

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS
MEDŽIAGŲ INŽINERIJOS KATEDRA

Deividas Kazlauskas

**FREZŲ, PADENGTŲ TiCN, CrN IR DLC DANGOMIS,
PATVARUMO DILIMUI TYRIMAS**

Magistro darbas

Darbo vadovas Lekt. Gintaras Keturakis

KAUNAS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS
MEDŽIAGŲ INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU
Medžiagų inžinerijos katedros vedėja
Doc. dr. Vaida Jonaitienė

Deividas Kazlauskas

**FREZŲ, PADENGTŲ TiCN, CrN IR DLC DANGOMIS,
PATVARUMO DILIMUI TYRIMAS**

Medienos Inžinerijos studijų programos

Magistro baigiamasis darbas

Darbo vadovas
Lekt. Gintaras Keturakis
2015-05-28

Recenzentas
Doc. Dr. A. Baltrušaitis

Atliko
Deividas Kazlauskas
2015-05-28

KAUNAS, 2015



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

(Fakultetas)

Deividas Kazlauskas

(Studento vardas, pavardė)

Medienos Inžinerija (621J53001)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Pavadinimas“
AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

2015 _____ m. Gegužės mėn. _____ 27 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Deivido Kazlausko** baigiamasis projektas tema „Frezų, padengtų TiCN, CrN ir DLC dangomis, patvarumo dilimui tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Turinys

SANTRAUKA	9
SUMMARY	10
ĮVADAS.....	11
LITERATŪROS APŽVALGA	12
1.1. Mediena.....	12
1.1.1. Medžio kamieno sandara.....	12
1.1.2. Medienos makrostruktūra.....	13
1.1.3. Medienos mikrostruktūra	15
1.1.3.1. Ląstelės sienelės mikrostruktūra	16
1.1.3.2. Spygliuočių mikrostruktūra.....	18
1.1.3.3. Lapuočių mikrostruktūra	18
1.1.4. Medienos cheminės savybės	19
1.1.5. Medienos fizikinės savybės.....	21
1.1.6. Medienos mechaninės savybės.....	22
1.1.7. Medienos technologinės savybės	23
1.2. Medienos medžiagos	24
1.3. Mechanškai apdirbtų medienos ir jos medžiagų paviršių šiurkštumas	25
1.3.1. Paviršiaus šiurkštumo matavimo metodai.....	26
1.3.1.1. Paviršiaus šiurkštumo nustatymas vizualiai ir lytint.....	26
1.3.1.2. Šviesos atspindžių metodas	27
1.3.1.3. Pneumatinis paviršiaus šiurkštumo matavimo metodas.....	27
1.3.1.4. Kontaktinis – adatinis šiurkštumo matavimas.....	27
1.4. Frezavimo proceso technologinė paskirtis ir kinematika.....	28
1.4.1. Frezavimo būdų klasifikacija	30
1.5. Medienos pjovimo įrankių dilimo mechanizmas	30
1.5.1. Įrankio ašmenų paviršinių sluoksnių įtaka jo dilimui	34
1.5.2. Abrazyvinis dilimas.....	36
1.5.3. Triboelektrinis įrankių dilimas	37
1.5.4. Elektrocheminis dilimas.....	39
1.5.5. Medienos ekstraktinių medžiagų sukeliama korozija	40
1.5.6. Aukštatemperatūros korozijos	41
1.6. Medienos apdirbimo įrankių medžiagos ir jų savybės	42
1.6.1. Įrankiniai plienai	43
1.6.1.1. Šalto apdirbimo angliniai nelegiruoti plienai	43
1.6.1.2. Šalto apdirbimo angliniai legiruoti plienai.....	43
1.6.2. Greitapjoviai plienai	44
1.6.3. Kietlydiniai.....	44
1.6.4. Keramika	46

1.6.5. Ypač kietos nemetalinės įrankinės medžiagos	47
1.6.5.1. Deimantas.....	47
1.6.5.2. Boro nitridas	48
1.7. Įrankių patvarumo padidinimo būdai	49
1.7.1. Metalų terminis apdirbimas.....	49
1.7.2. Paviršinis plienų stiprinimas	49
1.7.3. Termocheminis apdirbimas	50
1.7.4. Difuzinis įsotinimas metalais	50
1.7.5. Termomechaninis apdirbimas	50
1.7.6. Plienų legiravimas ir cheminių elementų savybės	51
1.7.7. Įrankinių medžiagų kietinimas dengiant kietesnėmis dangomis.....	51
1.8. Dangų nusodinimo metodai	53
1.8.1. Cheminis (CVD) dangų nusodinimo iš garų fazės metodas	53
1.8.2. Plazminis - Cheminis (PA - CVD) dangų nusodinimo iš garų fazės metodas.....	53
1.8.3. Fizinis (PVD) dangų nusodinimo iš garų fazės metodas	54
2. METODINĖ DALIS	56
2.1. Darbo tikslas.....	56
2.2. Frezavimo įrankiai.....	56
2.3 Bandiniai	57
2.4. Frezavimo bandymai	57
2.5. Ašmenų mikrogeometrijos matavimai	58
2.6. Frezuotų paviršių kokybės matavimai.....	60
2.7. Pjovimo režimų skaičiavimai	61
2.8. Statistiniai skaičiavimai.....	61
3. REZULTATŲ APTARIMAS	63
3.1 Įvairių veiksnių įtaka frezų ašmenų dilimui.....	63
3.1.1 Dangos tipo įtaka frezų ašmenų dilimui.....	63
3.1.2 Pjovimo greičio įtaka frezų ašmenų dilimui	64
3.1.3 Pjovimo kelio įtaka frezų ašmenų dilimui.....	65
3.2 Įvairių veiksnių įtaka frezuotų paviršių kokybei.....	66
3.2.1 Frezų ašmenų mikrogeometrijos įtaka apdirbto paviršiaus kokybei.....	66
3.2.2 Pjovimo greičio įtaka frezuotų paviršių kokybei	68
3.2.3 Pjovimo kelio įtaka frezuotų paviršių kokybei	70
4. IŠVADOS.....	71
5. LITERATŪROS SĄRAŠAS:	72
6. PRIEDAI	75

Paveikslų sąrašas:

1 pav. Kamieno sandara [2].....	12
2 pav. Pagrindiniai kamieno pjūviai [2].....	13
3 pav. Rievių padėtis medžio kamiene [1].....	14
4 pav. Cukrinio klevo (<i>Acer saccharum</i>) daugiaeiliai ir vienaeiliai šerdies spinduliai [1, 2].....	14
5 pav. a – Pušies medienos skerspjūvyje matomas vertikalusis sakataakis (200x); b – Pušies medienos tangentineame pjūvyje matomas šerdies spindulys su horizontaliuoju sakatakiu; c - Vertikalusis sakataakis skersiniame pjūvyje ir daugiaeilis šerdies spindulys su horizontaliuoju sakatakiu tangentineame pjūvyje [1, 2].....	15
6 pav. Pušies kamieno spindulinis pjūvis ties luobo ir medienos riba [1, 2].....	16
7 pav. Laštelės sienelės skersinis pjūvis [1, 2].....	16
8 pav. Laštelės sienelės struktūrinė schema [1].....	17
9 pav. Mikrofibrilės sandara [1].....	17
10 pav. Porų tipai [2].....	18
11 pav. a - Korėjinės pušies (<i>Pinus koraiensis</i>) skersinis pjūvis; b – Spygliuočių medienos mikrostruktūros schema [2].....	18
12 pav. a – Geležinio beržo skersinis pjūvis; b – Lapuočių medienos mikrostruktūros schema [2].....	19
13 pav. Medienos cheminės savybės [3].....	20
14 pav. Celiuliozės molekulė [1, 2].....	20
16 pav. Medienos atsparumas ilgalaikėms apkrovoms [1].....	23
17 pav. Fotoelektrinis paviršiaus šiurkštumo matavimo metodas [17].....	27
18 pav. Pneumatinis paviršiaus šiurkštumo matavimo metodas [18].....	27
19 pav. Adatinis paviršiaus šiurkštumo matavimo metodas [19].....	28
20 pav. Išilginio medienos frezavimo schema [6].....	28
21 pav. Frezavimo procesas. a – kuomet įrankis sukasi prieš pastūmos kryptį; b – kuomet įrankio sukimosi kryptis sutampa su pastūmos kryptimi [20].....	29
22 pav. Jėgos veikiančios frezavimo metu [20].....	30
23 pav. Įrankio dilimo stadijos [23].....	31
24 pav. Apkrovos pasiskirstymo ašmenyse epiūros, esant pjovimo keliui [24].....	31
25 pav. Ašmenų sąveika su apdirbama medžiaga [22].....	32
26 pav. Ašmenų dilimo stadijos [22].....	33
27 pav. Ašmenų įtrūkimų tipai [22].....	33
28 pav. Paviršiniai sluoksniai įrankio ašmenyse [22].....	35
29 pav. Medienos ir pjoviklio dilimo produktų kontaktas su ašmenimis [25].....	35
30 pav. Įrankio pjaunančiosios briaunos ir mineralinių dalelių kontakto būdai [26].....	36
31 pav. Įrankių dilimas pagal priekinį ir užpakalinį paviršius, pjaunant tik ką nukirstą medieną izoliuotu ir neizoliuotu įrankiais [27].....	37
32 pav. Įrankių dilimas pagal priekinį ir u žpakalinį paviršius pjaunant orasausę medieną izoliuotu ir neizoliuotu įrankiais [27].....	37
33 pav. Tipinis HSS įrankių pjaunančiosios briaunos nusidėvėjimas pjaunant šlapią ir orasausę medieną izoliuotais ir neizoliuotais, veikiamaiais elektros krūvio pjovikliais [27].....	38
34 pav. Veiksniai įtakoiantys korozinio – mechaninio dilimo intensyvumą [25].....	39
35 pav. Korozija ir jos sukelti mikroplyšiai medienos apdirbimo įrankiuose [29].....	40
36 pav. Temperatūra, kurioje pjovimo zonoje medienoje mažėja pH lygis [29].....	41
37 pav. Įrankinių medžiagų klasifikacija [30].....	42
38 pav. Temperatūros įtaka įrankinių medžiagų kiečiui [30].....	42
39 pav. Įrankinių medžiagų patvarumas [39].....	42
40 pav. Įrankinių plienų klasifikacija [30].....	43

