pjovimo-galvut%C4%97s/Tekinimo-laikiklis-su-kei%C4%8Ddama-plok%C5%A1tele-kairinis/p/250611-25%402F15?Id=15>.
33. SECO. *Dnmg150604-Mf1 Cp500*. Interaktyvus [žiūrėta 2023-11-06] Prieiga per: https://www.secotools.com/article/p_00096874?productDetailsTab=fullSpecification.
34. Machining Doctor. *CP 500 SECO Grade - Info Page*. Interaktyvus [žiūrėta 2023-11-06] Prieiga per: <https://www.machiningdoctor.com/grades/gradeinfo/?grade=CP500>.
35. Mitutoyo. *Surftest SJ-210*. Interaktyvus [žiūrėta 2023-11-18] Prieiga per: <https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/en/all/all/Surftest%20SJ-210%20%5Bmm%5D/PR/178-560-13D/index.xhtml>.
36. METALLOGRAPHY. *Smartlam®2.0*. Interaktyvus [žiūrėta 2023-11-20]. Prieiga per: <https://www.lamplan.com/en/metallography/prepolishing-polishing/prepolishing-polishing-machines/polishing-machine-smartlam%C2%AE2-0.html#endetails>.
37. OSTAŠEVIČIUS, V. and MARKAUSKAS, S. *Pjovimo Teorija Ir Modernieji Pjovimo Būdai : Mokomoji Knyga*. Interaktyvus [žiūrėta 2023-11-20] prieiga per: ISBN 9786090210901.
38. ČEP, R., NESLUŠAN, M. and BARIŠIĆ, B. Chip Formation Analysis during Hard Turning. Interaktyvus [žiūrėta 2023-11-20] *Strojarstvo: Časopis Za Teoriju i Praksu U Strojarstvu*, 2008, vol. 50, no. 6. pp. 337-346.
39. SAHA, S., MAITY, S.R. and DEY, S. Artificial-Neural-Network-Based Uncertain Material Removal Rate by Turning. Interaktyvus [žiūrėta 2023-11-20] *Reliability, Safety and Hazard Assessment for Risk-Based Technologies*, 2020. pp. 591-596 ISSN 2195-4356; 978-981-13-9008-1; 978-981-13-9007-4. DOI 10.1007/978-981-13-9008-1_49.

Priedai

1 priedas. Paviršiaus šiurkštumo tyrimų lentelė [14, 15, 16, 17, 18, 19, 20]

N r.	Pjovimo režimai			Plokštelės viršūnės suapvalinimo spindulys r (mm)	Paviršiaus šiurkštuma s	Aušinim as	Danga	Stakl ės
	Linijinis pjovimo greitis v_c (m/min)	Pastūma f_t (mm/aps)	Pjovimo gylis a_p (mm)		Paviršiaus šiurkštuma s R_a (μ m)			
1	180	0.02	0.3	0.4	0.988	-	PVD (TiAlN)	SPV
2	200	0.02	0.6	0.4	1.146	-	PVD (TiAlN)	SPV
3	220	0.02	0.9	0.4	1.131	-	PVD (TiAlN)	SPV
4	240	0.02	0.3	0.4	2.23	-	PVD (TiAlN)	SPV
5	80	0.04	0.5	0.8	0.6	-	CVD (TiCV/TiCN)	Univ ersali os
6	100	0.04	0.5	0.8	0.53	-	CVD (TiCV/TiCN)	Univ ersali os
7	120	0.04	0.5	0.8	0.58	-	CVD (TiCV/TiCN)	unive rsalio s
8	180	0.06	0.6	0.4	1.25	-	PVD (TiAlN)	SPV
9	200	0.06	0.3	0.4	0.524	-	PVD (TiAlN)	SPV
10	220	0.06	1.2	0.4	1.131	-	PVD (TiAlN)	SPV
11	240	0.06	0.9	0.4	0.821	-	PVD (TiAlN)	SPV
12	80	0.08	0.5	0.8	0.68	-	CVD (TiCV/TiCN)	Univ ersali os
13	100	0.08	0.5	0.8	0.57	-	CVD (TiCV/TiCN)	Univ ersali os
14	120	0.08	0.5	0.8	0.6	-	CVD (TiCV/TiCN)	unive rsalio s