41 pav. Šaltojo apdirbimo plienų mikrostruktūra [33].....	43
42 pav. HS plienų mikrostruktūra [35].....	44
43 pav. Kietlydinių klasifikacija [30].....	44
44 pav. Kietlydiniai [30].....	45
45 pav. WC karbidų grūdelių dydžio įtaka kietlydinio struktūrai ir savybėms [30, 36].....	46
46 pav. Keraminių medžiagų klasifikacija [30].....	46
47 pav. Keramika [30].....	47
48 pav. Ypač kietų įrankinių medžiagų klasifikacija [30].....	47
49 pav. Deimanto kristalai [38].....	48
50 pav. Polikristalinio deimanto mikrostruktūra [30].....	48
51 pav. Skirtingų boro nitrido rūšių įrankių išdilimas apdirbant 100Cr6 metalą [30].....	49
52 pav. Dangų pavyzdžiai [23].....	52
53 pav. CVD dangų nusodinimo iš garų fazės metodo principinė shema [30].....	53
54 pav. PVD, PA – CVD , MT – CVD ir CVD dangų nusodinimo iš garų fazės metodų sugretinimas [30].....	54
55 pav. PA – CVD būdu, ant kietlydinio pagrindo, nusodintos dangos [30].....	54
56 pav. Fizinio dangos nusodinimo iš garų fazės metodas [30].....	55
57 pav. PVD būdu, ant kietlydinio pagrindo, nusodinta TiAlN danga [30].....	55
58 pav. Spiralinė, glotnaus apdirbimo freza su kotu.....	56
59 pav. Dangų mikrostruktūra [47].....	57
60 pav. CNC apdirbimo centras „Holzher Pro Master 7123K.....	57
61 pav. Bandinių frezavimo schema.....	58
62 pav. a – frezos ašmenų skersinis pjūvis; b – pjaunančiosios briaunos pločio matavimo schema; c – frezos įtvirtinimas ant mikroskopo.....	58
63 pav. Optinis tiesioginio stebėjimo metodas [5].....	59
64 pav. Pjaunančioji briauna ir jos matavimo pavyzdžiai.....	60
65 pav. Nufrezuoto paviršiaus šiurkštumo matavimas.....	60
66 pav. Ašmenų dangos įtaka frezų ašmenų patvarumui.....	63
67 pav. Pjovimo greičio v įtaka frezų ašmenų patvarumui, frezuojant.....	65
68 pav. Ašmenų dangos įtaka frezuotų paviršių šiurkštumui.....	68
69 pav. Pjovimo greičio v įtaka nufrezuoto paviršiaus šiurkštumui R_z , frezuojant: a – TiCN danga dengta freza; b – CrN danga dengta freza; c – DLC danga dengta freza; d – jokiais dangomis nepadengta freza.....	69

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Kai kurių medienos rūšių cheminė sudėtis (% nuo visos masės) [1].....	20
2 lentelė. Ašmenų nusiapvalinimo spindulio ρ įtaka paviršiaus šiurkštumui [6, 7].....	25
3 lentelė. Bangos ilgio priklausomybė nuo paviršiaus nelygumų [7].....	25
4 lentelė. Pastūmos vienam pjovikliui u_z įtaka nufrezuoto paviršiaus šiurkštumui [6, 7].....	26
5 lentelė. Dangų charakteristikos.....	52
6 lentelė. Frezų su kotu charakteristikos [1].....	56
7 lentelė. Dangų charakteristikos [2,3].....	56
8 lentelė. Fizikinės medienos savybės.....	57
9 lentelė. Frezavimo režimų charakteristikos.....	58
10 lentelė. Pjaunančiosios briaunos pločio b ir frezuoto paviršiaus šiurkštumo R_z matavimų intervalai.....	59

SANTRAUKA

Frezų pagamintų iš kietlydinio ir padengtų dilimui atspariomis dangomis, patvarumo dilimui bandymai buvo atlikti frezuojant ąžuolo medienos bandinius. Tyrimams buvo naudojamos trys frezų grupės, kurios buvo pagamintos iš kietlydinio, nepadengtos ir padengtos dilimui patvariomis dangomis.

Bandymai atlikti CNC frezavimo staklėmis. Patalpoje kur buvo atliekami tyrimai vidutinė patalpos temperatūra buvo $t = 18 \pm 2$ °C, o santykinis oro drėgnis $\phi = 60 \pm 5$ %. Bandymai atlikti su ąžuolo medienos bandiniais. Bandiniai buvo frezuojami išilgai pluošto krypties, kuomet pjovimo greičio V ir pastūmos u vektorių kryptys sutampa. Frezavimai atlikti trimis skirtingais pjovimo V ir pastūmos u greičiais, išlaikant nekintančią pastūmą vienam pjovikliui u_z . Pagrindine frezavimo įrankių dilimą vertinančia charakteristika, buvo pasirinktas ašmenų pjaunančiosios briaunos plotis b . Faktinės pjaunančiosios briaunos pločio b vertės nustatytos optiniu būdu, naudojant optinį mikroskopą su skaitmenine vaizdo kamera.

Taip pat buvo tiriama bandomomis frezomis nufrezuotų paviršių kokybė. Pagrindine nufrezuotų paviršių kokybės charakteristika buvo pasirinktas šiurkštumo parametras R_z . Faktinės paviršiaus šiurkštumo R_z vertės buvo nustatytos kontaktiniu būdu, naudojant kontaktinį - adatinį šiurkštumo matuoklį. Nustatyta, kad patvariausia dilimui yra freza padengta CrN danga. Frezos padengtos TiCN ir DLC dangomis buvo mažiau patvarios. Labiausiai dilo freza nepadengta jokiomis dangomis.

Frezų pjaunančiosios briaunos pločio b ir apdirbto paviršiaus šiurkštumo R_z vertės buvo nustatytos įvairiuose pjovimo kelio L intervaluose iki 26130 m pjovimo kelio L ribos. Kiekviename pjovimo kelio intervale ašmenų matavimai atlikti tris kartus. Matavimų tikslumo paklaida ± 2 μm . Paviršiaus šiurkštumo matavimai buvo atlikti penkis kartus, išilgai medienos pluošto. Iš gautų rezultatų išvestos vidutinės jų vertės.

Bandymų metu gauti visi rezultatai pateikti diagramose ir suvestinėse.

SUMMARY

The article presents the investigational results, which show resistance of solid tungsten carbide (WC) router cutters not coated and coated by coatings harder than tool material, to wear. The tests were done using the spiral router cutters of finish processing made from solid tungsten carbide which are not coated and which are coated by TiCN, CrN and DLC coatings. The tests were carried out using the oak wood samples, which were down milled in the CNC machining center by three different milling tests. The average temperature in the testing room was $t = 19 \pm 2^\circ\text{C}$, and relative air humidity was $\varphi = 60 \pm 5 \%$. The wear of the cutters was evaluated by measuring the helical cutting edge width b . The values of the cutting edge width b were measured optically, using the optical microscope with digital video camera. The received results revealed that the router cutters coated with CrN are the most resistant to wear. The router cutters coated by TiCN and DLC are less durable. The WC router cutters, which are not coated at all, are the least resistant to wear.

Also was evaluated a quality of cutting surfaces. Parameter of surface roughness R_z was the main characteristic of cutting surface quality. Actual value of surface roughness was measured by contact stylus profilometer.

The cutting edge width b and cutting surface roughness was measured in the set intervals of cutting path L . The measurements of cutting edge width in each interval of cutting path L were done in three places. Precision of measurement values was $\pm 2 \mu\text{m}$. The received images were processed and measured using the personal computer and software. The measurements of cutting edge width were done in five different places along the fiber. Results were deduced to average values. Gained results were used to make diagrams and consolidated returns.

ĮVADAS

Kietosios plėvelės pavidalo įrankinės dangos, pradėtos naudoti prieš trisdešimt metų, pirmiausiai metalo apdirbimo pramonėje. Dangos padidina paviršių kietį ir atsparumą abrazyviniam bei adheziniam dilimui, sumažina slydimo trinties jėgas tarp įrankio ir ašmenų paviršių bei drožlės, apsaugo kontaktinį paviršių nuo adhezijos, sumažina temperatūrą, kuri išsiskiria dėl trinties tarp drožlės ir įrankio ašmenų, padidina atsparumą korozijai ir oksidacijai, padidina atsparumą dilimui, kuris vyksta ištrupant paviršiaus sluoksniams ir susidarant krateriams, pagerina apdirbtų paviršių kokybę [30].

Šiuo metu apie 50% greitapjovių plienų, apie 85% kietlydinių ir apie 40% PCD, iš kurių pagaminti įrankių ašmenys, yra padengiami įvairiomis dangomis. Tačiau dangomis dengti medienos apdirbimo įrankiai yra mažai ištyrinėti ir apie jų patvarumą sprendžiama intuityviai, o ne stebėjimais pagrįstomis išvadomis [30].

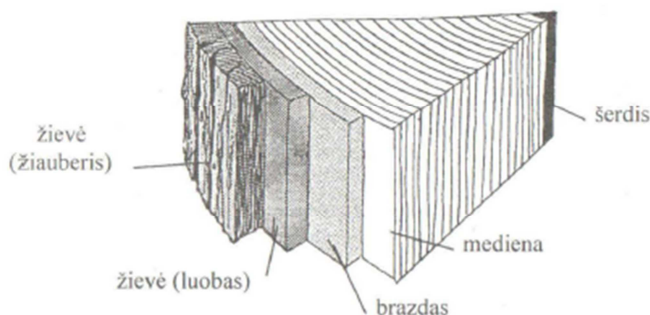
Šiame darbe aprašyto tyrimo tikslas – palyginti iš kietlydinio pagamintų kotinių frezų, nepadengtų jokia danga ir padengtų TiCN, CrN ir DLC dangomis patvarumą dilimui, frezuojant ąžuolo medieną [30].

LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Mediena

1.1.1. Medžio kamieno sandara

Skersiniame kamieno pjūvyje aiškiai matyti pagrindinės jo anatomicinės dalys: šerdis, mediena ir žievė. Tarp medienos ir žievės yra plonas, plika akimi neįžiūrimas brazdo sluoksis [1].



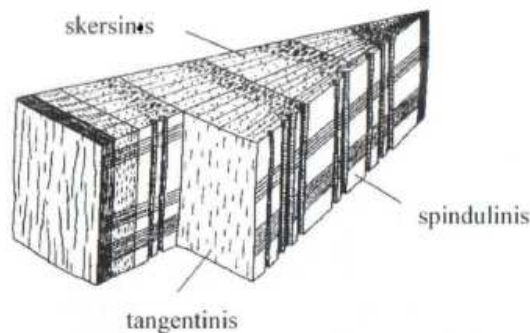
1 pav. Kamieno sandara [2]

Šerdis. Kamieno skerspjūvyje, maždaug viduryje yra šerdis. Jos skersmuo priklauso nuo medžio rūšies ir svyruoja nuo 2 iki 5 mm. Šerdį sudaro minkšti purūs audiniai (tankis $0.18 - 0.24 \text{ g/cm}^3$), todėl jos mechaninės savybės labai prastos. Dažnai šerdis būna medienos sortimentų skilimo priežastimi. Dažniausiai prie jos koncentruojasi medžio ydos – puviniai, plyšiai, šakutės. Todėl medienoje skirtoje svarbiems gaminiams, šerdies neturi būti [1].

Mediena. Kartu su šerdimi ji užima 90 – 95 % suaugusio medžio skerspjūvio ploto ir 80 – 90 % stiebo apimtį. Mediena kaip gamybinė žaliava gali būti gaunama iš medžio viršūnės, šakų ir šaknų. Tačiau didžioji gamyboje naudojamos medienos dalis gaunama iš medžio stiebo [1].

Žievė. Suaugusio medžio žievę sudaro du sluoksniai: išorinis, vadinamas žiauberiu ir vidinis vadinamas luobu arba karniena. Žiauberio paskirtis saugoti gyvuosius medžio audinius nuo temperatūros svyravimų, grybų, bakterijų, mechaninių pažeidimų ir neleisti išgaruoti drėgmei. Karniena žemyn į šaknis praleidžia lapuose susidariusias organines medžiagas ir kaupia maisto medžiagų atsargas. Priklausomai nuo medžio rūšies, amžiaus ir augimo sąlygų žievė gali sudaryti nuo 10 iki 20 % stiebo tūrio. Žievė dažniausiai sudaro gamybines atliekas nors yra tinkama gaminti termoizoliacines plokštes ir trąšas [1].

Pagrindiniai kamieno pjūviai. Medienos sandarai nustatyti, mediena paprastai pjaustoma skersine ir išilgine kryptimis. Skersiniu vadinamas pjūvis statmenas medienos pluošto kryptčiai. Išilginiu vadinamas pjūvis sutampantis su medienos pluošto kryptimi. Skiriami du išilginiai pjūviai: spindulinis ir tangentinis. Spinduliniu laikomas išilginis per šerdį einantis ir statmenas rievės liestinei, jos lietimosi taške, pjūvis. Tangentiniu laikomas išilginis, bet kuriuo atstumu nuo šerdies einantis pjūvis, sutampantis su kurios nors rievės liestine. Skersiniame pjūvyje galima nurodyti spindulinę ir tangentinę kryptis, o išilginiuose kryptį išilgai pluošto ir tangentinę ar spindulinę kryptį [1].



2 pav. Pagrindiniai kamieno pjūviai [2]

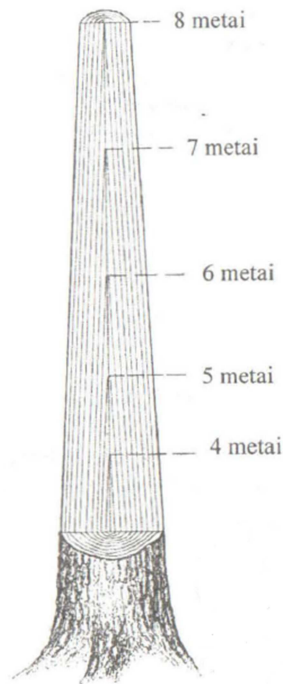
1.1.2. Medienos makrostruktūra

Balana, branduolys ir brandžioji mediena. Kai kurių rūšių medžių skersiniame ir išilginiame pjūviuose matyti, kad vidurinė dalis yra tamsesnė ir sausesnė už periferinę. Ši dalis yra vadinam branduoliu, o šviesesnė – balana. Augančio medžio balana yra gyva, o branduolys apmiręs ir fiziologiniuose procesuose nedalyvauja. Medžiui esant jaunam visa jo mediena yra sudaryta iš balanos. Ilgainiui vidurinėje kamieno dalyje esantys gyvi medienos elementai apmiršta, vandenį praleidžiantys kanalai užsikemša, ląstelių sienelėse ir ertmėse susikaupia ekstraktinės medžiagos. Taip susidaro branduolys. Branduolio ir balanos fizikinės, cheminės ir mechaninės savybės labai skiriasi [1].

Kai kurių rūšių medžių, vidurinės kamieno dalies drėgnis yra mažesnis, tačiau spalva nesiskiria nuo periferinės dalies. Tokia mediena vadinama ne branduoliu o brandžiąja mediena. Branduolį turinčios medžių rūšys vadinamos branduolinėmis. Turinčios brandžią medieną – brandžiarūšėmis. Jei periferinė ir centrinė kamieno dalys nesiskiria nei spalva nei drėgniu, tokios medienos rūšys vadinamos balaninėmis [1].

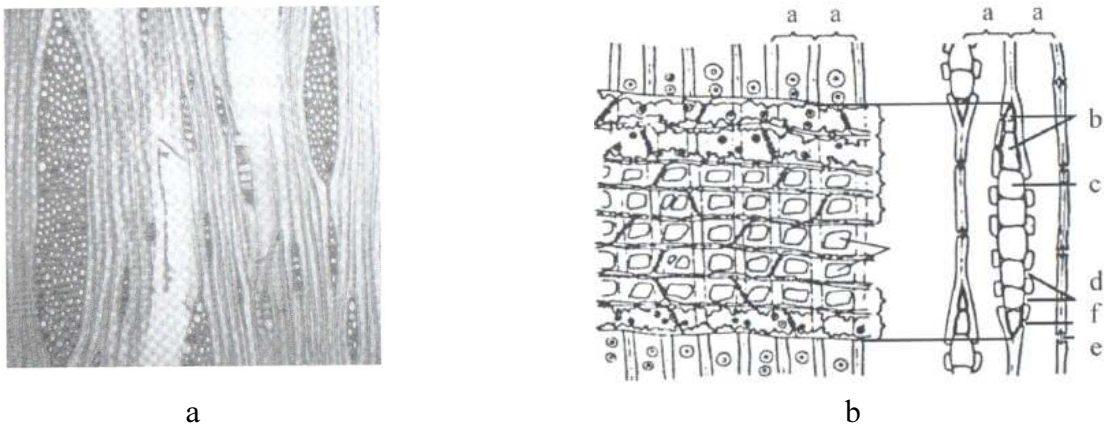
Rievės. Skersiniame kamieno pjūvyje rievės atrodo kaip koncentriški žiedai. Kiekviena rievė susidaro per vienerius metus. Todėl jos vadinamos metinėmis rievėmis. Kiekviena rievė susideda iš dviejų dalių: vidinės dalies esančios šerdies pusėje, minkštesnės medienos, kartais šviesesnės spalvos, vadinamos ankstyvąja mediena ir išorinės dalies, esančios arčiau žievės, kartais tamsesnės ir kietesnės vadinamos vėlyvąja mediena. Ankstyvoji mediena susidaro pavasarį, o vėlyvoji mediena vasaros gale. Ankstyvąją medieną sudaro plonasieniai ir plačiaertmiai elementai, vėlyvąją – storasieniai. Augančio medžio rievė ankstyvąja mediena iš šaknų į viršų teka vanduo. Vėlyvoji mediena atlieka mechanines funkcijas. Ankstyvosios ir vėlyvosios medienos santykis labai svyruoja ir priklauso nuo medžio rūšies, amžiaus, augimo sąlygų ir klimato.

Nekreipiant dėmesio į šakas, galima įsivaizduoti, kad medžio stiebą sudaro tuščiaviduriai rievėių kūgiai sumauti vienas į kitą [1].



3 pav. Rievių padėtis medžio kamiene [1]

Šerdies spinduliai. Kai kurių rūšių medžių skersiniame pjūvyje plika akimi galima įžiūrėti šviesias, dažniausiai blizgančias, linijas, einančias nuo šerdies žievės link. Šios linijos vadinamos šerdies spinduliais. Augančiame medyje šerdies spinduliais horizontalia kryptimi teka vanduo ir maistingosios medžiagos, kurios čia kaupiamos žiemai. Šerdies spindulius turi tiek spygliuočių tiek lapuočių mediena. Skirtinguose pjūviuose šerdies spinduliai matomi skirtingai, kaip plonos, tiesios ir ištisos ar plačios, vingiuotos ir sutrūkinėjusios linijos. Šerdies spindulių matmenys ir skaičius priklauso nuo medienos rūšies ir jos augimo sąlygų [1, 2].

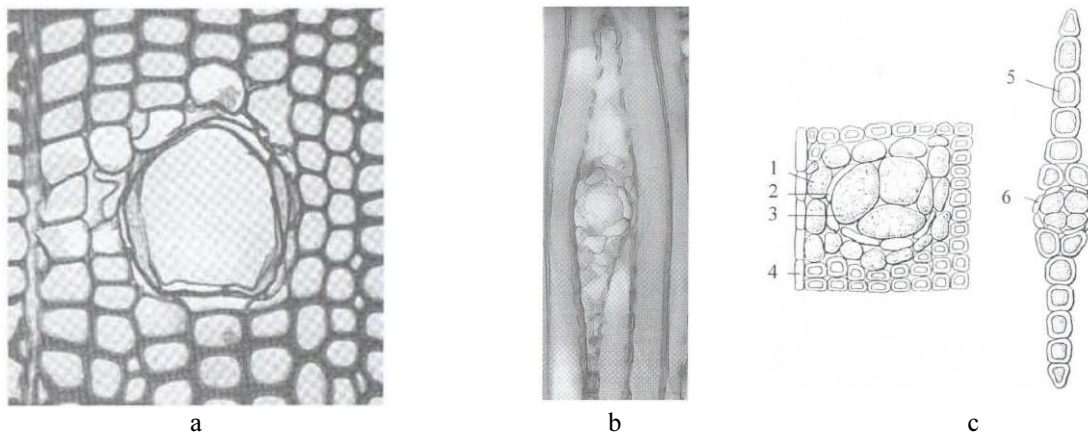


4 pav. a - Cukrinio klevo (*Acer saccharum*) daugiaeiliai ir vienaeiliai šerdies spinduliai (100x) b – Vienaeilio šerdies spindulio pjūviai (kairėje - spindulinis, dešinėje - tangentinis): a - tracheidės; b - horizontaliosios (spindulinės) tracheidės ; c - parenchiminės ląstelės ; d - paprastosios poros (tarp parenchiminės ląstelės ir tracheidės); e - vertikaliosios tracheidės apvaduotoji pora; f - apvaduotoji pora tarp horizontaliosios (spindulinės) ir vertikaliosios tracheidės [1, 2]

Indai. Indus turi tik lapuočiai medžiai. Tai įvairaus dydžio vamzdelio formos audiniai, smulkių skylių pavidalu, aiškiai matomi kai kurių lapuočių skersiniame pjūvyje. Ankstyvji mediena yra sudaryta iš stambių indų. Smulkūs indai būna susikaupę vėlyvojoje medienoje. Pagal indų išsidėstymą lapuočiai medžiai skirstomi į žiedaindžius ir padrikai akytuosius [1].

Sakatakliai. Sakatakliai arba sakų kanalai yra būdingi tik spygliuočių medžių medienai. Skersiniame pjūvyje, vėlyvojoje rievėje jie matomi balkšvų taškelių pavidale. Jie

skirstomi į vertikalius ir horizontalius ir yra tarpusavyje susijungę. Sakatakius sudarančiose ląstelėse pasigamina spygliuočiams būdinga derva – sakai. Dėl mažo tūrio sakatačiai medienos mechaninėms savybėms įtakos neturi, tačiau juose esantys sakai padidina medienos atsparumą puvimui bei kaloringumą ir sumažina vandens įgėrimą [1, 2].