15	50	0.1	0.5	0.8	0.584	Emulsija	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
16	100	0.1	1.5	0.8	0.694	Emulsija	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
17	150	0.1	2.5	0.8	0.594	Emulsija	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
18	180	0.1	0.9	0.4	1.159	-	PVD (TiAlN)	SPV
19	200	0.1	1.2	0.4	0.801	-	PVD (TiAlN)	SPV
20	200	0.1	3.5	0.8	0.558	Emulsija	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
21	220	0.1	0.3	0.4	0.751	-	PVD (TiAlN)	SPV
22	240	0.1	0.6	0.4	0.986	-	PVD (TiAlN)	SPV
23	80	0.12	0.5	0.8	0.85	-	CVD (TiC/TiCN)	Universali os
24	100	0.12	0.5	0.8	0.64	-	CVD (TiC/TiCN)	Universali os
25	120	0.12	0.5	0.8	0.76	-	CVD (TiC/TiCN)	Universali os
26	180	0.14	1.2	0.4	1.153	-	PVD (TiAlN)	SPV
27	200	0.14	0.9	0.4	1.352	-	PVD (TiAlN)	SPV
28	220	0.14	0.6	0.4	0.94	-	PVD (TiAlN)	SPV
29	240	0.14	0.3	0.4	1.485	-	PVD (TiAlN)	SPV
30	100	0.15	1.5	0.8	0.912	-	CVD(TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
31	120	0.15	1.5	0.8	0.92	Šaltas oras	CVD(TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
32	160	0.15	1.5	0.8	0.965	Šaltas oras	CVD(TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
33	200	0.15	1.5	0.8	1.081	-	CVD(TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV

34	50	0.2	1	0.8	2.029	-	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
35	50	0.2	2	0.8	1.466	-	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
36	50	0.2	3	0.8	1.134	-	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
37	100	0.2	1	0.8	1.653	-	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
38	100	0.2	1.5	0.8	1.535	Šaltas oras	CVD(TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
39	100	0.2	2	0.8	1.321	-	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
40	100	0.2	3	0.8	1.221	-	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
41	120	0.2	1.5	0.8	1.618	Šaltas oras	CVD(TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
42	120	0.2	3.5	1.6	2.74	-	-	unive rsalio s
43	150	0.2	1	0.8	0.996	-	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
44	150	0.2	2	0.8	0.896	-	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
45	150	0.2	3	0.8	1.026	-	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
46	160	0.2	1.5	0.8	2.274	-	CVD(TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
47	200	0.2	1.5	0.8	1.681	Šaltas oras	CVD(TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
48	50	0.25	1.5	0.8	2.799	Emulsij a	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV

49	100	0.25	0.5	0.8	1.918	Emulsija	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
50	100	0.25	1.5	0.8	2.381	Šaltas oras	CVD(TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
51	120	0.25	1.5	0.8	2.669	-	CVD(TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
52	150	0.25	3.5	0.8	2.208	Emulsija	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
53	160	0.25	1.5	0.8	2.606	-	CVD(TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
54	200	0.25	1.5	0.8	2.759	Šaltas oras	CVD(TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
55	200	0.25	2.5	0.8	2.471	Emulsija	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
56	50	0.3	1	0.8	4.366	-	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
57	50	0.3	2	0.8	3.949	-	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
58	50	0.3	2	0.8	3.58	-	 CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
59	50	0.3	3	0.8	3.763	-	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
60	100	0.3	1	0.8	4.228	-	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
61	100	0.3	1.5	0.8	3.742	-	CVD(TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
62	100	0.3	2	0.8	2.52	Emulsija	CVD (TiN/TiCN/TiNB/ TiN/TiCN/TiCN)	SPV
63	100	0.3	2	0.8	3.45	-	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV