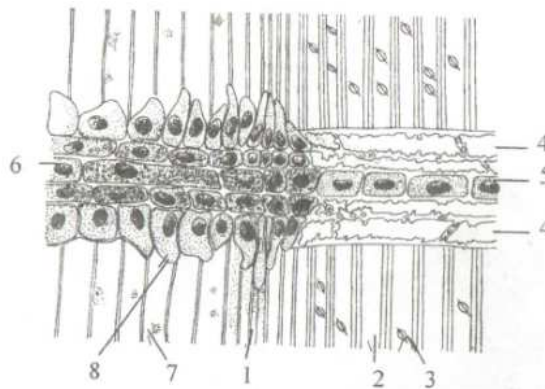
5 pav. a – Pušies medienos skerspjūvyje matomas vertikalusis sakataakis (200x); b – Pušies medienos tangentiame pjūvyje matomas šerdies spindulys su horizontaliuoju sakatakiu (400x); c - Vertikalusis sakataakis skersiniame pjūvyje (kairėje) ir daugiaeilis šerdies spindulys su horizontaliuoju sakatakiu tangentiame pjūvyje (dešinėje): 1 - lydinčioji parenchima; 2 - apmirusioji ląstelė ; 3 epitelinė ląstelė ; 4 - šerdies spindulys; 5 - daugiaeilis šerdies spindulys; 6 - horizontalusis sakataakis [1, 2]

1.1.3. Medienos mikrostruktūra

Medieną sudaro standus, vientisas karkasas sudarytas iš tvirtai tarpusavyje susijungusių tuščiavidurių ląstelių. Ląstelių ertmės gali būti užpildytos oru ar vandeniu. Pagal savo formą ląstelės yra kapiliarai [1].

Medienos ląstelė. Gyva ląstelė susideda iš sienelių ir vidaus turinio, kurį sudaro protoplastas su daug negyvų intarpų. Protoplastas susideda iš citoplazmos ir branduolio. Ląstelės sienelė yra protoplasto veiklos produktas ir gyvybinės funkcijos neatlieka. Kadangi medieną sudaro ląstelių sienelių visuma, toliau nagrinėsiu tik ląstelės sienelę [1].

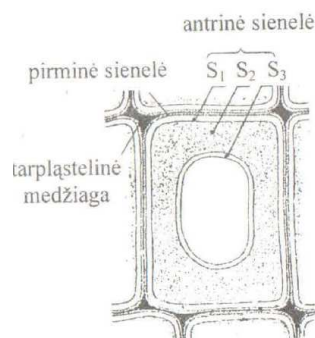
Medienos audiniai. Vienodos sandaros ląstelės, atliekančios tas pačias funkcijas, sudaro audinius. Augančiame medyje galima rasti dengiamuosius, meristeminius, ramstinius, apytakos, kaupiamuosius ir asimiliacinius audinius [2]. Medienos susidarymas. Brazdą sudaro gyvos ląstelės inicialės. Aktyvumo periode, brazdo inicialės išsitempia kamieno spindulio kryptimi ir dalijasi tangentine pertvarėle pusiau. Viena iš naujai susidariusių ląstelių tampa brazdo, o kita dar po vieno ar dviejų dalijimųsi tampa arba medienos arba žievės luobo ląstele. Į medienos pusę brazdas atideda ląstelių 4 – 5 kartus daugiau negu į žievės pusę. Medžiui storėjant brazdo inicialės dalijasi ir išilginėmis ar įstrižomis pertvarėlėmis pusiau. Taip atsiranda trumpos naujos brazdo ląstelės, pleištiškai išsiskverbusios tarp senųjų brazdo ląstelių. Naujos medienos ląstelės sienelės lignifikuojasi ir sumedėja, o žievės ląstelės dėl suberino poveikio sukamšėja [1, 2].



6 pav. Pušies kamieno spindulinis pjūvis ties luobo (kairėje) ir medienos (dešinėje) riba: 1 - brazdas; 2 - tracheidė; 3 - apvaduotoji pora; 4 - horizontalioji tracheidė; 5 – šerdies spindulio parenchiminė ląstelė; 6 - luobo spindulio gulinčioji parenchiminė ląstelė; 7 - rėtinis indas; 8 - luobo spindulio stovinčioji parenchiminė ląstelė [1, 2]

1.1.3.1. Ląstelės sienelės mikrostruktūra

Medienos ląstelės sienelė yra dalijama į pirminę ir antrinę. Augančio medžio ląstelės pirminė sienelė yra 0.1 – 0.5 μm storio. Antrinė sienelė apie 10 kartų storesnė ir susideda iš trijų sluoksnių: išorinio (S_1), vidurinio (S_2), ir vidinio (S_3). Šių sluoksnių storiai skirtingi [1, 2].

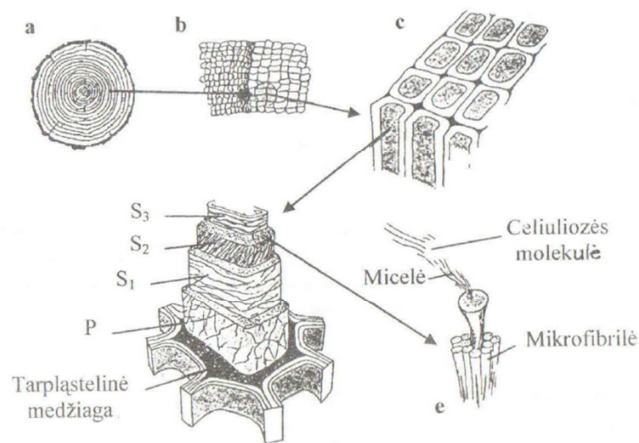


7 pav. Ląstelės sienelės skersinis pjūvis; S_1 – antrinės sienelės išorinis sluoksnelis; S_2 - antrinės sienelės vidurinis sluoksnelis; S_3 - antrinės sienelės vidinis sluoksnelis [1, 2]

Dvi pirminės sienelės, priklausančios gretimoms ląstelėms, yra tarpusavy sujungtos tarpląsteline medžiaga. Tarpląstelinė medžiaga daugiausiai sudaryta iš lignino, taip pat čia yra hemiceliuliozės ir pektinų. Tarpląstelinė medžiaga yra amorfinė izotropinė ir gana porėta. Jos porėtumą nulemia kapiliarai, kurie augančiame medyje yra pilni laisvosios drėgmės [1, 2].

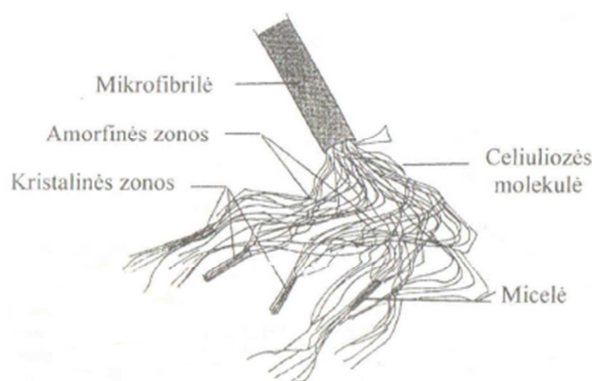
Ląstelės sienelės sluoksnių mikrofibrilinė sandara. Ląstelės sienelės griaučius sudaro celiuliozė. Hemiceliuliozė ligninas ir pektinai sudaro minkštą plastinę masę (amorfinį matriksą), užpildančią tarpelius tarp celiuliozės mikrofibrilių. Gyvoje ląstelėje dalį tų tarpelių užpildo vanduo. Paprasčiausias medienos ląstelės sienelės struktūrinis vienetas yra mikrofibrilė. Mikrofibrilės jungiasi į plokščias juostas vadinamas lamelėmis. Lamelę dažniausiai sudaro vienas mikrofibrilių sluoksnis. Mikrofibrilės lamelėje būna šie tiek susisukusios.

Ląstelės sienelės dalis – pirminę ir antrinę sienelę bei antrinės sienelės S_1 , S_2 ir S_3 sluoksnius galima atskirti dėl to, kad kiekviename iš šių sluoksnių mikrofibrilės ar jų lamelės yra išsidėsčiusios sraigtiškai, bet vis kitu kampu [1, 2].



8 pav. Ląstelės sienelės struktūrinė schema; a – kamieno skersinis pjūvis; b – apie 50 kartų padidintas metinės rievės struktūros fragmentas; c – apie 250 kartų padidintas metinės rievės fragmentas; d – apie 400 kartų padidintas ląstelės sienelės aksonometrinis vaizdas; e – mikrofibrilės sandaros schema; P – pirminė sienelė S₁ – antrinės sienelės išorinis sluoksnelis; S₂ - antrinės sienelės vidurinis sluoksnelis; S₃ - antrinės sienelės vidinis sluoksnelis [1]

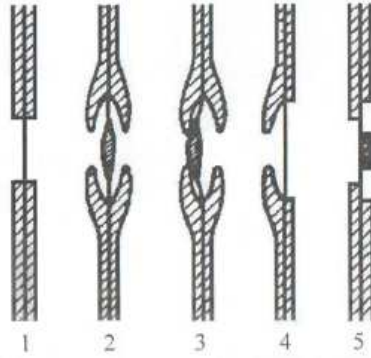
Mikrofibrilės sandara. Mikrofibrilę sudarančių molekulių būklė gali būti dvejopa. Vienose vietose molekulės susiklosto tvarkingomis eilėmis, atstumai tarp jų labai maži, todėl jas tvirtai sieja tarp molekulinės jėgos ir molekulių pluoštas tose vietose yra panašus į kristalinį kūną, vadinamą micelė arba kristalitu. Kitose mikrofibrilės zonose tos pačios molekulės būna išsidėsčiusios netvarkingai, nuotoliai tarp jų yra dideli, kai kurios molekulės atsiskiria nuo vienos micelės ir pereina į kitą. Tokios zonos mikrofibrilėje yra vadinamos amorfinėmis. Apie 70 – 80 % mikrofibrilių tūrio sudaro tvarkingos kristalinės sritys ir apie 20 – 30 % - amorfinės zonos [1, 2].



9 pav. Mikrofibrilės sandara [1]

Ląstelės sienelės kapiliarai. Tarp lamelų sudarančių celiuliozės mikrofibrilių, kaip ir tarp ląstelės sienelės sluoksnių sudarančių lamelių sluoksnelių, lieka tarpelių, kurie gyvoje ląstelėje būna pripildyti vandens. Tas vanduo tai pluoštą sotinanti drėgmė atsiranda biosintezės proceso metu jungiantis gliukozės molekulėms. Dauguma šių tarpelių tarpusavyje susisiekia ir sudaro vandens pripildytą mikrokapiliarų sistemą turinčią išėjimą į ląstelės sienelės paviršių. Mikrokapiliarai ląstelės sienelėje yra orientuoti ta pačia kryptimi kaip ir mikrofibrilės. Medienai džiūstant mikrokapiliarai ne tuštėja, o susiglaudžia. Visai sausoje medienoje šie mikrokapiliarai beveik visai išnyksta [1, 2].

Poros. Storėjant ląstelės sieniei, nauji sluoksniai susiklosto ne ištisai, o palieka sienelėje angas, kurios vadinamos poromis. Pora – tai anga, jungianti dvi gretimas ląsteles. Angoje yra pertvara vadinama membrana. Per poras maistingųjų medžiagų tirpalai pereina iš vienos ląstelės į kitą. Skirtingų ląstelių poros būna skirtingo dydžio ir formos. Jos skirstomos į paprastąsias, apvaduotąsias ir pusiau apvaduotąsias [1, 2].



10 pav. Porų tipai: 1 - paprastoji; 2 - apvaduotoji ; 3 - uždara apvaduotoji; 4 pusiau apvaduotoji; 5 - sudurtinė (prieš vienos ląstelės s porą yra keletas kitos ląstelės mažą porų) [2]

1.1.3.2. Spygliuočių mikrostruktūra

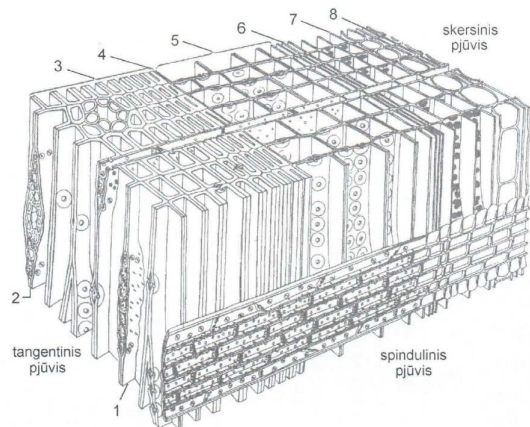
Spygliuočių mediena pasižymi savo struktūros paprastumu ir taisyklingumu. Ji sudaryta iš vienodų eilėmis išsidėsčiusių negyvų ląstelių, vadinamų *tracheidėmis* ir kaupiančiųjų parenchiminių ląstelių. Tracheidės užima daugiau kaip 90% medienos tūrio. Jos priklauso prozenchiminių ląstelių grupei, yra ilgos, plaušelių formos su sumedėjusiomis storomis sienelėmis. Skerspjūvyje tracheidės yra stačiakampio formos, tvarkingai išsidėsčiusios spindulinėmis eilėmis (35 pav.). Tracheidės būna dviejų tipų: ankstyvosios ir vėlyvosios.

Ankstyvosios tracheidės atlieka apytakos audinio, o vėlyvosios – mechaninio audinio funkcijas. Tracheidžių sienelėse yra daug apvaduotų porų. Likusią medienos dalį sudaro šerdiniai spinduliai ir sakatačiai.

Spygliuočių medienos šerdies spinduliai labai ploni, daugiausia vienaeiliai [1].



a

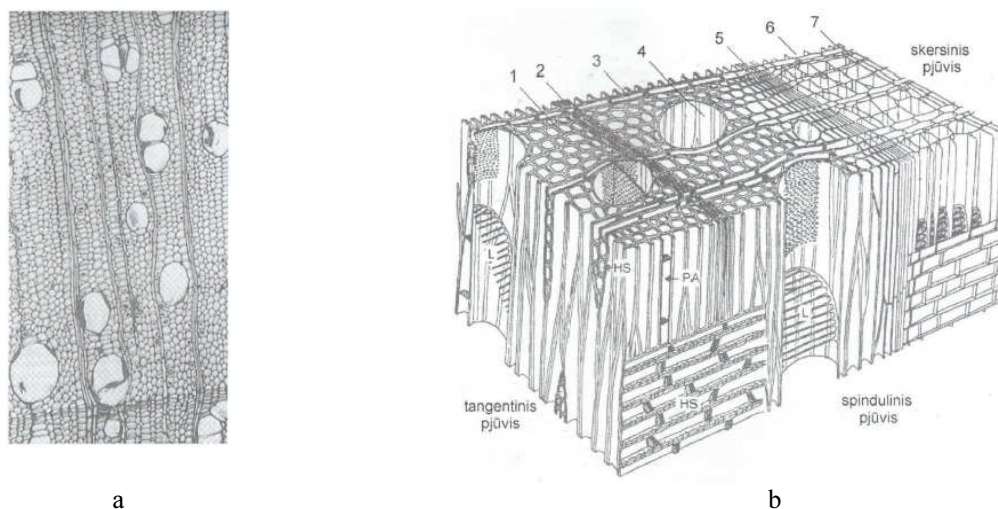


b

11 pav. a - Korėjinės pušies (*Pinus koraiensis*) (160x) (dešinėje) skersinis pjūvis; b – Spygliuočių medienos mikrostruktūros schema: 1 – šerdies spindulys; 2 – šerdies spindulys su horizontaliuoju sakatakiu; 3 – vėlyvoji mediena (vėlyvosios tracheidės su vertikaliuoju sakatakiu; 4 – metinės rievės riba; 5 – ankstyvoji mediena (ankstyvosios tracheidės); 6 – brazdo ląstelės; 7 – aktyviosios rėtinės ląstelės; 8 – suirusios rėtinės ląstelės [2]

1.1.3.3. Lapuočių mikrostruktūra

Lapuočių mediena (34 pav.) sudaryta iš daugelio įvairių elementų. Pagrindiniai iš jų yra: apytakos elementai – indai ir tracheidės, libriformas bei parenchima [1].



12 pav. a – Geležinio beržo skersinis pjūvis (100); b – Lapuočių medienos mikrostruktūros schema: 1 – libriforminis plaušas; 2 – metinės rievės riba; 3 – šerdies spindulys; 4 – indas; 5 – brazdo ląstelės; 6 – aktyviosios rėtinės ląstelės; 7 – suirusios rėtinės ląstelės; HS – šerdies spindulys; PA – parenchiminė ląstelė; L – laiptuotoji perforacija [2]

Indai yra tipiški lapuočių medienos vandens apytakos elementai. Tai plonasieniai vamzdeliai, susidedantys iš vertikalių trumpų ląstelių vadinamų nareliais. Susisiekimui su kitais šalia esančiais elementais indų sienelėse gausu įvairios formos porų. Pagrindine sudėtine lapuočių medienos dalimi yra libriformas.

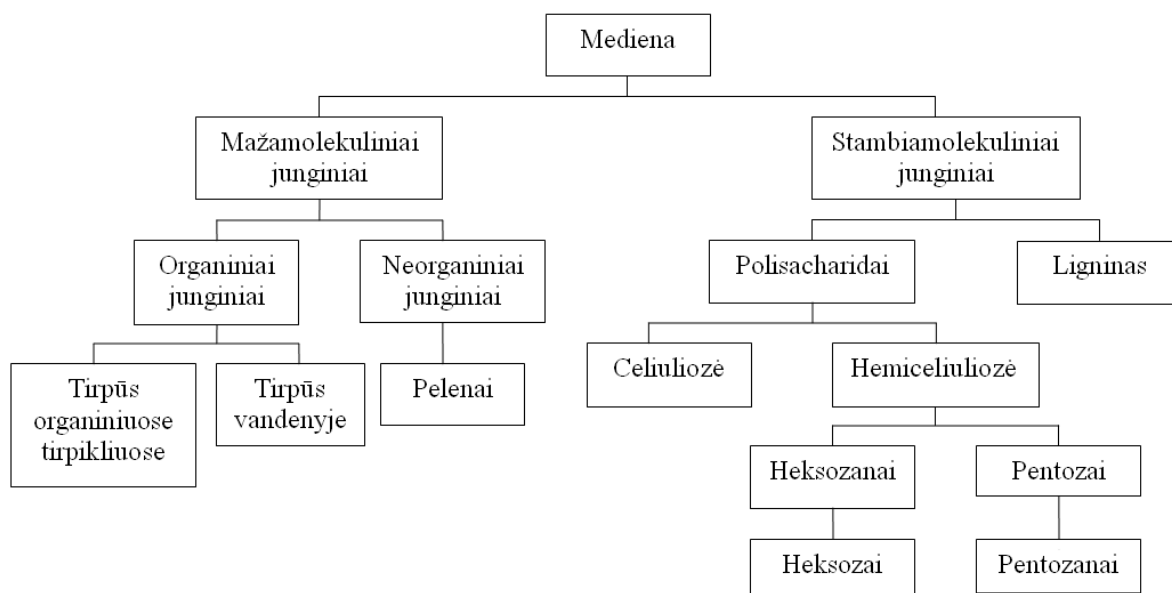
Libriformas sudarytas iš storasienių prozenchiminių ląstelių. Likusį medienos tūrį užima medienos parenchima, skirta maisto medžiagoms sandėliuoti. Parenchimos ląstelės sudaro vertikales eilutes, pluošteliu.

Lapuočių šerdiniai spinduliai yra geriau išsivystę. Jie gali būti siauri vienaeiliai, susidarę iš vienos eilės išsitiesusių pagal spindulį ląstelių, ir platūs daugiaeiliai, susidarę iš keleto ląstelių eilių. Jie sudaryti iš parenchiminių ląstelių su plonomis sumedėjusiomis sienelėmis, turinčiomis daug porų. Jų gausu tose vietose, kur šerdies spinduliai liečia indus ar tracheides [1].

1.1.4. Medienos cheminės savybės

Medienos cheminė sudėtis. Visiškai sausos medienos 99% masės sudaro organinės medžiagos. Likusią medienos masės dalį sudaro neorganinės medžiagos, kurios gali būti išgryninamos sudeginus medieną. Tai pelenai. Jų kiekis priklauso nuo medžio rūšies, amžiaus, augimo sąlygų ir bandinio vietos medyje.

Visiškai sausoje medienos organinėje masėje, nepriklausomai nuo medžio rūšies yra 49 – 50 % anglies, 43 – 44 % deguonies, apytiksliai 6 % vandenilio ir 0.1 – 0.3 % azoto. Iš anglies, vandenilio ir deguonies susidaro sudėtingos organinės medžiagos – celiuliozė, ligninas, hemiceliuliozė ir ekstraktinės medžiagos. Hemiceliuliozė sudaro heksozanai ir pentozanai [1].



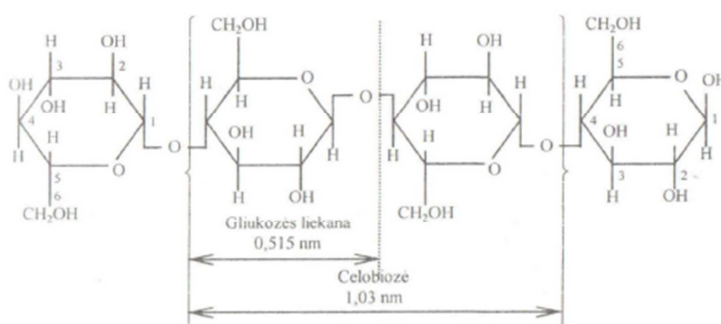
13 pav. Medienos cheminės savybės [3]

1 Lentelė

Kai kurių medienos rūšių cheminė sudėtis (% nuo visos masės) [1]

Rūšis	Celiuliozė	Ligninas	Pentozanai	Heksozanai	Pelenai	Ekstraktinės medžiagos tirpstančios	
						eteryje	vandenyje
Eglė	45,2	29,0	9,3	9,2	0,3	1,5	1,4
Pušis	51,9	20,5	11,2	9,3	0,2	2,6	0,6
Ažuolas	38,9	23,8	22,8	6,3	0,3	4,3	1,8
Beržas	34,1	21,2	22,0	20,0	0,4	1,3	-
Drebulė	52,4	20,3	22,6	0,5	0,2	1,6	2,2
Klevas	41,5	23,1	25,6	7,7	0,3	0,3	0,5
Tuopa	39,8	18,8	23,5	8,3	0,3	6,8	2,1

Celiuliozė. Celiuliozė tai linijinis polimeras polisacharidas, kurio formulė yra $(C_6H_{10}O_5)_n$. Celiuliozės molekulė yra grandinės susidedančios iš daugybės grandžių – gliukozės likučių, pavidalo [1, 2].