64	100	0.3	2	0.8	3.9	-	CVD (TiN/TiCN/TiNB/ TiN/TiCN/TiCN)	SPV
65	100	0.3	2	0.8	4.043	-	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
66	100	0.3	2	0.8	4.34	Emulsija	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
67	100	0.3	3	0.8	4.088	-	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
68	100	0.3	3	1.2	2.86	-	-	universals
69	100	0.3	3	2.4	2.91	-	-	universals
70	100	0.3	4	1.2	3.23	-	-	universals
71	100	0.3	4	2.4	2.86	-	-	universals
72	120	0.3	1.5	0.8	3.386	Šaltas oras	CVD(TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
73	140	0.3	3	1.2	2.17	-	-	universals
74	140	0.3	3	2.4	2.54	-	-	universals
75	140	0.3	4	1.2	2.51	-	-	universals
76	140	0.3	4	2.4	2.43	-	-	universals
77	150	0.3	1	0.8	3.809	-	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV

78	150	0.3	2	0.8	4.22	Emulsija	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
79	150	0.3	2	0.8	3.855	-	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
80	150	0.3	3	0.8	4.132	-	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
81	160	0.3	1.5	0.8	3.624	Šaltas oras	CVD(TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
82	200	0.3	1.5	0.8	3.648	-	CVD(TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
83	50	0.4	1	0.8	6.383	-	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
84	50	0.4	2	0.8	6.112	-	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
85	50	0.4	2.5	0.8	4.705	Emulsija	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
86	50	0.4	3	0.8	6.072	-	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
87	80	0.4	3.5	1.6	3.39	-	-	universalios
88	100	0.4	1	0.8	6.484	-	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
89	100	0.4	2.	0.8	6.444	-	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
90	100	0.4	3.	0.8	6.635	-	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
91	100	0.4	3.5	0.8	4.441	Emulsija	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
92	120	0.4	3.5	0.8	2.7	-	-	Universalios

93	120	0.4	2.5	1.6	2.31	-	-	unive rsalio s
94	120	0.4	3.5	1.6	2.45	-	-	unive rsalio s
95	120	0.4	3.5	1.6	2.47	-	-	unive rsalio s
96	120	0.4	3.5	1.6	2.52	-	-	unive rsalio s
97	120	0.4	3.5	1.6	2.53	-	-	unive rsalio s
98	120	0.4	3.5	2.8	2.72	-	-	unive rsalio s
99	120	0.4	4.5	1.6	2.74	-	-	unive rsalio s
10 0	150	0.4	0.5	0.8	4.371	Emulsij a	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
10 1	150	0.4	1	0.8	6.304	-	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
10 2	150.	0.4	2	0.8	6.495	-	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
10 3	150.	0.4	3	0.8	6.918	-	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
10 4	160.	0.4	3.5	1.6	1.88	-		
10 5	200	0.4	1.5	0.8	4.075	Emulsij a	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
10 6	100	0.5	3	1.2	3.01	-	-	unive rsalio s

107	100	0.5	3	2.4	3.01	-	-	Univ ersali os
108	100	0.5	4	1.2	3.34	-	-	unive rsalio s
109	100	0.5	4	2.4	2.97	-	-	unive rsalio s
110	140	0.5	3	1.2	2.01	-	-	unive rsalio s
111	140	0.5	3	2.4	2.31	-	-	unive rsalio s
112	140	0.5	4	1.2	2.29	-	-	unive rsalio s
113	140	0.5	4	2.4	2.21	-	-	unive rsalio s
114	50	0.55	3.5	0.8	6.277	Emulsij a	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O)	SPV
115	100	0.55	2.5	0.8	6.071	Emulsij a	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
116	150	0.55	1.5	0.8	5.902	Emulsij a	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
117	200	0.55	0.5	0.8	5.111	Emulsij a	CVD (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃)	SPV
118	120	0.6	3.5	1.6	2.69	-	-	unive rsalio s

2 priedas. 6 lentelė. Haas DS 30Y techniniai parametrai [30]