14 pav. Celiuliozės molekulė [1, 2]

Celiuliozės molekulė nėra plokščia, grandies atomai vienas kito atžvilgiu būna įvairiose padėtyse ir sudaro įvairius erdvinius pavidalus. Celiuliozės molekulės pavidalams didelę įtaką turi silpni tarpmolekuliniai vandeniliniai ryšiai, kurie atsiranda tarp hidroksilinių grupių ir deguonies jungiančio elementariąsias grandis. Stambesni celiuliozės dariniai yra elementariosios fibrilės, mikrofibrilės ir makrofibrilės. Celiuliozė yra atspari medžiaga netirpstanti vandenyje ir kituose organiniuose tirpikliuose [1, 2].

Hemiceliuliozės. Tai grupė polisacharidų, kurie labiau nei celiuliozė geba hidrolizuotis rūgštyse ir tirpti šarmuose. Į šią grupę įeina heksozanai ir pentozanai. Heksozanus sudaro galaktanai ir mananai, o pentozanus sudaro ksilanai ir arabanai. Pentozanus hidrolizuojant galima gauti pentozus, o iš heksozanų – heksozus. Pentozai – tai cukrūs, kurie negali rūgti. Iš jų gaminamas furfurolas. Heksozai – tai cukrūs galintys rūgti. Iš jų gaminamas spiritas [1].

Ligninas. Ligninas gautas iš įvairių augalų ir skirtingų tų pačių augalų dalių, yra skirtingas. Lignino sandara labai sudėtinga, jam priskiriama daugybė įvairių empirinių ir struktūrinių jo formulų. Pagal cheminių elementų sudėtį ligninas nuo celiuliozės skiriasi didesniu anglies ir mažesniu deguonies kiekiu. Ligninas yra amorfinis, geltonos ar rudos spalvos, mažiau atsparus už celiuliozę ir lengviau pereina į tirpalą [1].

Lignoceliuliozė ir holoceliuliozė. Visi medienoje esantys polisacharidai (celiuliozės ir hemiceliuliozės) vadinami holoceliulioze. Lignino ir visų polisacharidų kompleksas medienoje vadinamas lignoceliulioze [1].

Pektinai. Pektinai tai polisacharidų junginiai su pektininėmis rūgštimis. Jie palaiko ląstelių sienelių įtemptą būseną, didina jų patvarumą. Nuo vandens brinksta [1].

Ekstraktinės medžiagos. Ekstraktinės medžiagos – tai rauginės, dažančiosios medžiagos ir kamedė. Rauginės medžiagos dėl geležies druskų poveikio yra tamsiai mėlynos arba žalios spalvos. Jose gausu tanidų.

Kamedė – tai dervos pavidalo vandmenyje tirpios medžiagos, medyje susidaranti dėl patologinių procesų. Iš augalų jos išsiskiria skaidrios, tirštos, ore greitai kietėjančios masės pavidalu. Kamedė naudojami klėjams, degtukų, tekstilės pramonėje ir medicinoje.

Naudojant organinius tirpiklius iš medienos gali būti išskirtos dervinės ir riebalinės rūgštys, vašakai, stearinai. Išskiriamų produktų kiekis priklauso nuo medžio rūšies, tirpiklių ir ekstrahavimo sąlygų. Didinę ūkinę reikšmę turi iš spygliuočių gaunami sakai [1].

1.1.5. Medienos fizikinės savybės

Medienos fizikinės savybės tai tokios savybės, kurios gali būti tiriamos nesukeliant medienos cheminės sudėties pokyčių ir nepažeidžiant bandinio vientisumo. Prie jų priskiriamos medienos drėgnis ir drėgnio įtaka medienai, spalva, tankis, akustinės ir elektrinės savybės, dujų ir vandens laidumas [1].

Medienos ir drėgmės sąveika. Vanduo su celiuliozės molekulėmis sąveikauja per hidroksilines grupes. Kiekvienoje celiuliozės molekulės elementariojoje grandyje yra trys hidroksilinės grupės. Šių grupių buvimas lemia labai didelį celiuliozės hidrofiliškumą. Medienai džiūstant, vandens molekulių sąveika su celiulioze nutrūksta, vanduo išgaruoja, o tarp gretimų celiuliozės molekulių hidroksilinių grupių atsiranda vandeniliniai ryšiai, kurių energija yra 5 kartus didesnė. Celiuliozės molekulės labiau susiglaudžia, ląstelės sienelės matmenys sumažėja, prasideda medienos sortimento matmenų mažėjimas dėl nuodžiūvio. Medienai pakartotinai drėkstant, vandeniliniai ryšiai tarp celiuliozės hidroksilinių grupių nutrūksta, vietoje jų susidaro hidroksilinių grupių ryšiai su vandeniu, kurie yra 5 kartus silpnesni, todėl naujoms vandens molekulėms pavyksta įsiskverbti į anksčiau ląstelės sienelėje buvusius kapiliarus ir mediena pradeda brinkti.

Medienos brinkimą dėl vandens sorbcijos lemia ne tik celiuliozės hidrofiliškumas, bet ir labai didelis medienos porėtos struktūros išorinių ir vidinių paviršių plotas. Būtent dėl to vyksta vandens adsorbcijos ir kapiliarinės kondensacijos procesai.

Maksimalios išbrinkio ir nuodžiūvio vertės priklauso nuo medienos rūšies [1].

Higroskopinė ir laisvoji drėgmė. Visa medienoje esanti drėgmė skirstoma į surištąją (higroskopinę) ir laisvąją (kapiliarinę). Surištoji drėgmė kaupiasi ląstelių sienelių mikropapiliaruose, o laisvoji drėgmė kaupiasi ląstelių ertmėse ir tarpląstelinėse tuštumose. Medienos sorbcinės savybės yra susikcentravę viduriniame antrinės sienelės sluoksnyje S_2 . Jo storis 10 kartų didesnis už S_1 ir S_3 sluoksnelių storį. Todėl antrinei sienieli tenka apie 90 % viso nuodžiūvio ar išbrinkio dydžio. Medienai džiūstant pirmiausiai išgaruoja laisvoji drėgmė. Kai jos

nebelieka, pradeda garuoti surištoji. Medienos būseną kai iš jos yra išgaravusi visa laisvoji drėgmė, o ląstelių sienelės yra prisotintos surištosios drėgmės yra vadinama pluošto soties riba. Laisvosios drėgmės kiekis medienoje gali būti labai įvairus. Jis priklauso nuo medžio rūšies, nuo klimatinių ir medienos laikymo sąlygų. Surištosios drėgmės garavimas yra susijęs su žymiu daugumos medienos fizikinių savybių pasikeitimu [1].

Medienos higroskopiskumas. Mediena geba sudrėkti absorbuodama drėgmę iš aplinkos oro. Tokia jos savybė yra vadinama higroskopiskumu. Drėgmės sorbciją galima suskirstyti į 4 atskirus procesus:

1. adsorbciją – drėgmės sugėrimą išoriniu ir vidiniu sorbento paviršiumi;
2. absorbciją – sugėrimą visa sorbento mase;
3. chemosorbciją – drėgmės sugėrimą susidarant cheminiam junginiui;
4. kapiliarinę kondensacinę sorbciją – skystos fazės susidarymą sorbento kapiliaruose.

Maksimalus medienos ląstelių sienelių drėgnis, pasiekiamas sorbcijos metu, yra medienos higroskopiskumo riba [1].

Pastovusis ir pusiausvyrisis medienos drėgnis. Kai dalinis vandens garų slėgis medienos paviršiuje susilygina su aplinkos oro garų parcialiniu slėgiu, mediena nustoja džiūti. Jei dalinis aplinkos oro garų slėgis tampa mažesnis, mediena vėl pradeda džiūti (vyksta desorbcija), jei didesnis – mediena pradeda sugerti drėgmę iš aplinkos (vyksta sorbcija). Kai visi šie procesai pasibaigia, nusistovi sorbcinė pusiausvyra. Medienos drėgnumas sorbcinės pusiausvyros metu vadinamas pastoviuoju ar pusiausviruoju drėgnumu. Pasikeitus aplinkos sąlygoms šie procesai gali atsinaujinti [1].

Vidiniai medienos įtempiai. Medžiui augant, medienai nevienodai džiūstant, drėkstant ar įmirkstant, medienoje susidaro vidiniai įtempiai. Vidiniais įtempiais medienoje, vadinami įtempiai, kurie sąlygoja medienos sortimento deformacijas, neveikiant jokioms išorinėms jėgoms. Šiuos įtempius galima suskirstyti į dvi grupes: drėgminiai įtempiai ir liekamieji įtempiai. Drėgminių įtempių atsiradimo priežastis yra netolygus surištosios drėgmės įgėrimas ar pasišalinimas iš sortimento. Liekamosios deformacijos yra sąlygojamos medienos kaip ne idealiai tampraus kūno savybių [1].

Medienos spalva. Medienos spalva – tai regimasis pojūtis, priklausantis nuo atspindimos šviesos intensyvumo ir atspindimų šviesos bangų ilgio. Ji gali skirtis priklausomai nuo medžio rūšies, amžiaus, augimo sąlygų ir medienos apdirbimo [1].

Tankis. Tankis – tai medienos sortimento masės ir tūrio santykis. Jis priklauso nuo medžio rūšies, amžiaus, augimo sąlygų ir medienos apdirbimo [1].

Akustinės savybės. Garso sklidimo greitis medienoje priklauso nuo medžio rūšies, medienos kokybės ir nuo sklidimo krypties pluošto atžvilgiu. Greičiausiai garsas sklinda išilgai pluošto, lėčiau spinduline kryptimi, lėčiausiai – tangentine. Medienos drėgniui ir temperatūrai didėjant garso sklidimo greitis sumažėja [1].

Elektrinės savybės. Medienos elektrinis laidis apibūdinamas jos savitąja tūriniu varža. Visiškai sausos medienos elektrinis laidis labai mažas. Tačiau jis priklauso nuo medžio rūšies, nuo elektros tekėjimo krypties pluošto atžvilgiu, nuo medienos drėgnio ir temperatūros. Drėgnumui didėjant, varža mažėja. Labiausiai varža sumažėja keičiantis higroskopinei drėgmei [1].

Dujų ir vandens laidis. Vandens ir dujų laidis spinduline kryptimi yra didesnis negu tangentine. Išilgai pluošto kelias dešimtis kartų didesnis negu skersai. Branduolinės dalies laidis, dėl jame susikaupusių dervinių ir ekstraktinių medžiagų, yra mažesnis nei balaninės [1].

1.1.6. Medienos mechaninės savybės

Medienos mechaninės savybės nusako jos gebėjimą priešintis išorinių mechaninių jėgų poveikiui. Medienos mechaninių savybių išmanymas reikalingas nustatant jos mechaninio ir hidroterminio apdirbimų technologinių procesų parametrus bei apskaičiuojant medinių konstrukcijų elementų atsparumą [1].

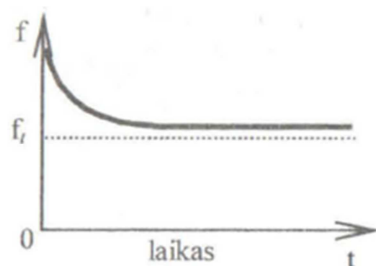
Atsparumas gniuždymui. Mediena gali būti gniuždoma išilgai ir skersai pluošto krypties. Gniuždymui mediena priešinasi gana gerai. Vidutiniškas stipris gniuždant išilgai medienos pluošto apytiksliai 50 MPa. Atsparumas gniuždymui priklauso nuo medžio rūšies, medienos drėgnio ir sandaros. Atsparumas gniuždymui skersai pluošto priklauso nuo medienos mikrostruktūros ir gniuždymo krypties pluošto atžvilgiu, t.y. spinduline ar tangentine kryptimi. Visų medienos rūšių sąlyginis stipris gniuždant statmenai pluošto yra vidutiniškai 10 kartų mažesnis už stiprį gniuždant išilgai pluošto [1].

Atsparumas tempimui. Net ir tos pačios rūšies medienos atskirų bandinių atsparumas tempimui paprastai gerokai skiriasi. Tam labai didelę įtaką daro medžio rūšis ir medienos struktūros ypatumai, drėgnis, kryptis medienos pluošto atžvilgiu. Vidutinis stipris tempiant išilgai pluošto įvairių rūšių medieną yra apie 130 MPa. Stipris tempiant statmenai pluošto yra apie 20 kartų mažesnis, nei tempiant išilgai. Jei skersinėje tempimo plokštumoje yra įtrūkimų ar plyšių, atsparumas gali sumažėti iki nulio. Dėl to mediena visiškai nenaudojama ten kur gali būti šios rūšies apkrovos [1].

Atsparumas statiniam lenkimui. Mediena yra labai atspari lenkimui išilgai pluošto, ji plačiai naudojama įvairioms konstrukcijoms ir detalėms, kurias veikia lenkimo jėgos. Praktikoje detalių apkrovos retai pasiekia atsparumo ribą. Lenkiamų detalių matmenis dažnai lemia ne atsparumo rodikliai, bet leidžiamos maksimalios deformacijos dydis. Lenkiant lygiagrečiai pluošto stipris yra daug kartų mažesnis nei lenkiant išilgine kryptimi. Atsparumas lenkimui priklauso nuo medžio rūšies, bandinio vietos kamienne, medienos drėgnio, temperatūros ir lenkimo krypties pluošto atžvilgiu [1].

Atsparumas šlyčiai Priklausomai nuo medienos pluošto struktūros galima išskirti tris šlyties atvejus: skėlimas išilgai pluošto, skėlimas statmenai pluošto ir kirpimas. Kiekvieną atvejį galima atlikti spinduline ir tangentine kryptimi. Visų rūšių atsparumas skėlimui išilgai pluošto apytiksliai lygus 1/5 atsparumo skeliant statmenai pluošto. Stipris kerpant yra apytiksliai keturis kartus didesnis nei skeliant išilgai pluošto. Atsparumas šlyčiai priklauso nuo medžio rūšies, bandinio vietos kamienne, medienos drėgnio, temperatūros ir poveikio krypties pluošto atžvilgiu [1].

Atsparumas ilgalaikėms apkrovoms, nuovargis. Apkrovos sukeliančios įtempius mažesnius už ilgalaikio atsparumo ribą, nesuardo medienos net ir per ilgą laiką. Nepriklausomai nuo apkrovos rūšies vidutinė ilgalaikio atsparumo riba lygi apytiksliai 0.5 – 0.6 stiprio, nustatyto trumpalaikiais santykiniais bandymais. Tačiau tyrimų duomenys rodo, kad vibracinio lenkimo atveju medienos nuovargio riba lygi 0.2 stiprio statiška lenkiant. Virpesių dažnio pokyčiai nuo 1 iki 50 Hz nuovargio ribai įtakos neturi [1].



16 pav. Medienos atsparumas ilgalaikėms apkrovoms; f – medienos atsparumas; t – laikas [1]

1.1.7. Medienos technologinės savybės

Smūginis tūsumas. Smūginis tūsumas apibūdina medienos gebėjimą absorbuoti smūgio energiją nesuyrant. Jis priklauso nuo medžio rūšies, medienos drėgnio, apkrovos greičio ir krypties pluošto atžvilgiu. Minkštų lapuočių medienos smūginis tūsumas yra 1.5 karto, o kietų lapuočių 3 kartus didesnis nei spygliuočių. Rūšys, kur ankstyvoji ir vėlyvoji rievės dalys labai

skiriasi, pasižymi tuo, kad jų smūginis sąsūmas spinduline kryptimi yra 20 – 50 % didesnis nei tangentine [1].

Kietis. Medienos kiečiu vadinamas jos atsparumas indentoriaus įspaudimui į jos paviršių. Kietis nustatomas Brinelio metodu. Pagal indentoriaus spaudimo kryptį pluošto atžvilgiu, medienos kietis skirstomas į galinį, tangentinį ir spindulinį. Jis priklauso nuo medžio rūšies, medienos drėgnio ir pluošto krypties. Lapuočių galinis kietis yra 30 %, o spygliuočių 40 % didesnis už šūoninį kietį. Tangentinis ir spindulinis kiečiai beveik vienodi [1].

Medienos gebėjimas laikyti vinis ir medsraigčius. Medienos pluošto geba išlaikyti suspaustą vinį priklauso nuo įkalimo krypties pluošto atžvilgiu, medžio rūšies ir medienos drėgnio. Išilgai pluošto įkaltai viniai ištraukti reikia apytiksliai 10 – 15 % mažesnės jėgos, nei viniai įkaltai skersai pluošto. Skirtumo tarp tangentine ir spinduline kryptimi įkaltos vinies, beveik nėra. Įsuktam medsraigčiui ištraukti reikia apytiksliai 4 kartus didesnės jėgos nei viniai. Čia prie trinties jėgų prisideda medienos pluošto pasipriešinimas tempimui ir kirpimui [1].

Atsparumas dilimui. Atsparumas dilimui priklauso nuo dildomo pluošto krypties, nuo medienos tankio, kiečio ir drėgnio. Sortimento šoniniai paviršiai dyla beveik du kartus daugiau nei galiniai. Drėgnesnė mediena dyla labiau nei sausa [1].

Skalumas. Naudojant pleišta, veikiama tempimo ir lenkimo skersai pluošto įtempimų, mediena skyta. Skalumas priklauso nuo medžio rūšies, medienos drėgnio ir pluošto krypties. Skilimas vyksta tik spinduline ir tangentine pluošto kryptimis. Lapuočiai skilimui atsparesni nei spygliuočiai. Sausa mediena skalesnė nei drėgna [1].

1.2. Medienos medžiagos

Siekiant pagerinti ir tam tikroje aplinkoje išlaikyti medienos gaminių elementų fizikines ar mechanines savybes iš medienos gaminamos konstrukcinės medžiagos. Plačiausiai naudojamos medienos konstrukcinės medžiagos yra medienos plokštės ir klijuota mediena. Yra išskiriami du plokščių tipai. Tai smulkinių plokštės ir medienos plaušo plokštės [4].

Medienos smulkinių plokštės. Smulkinių plokštės – lakštinės medžiagos gaminamos, supresuojant ir kaitinant sumaišytas su kljais medienos drožles, skiedras, pjuvenas ar kitas smulkinių pavidalo medžiagas. Iš jų būtų galima išskirti medienos drožlių plokštes (MDP), orientuotų skiedrų plokštes (OSB) ir cementu sujungtas smulkinių plokštes [4].

MDP. MDP gaminamos iš specialiai paruoštų ar mechaninio medienos apdirbimo metu gautų drožlių. Plokščių gamybos metu drožlės maišomos su drėgmei atspariais kljais ir karštais presais supresuojamos į didelio formato lakštus. Šios plokštės gaminamos neapdailintos ar apdailintos sintetinėse dervose įmirkytu tekstūriniu popieriumi. Jos naudojamos vidaus darbams ir baldų gamybai [4].

OSB. Jos gaminamos iš pušies ar kitų rūšių medienos skiedrelių, kurių ilgis ne mažesnis kaip 100 mm, storis 0.6 mm o plotis 15 – 20 mm. Išoriniame sluoksnyje skiedros orientuotos tik viena kryptimi, lygaigrečiai plokštės ilgio ar pločio. Vidiniame sluoksnyje skiedros neorientuotos ir dažniausiai išdėstytos statmena viršutinio sluoksnio skiedroms kryptimi. Išoriniai sluoksniai gaminami iš stambesnių skiedrų su didesniu kljū kiekiu. Jos gali būti skirstomos į vidaus darbams neveikiant apkrovoms, vidaus darbams veikiant apkrovoms, išorės darbams veikiant apkrovoms ir išorės darbams veikiant didelėms apkrovoms. Šios plokštės gaminamos tik neapdailintos [4].

Cementu sujungtos smulkinių plokštės. Jos gaminamos presuojant susmulkintas, cemento skiedinyje sumaišytas drožles ar kitokius augalinės kilmės smulkinis. Į šią masę gali būti pridėdama antiseptinių medžiagų. Smulkiniai sujungiami cementu arba magnio oksidu. Plokštės paviršius gali būti reljefinis, šlifluotas, padengtas įmirkytu dekoratyviniu popieriumi, folijomis ar plastmasėmis. Šios medžiagos dažniausiai naudojamos skydinių namų statyboje [4].

Medienos plaušų plokštės. Medienos plaušų plokštė yra 1.5 mm ar storesnė lakštinė medžiaga, pagaminta iš lignoceliulizinio puošto, kuris kaitinamas ir presuojamas. Plaušai sulimpa dėl savo rišančiųjų savybių arba pridėjus sintetinių rišančiųjų medžiagų. Klasifikuojamos pagal kietį ir tankį: mažo (LDF), vidutinio (MDF) ir didelio tankio (HDF). Pagal paskirtį skirstomos vidaus ir išorės darbams. Gaminamos neapdailintos ir apdailintos [4].

Klijuota mediena. Šiai medienos medžiagų grupei priklauso klijuoti lentų tašai, natūralios medienos skydai ir sluoksniuotoji mediena (fanera) [4].

Klijuoti lentų tašai. Klijuotas lentų tašas arba klijuota sluoksninė mediena yra statyboms skirtas gaminys. Jis suklijuotas iš obliuotų lentų, kurių pluošto kryptis išilginė. Jie skirstomi į tris eksploatacines grupes, kurios nusako aplinkos, kurioje šie gaminiai skirti naudoti, santykinę drėgnį. Pagal lentų sluoksnių išdėstymą tašo skerspjūvyje, tašai skirstomi į horizontaliuosius ir vertikaliuosius. Dažniausiai ši medžiaga skirta langų, durų ir jų staktų bei įvairių rėminių konstrukcijų gamybai [4].