Pajėgumas:	Matavimo vienetai
Trijų kumštelių griebtuvo dydis	254 mm
Didžiausias detalės diametras	533 mm
Didžiausias apdirbamas diametras	349 mm
Didžiausias galimas detalės ilgis	826 mm
Griebtuvo kiaurymės diametras	76 mm
Atstumas tarp sūklių	826 mm
Eigos:	
X ašis	239 mm
Y ašis	± 51 mm
Z ašis	826 mm
Pastūmos	
Greitoji eiga X ašimi	12 m/min
Greitoji eiga Y ašimi	12 m/min
Greitoji eiga Z ašimi	24 m/min
Ašių varikliai	
Didžiausia X ašies trauka	18238 N
Didžiausia Y ašies trauka	10231 N
Didžiausia Z ašies trauka	22686 N
Suklys	
Suklio antgalis	A2-6
Pavaros sistema	Tiesioginio greičio diržinė pavara
Variklio galia	22.4 kW
Didžiausias sukimosi greitis	4500 aps/min
Didžiausias sukimosi momentas	373 Nm, prie 500 aps/min
Traukos vamzdžio angos diametras	76 mm
Suklio kiaurymė	88.9 mm
Pagrindinio suklio C ašis	
Didžiausias sukimosi greitis	60 aps/min
Didžiausia galia	3.7 kW
Pozicionavimo tikslumas	± 0.01°
Stabdžio diametras	353 mm
Stabdį laikantis sukimo momentas	339 Nm
Valdymo tipas	Interpoliuoto judėjimo ir padėties nustatymo
Antrasis suklys	

Trijų kumštelių griebtuvo diametras	210 mm
Sūklio antgalis	A2-5
Pavaros sistema	Tiesioginio greičio diržinė pavara
Didžiausia galia	11.2 kW
Didžiausias sukimosi greitis	4000 aps/min
Didžiausias sukimosi momentas	135.6 Nm prie 870 aps/min
Sūklio gerklė	50.8 mm x 49.5 (gylis) mm
Sūklio anga	26.2 mm x 203.2 (gylis) mm
Sūklio anga (be sumontuoto griebtuvo ir traukimo mechanizmo)	58.7 mm
Antrojo suklio c ašis	
Didžiausia galia	3.7 kW
Didžiausias sukimo greitis	60 aps/min
Pozicionavimas	$\pm 0.01^\circ$
Stabdžio diametras	216 mm
Stabdį laikantis sukimo momentas	190 Nm
Valdymo tipas	Interpoliuoto judėjimo ir padėties nustatymo
Antrojo suklio pozicionavimas kodu M119	
Pozicionavimas	$\pm 0.02^\circ$
Stabdžio diametras	216 mm
Valdymo tipas	Tik pozicionavimo
Įrankių bokštelis	
Įrankių kiekis	12 stotelių
Išorinio ir vidinio diametro įrankiai	Bet kokia kombinacija
Sūklio kiaurymės atstumas nuo įrankių bokštelio galo	102 mm
Aktyvūs įrankiai	
Didžiausias sukimosi greitis	4000 aps/min
Perdavos santykis	1:1
Laikikliai	BMT 65
Bendri	
Aušinimo skysčio talpa	208 l
Oro poreikis	
Oro poreikis	113 l/min, 6.9 bar slėgis.
Linijinė oro žarna	3/8 colių
Oro perdavimo jungtis	3/8 colių
Mažiausias oro padavimo slėgis	5.5 bar
Elektronikos specifikacija	

Suklio greitis	4500 aps/min
Pavaros sistema	Tiesioginio greičio diržinė pavara
Mažiausia kintamosios srovės įtampa (3 fazių)	220 V AC
Srovės stipris prie mažiausios įtampos	70 A
Didžiausia kintamosios srovės įtampa (3 fazių)	440 V AC
Srovės stipris prie didžiausios įtampos	35 A

3 priedas. refraktrometras



4 priedas. Tekinimo programos kodas

G99 G54 G40 G18

T202

M31

G0 Z0.5

X0.

M00

G0 Z10.

X35.

M01

T202

M8

M31

G50 S2000

G96 S160 M4

G0Z0.

G01 X-2. F0.3

Z5.

G0Z10.

G0 G53 X0.

M9

G04 P10.

M5

M01

T303

M8

M31

G50 S4500

G96 S150 M4

G0 Z2.

X29. G42

G01 Z-22. F0.05

X32.

G0 Z2.

X28.

G01 Z-22. F0.05

X32.

G0 X40. G40

M9

G0 G53 X0.

M5

M01

T1212

M8
M31
G50 S1000
G96 S80 M3
G0 Z-20.
X35.
G01 X2. F0.08
G0 X35.
M9
G0 G53 X0.
M5
M30