Natūralios medienos skydai. Šie skydai – galais ir šonais suklijuoti medienos tašeliai. Jie būna vienasluoksniai ir daugiasluoksniai, skirti naudoti sausoje, drėgnoje aplinkoje ir lauke, bendrosios ir statybinės paskirties, gaminami iš spygliuočių ar lapuočių medienos, reljefinio paviršiaus, nešlifuoti, šlifuoti, ar apdailinti (dažyti, gruntuoti, lakuoti ar įmirkyti aliejais). Sluoksnių konstrukciją, tašelių skerspjūvį ir jų sujungimo būdą sąlygoja plokščių paskirtis. Jos daugiausiai naudojamos korpusinių baldų fasadams, stalviršiams, durims, staktoms ir laiptams gaminti [4].

Sluoksniuotoji mediena. Sluoksniuotoji mediena tai medienos skydas pagamintas iš sluoksninių rinkinio, suklijuoto plokštumomis, lygiagrečiai ar statmenai pluošto kryptims. Sluoksniuotoji mediena skirstoma pagal konstrukciją, formą, eksploatacines sąlygas, mechanines savybes ir paviršiaus apdirbimą. Būdingi šios grupės medžiagų pavyzdžiai yra fanera, stalių plokštės, sluoksniuotosios plokštės ir kombinuota sluoksniuotoji fanera. Šios medžiagos naudojamos baldų gamybai bei įvairiems vidaus ir lauko darbams [4].

1.3. Mechanškai apdirbtų medienos ir jos medžiagų paviršių šiurkštumas

Apdirbant medieną ir medienos medžiagas, pjovimo įrankio atšipimas apibūdinamas apdirbto paviršiaus kokybės pablogėjimu. Pjovimo įrankio patvarumo periodas priklauso ne tik nuo padidėjusių jėgų ar pjovimo galios, bet nuo apdirbto paviršiaus kokybės.

Dauguma tyrėjų frezuotų paviršių šiurkštumo tyrimus atliko frezuojant spygliuočių ir kietųjų lapuočių medieną [5].

2 lentelė. Ašmenų nusiapvalinimo spindulio ρ įtaka paviršiaus šiurkštumui [6, 7]

Ašmenų suapvalinimo spindulys ρ , μ	Paviršiaus šiurkštumas R_{max} , μ m			
	Išilginis frezavimas		Skersinis frezavimas	
	Spygliuočiai	Kietieji lapuočiai	Spygliuočiai	Kietieji lapuočiai
<10	16...60	16...30	320...500	200...320
<20	60...200	30...60	320...500	200...320
<30	200...320	60...200	500...800	320...500

3 lentelė. Bangos ilgio priklausomybė nuo paviršiaus nelygumų [7]

Pjovimo skersmuo mm	Normatyvinis bangos ilgis l_b , mm, kai nelygumų aukštis μ m				
	16...32	32...60	60...100	100...200	200...320
100	3,5	5,0	6,5	9,0	11,0
120	4,0	5,5	7,0	10,0	12,0
140	4,2	6,0	7,5	10,5	13,0
160	4,5	6,5	8,0	11,0	14,0
180	5,0	7,0	8,5	12,0	15,0

Nuo paviršiaus kokybės tiesiogiai priklauso galutinis medienos gaminių naudojimas [5]. Paviršiaus kokybė priklauso nuo daugelio veiksnių tokių kaip medienos savybės ir mechaninio apdirbimo sąlygos [8]. Iš medienos savybių turi būti paminėtos medienos rūšis, tankis, drėgnis ir struktūrinės savybės. Struktūrinės savybės tai: tracheidžių ir indų savitasis kiekis, išsidėstymas, paplitimas ir jų matmenys, pluošto skaidulos, poros ir tarpląstelinės tuštumos [5, 8]. Struktūrinės savybės ypač aktualios paviršių šiurkštumui, apdirbant žiedaindžių rūšių medieną. Mechaninis apdirbimo procesas taip pat daro didelę įtaką paviršiaus šiurkštumui [8]. Svarbiausi veiksniai yra pjovimo greitis, pastūma vienam pjovikliui ir ašmenų dilimas [6, 8].

4 lentelė. Pastūmos vienam pjovikliui u_z įtaka nufrezuoto paviršiaus šiurkštumui [6, 7]

Pastūma vienam pjovikliui u_z , mm	Paviršiaus šiurkštumas R_{mmax} μm
0,1...0,4	32
0,4...1.0	60
1,0...1,5	100
1,5 2,0	200
2,0...2,5	320
2,5...3.0	500

Pjovimo kampas, ruošinio ir stalo vibracijos taip pat daro įtaką paviršiaus šiurkštumui [8]. Apdirbimas pluošto krypties atžvilgiu, taip pat įtakoja paviršiaus šiurkštumą [9]. Tangentine kryptimi apdirbtas paviršius yra glotnesnis, lyginant su paviršiumi nufrezuotu spinduline kryptimi [5, 9] Visi šie veiksniai sąlygoja paviršiaus tekstūros ir faktūros kokybę [5]. Paviršiaus šiurkštumas susijęs su drėkinamosiomis savybėmis [10]. Todėl nuo paviršiaus šiurkštumo priklauso tolimesnių medienos apdirbimo būdų, tokių kaip apdaila ir klijavimas, kokybė, nes paviršiniai pažeidimai gali kliudyti dangų įsiskverbimui į medieną [10, 11]. Apdirbto medienos paviršiaus šiurkštumo pokyčiai įtakoja kai kurių medienos rūšių spalvą ir blizgesį. Mažėjant paviršiaus šiurkštumui, medienos spalva ryškėja [12]. Taip pat reikia paminėti, kad paviršiaus šiurkštumas labai įtakoja mikroorganizmų adheziją [13]. Didėjantis pjovimo greitis, sąlygoja paviršiaus kokybės pagerėjimą [6]. Mažėjant paviršiaus šiurkštumui mažėja problemų klijuojant ir apdailinant medieną [9].

Medienos paviršiaus šiurkštumas nėra vien tik svarbus rodiklis, nusakantis paviršiaus glotnumą ir apdirbimo kokybę, bet taip pat šiurkštumas nusako fizinius ir psichologinius pojūčius liečiant jį. Kiekybiniai paviršiaus savybių parametrai yra svarbi dalis pažyminti vizualinę psichologinę reikšmę, kuri yra labai svarbi žmogui [12]. Šiurkštumas yra nusakomas nelygumų dydžiu apdirbtame medienos paviršiuje. Šie nelygumai gali būti nustatomi matuojant jų aukštį, plotį, viršūnių ir įdubų formą atsiradusią dėl mechaninio apdirbimo, ar dėl anatominių medienos savybių [8]. Paviršiaus šiurkštumas yra nusakomas skirtingais parametrais, populiariausi yra R_a , R_z ir R_{max} [8, 14]. Medienos paviršiaus šiurkštumo nustatymui naudojami įvairūs metodai, tokie kaip vizualinis, optinis, pniaumatinis, ultragarsinis, elektrinis, fotografinis ir kontaktinis – adatinis [5, 15].

1.3.1. Paviršiaus šiurkštumo matavimo metodai

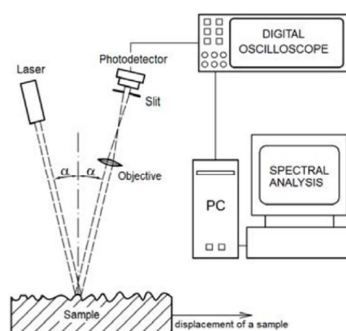
1.3.1.1. Paviršiaus šiurkštumo nustatymas vizualiai ir lytint

Vizualiniai ir lytėjimo pojūčiai yra labai svarbūs sąveikaujant su supančia aplinka. Jais suprantamas faktūrų skirtumas. Svarbiausias dalykas nusakantis paviršių šiurkštumą liečiant yra vibraciniai pojūčiai. Šie pojūčiai priklauso nuo paviršiaus apčiuopimo lytint greičio, tekstūros krypties ir trinties, lytint, laipsnio. Vizualiai vertinant paviršiaus šiurkštumą, svarbūs veiksniai yra spalvos intensyvumo ir šviesos atspindėjimo tolygumas bei apčiuopiamų fizinių dalelių nebuvimas. Šie fiziniai pojūčiai sukelia psichologinius pasitenkinimo ar nepasitenkinimo pojūčius, kurie nusako paviršiaus glotnumo lygį. Galima teigti, kad kiekybiniai paviršiaus savybių parametrai yra svarbi

dalis pažyminti vizualinę psichologinę reikšmę, kuri yra labai svarbi žmogui. Tačiau toks paviršiaus šiurkštumo pajautimas aiškiai priklauso nuo individualių žmogaus savybių [16].

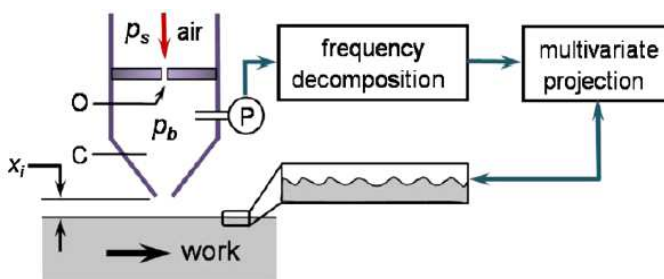
1.3.1.2. Šviesos atspindžių metodas

Tai toks paviršiaus šiurkštumo matavimo metodas, kuomet apdirbtas paviršius apšviečiamas koncentruotu spindulių pluoštu, kuris atspindimas. Esant skirtingam paviršiaus šiurkštumui gaunami skirtingo intensyvumo atspindžiai, kuriuos fiksuoja jutiklis ir paverčia elektriniais signalais. Šie signalai kompiuteryje paverčiami matematiniais paviršiaus šiurkštumo rodikliais [17].



17 pav. Fotoelektrinis paviršiaus šiurkštumo matavimo metodas [17]

1.3.1.3. Pneumatinis paviršiaus šiurkštumo matavimo metodas



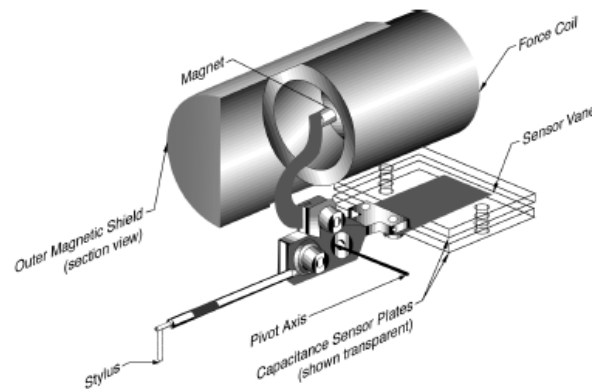
18 pav. Pneumatinis paviršiaus šiurkštumo matavimo metodas [18]

Šio metodo principas paremtas pastoviu slėgiu, per antgalio kiaurymę O , pučiamu suspausto oro srautu į apdirbtą paviršius ir to slėgio svyravimų fiksavimu. Vykstant tarpelio pločio x_i pokyčiams, tarp prietaiso ir apdirbto paviršiaus, dėl paviršiaus šiurkštumo nevienodumo kinta oro slėgis matuoklio kameroje C . Oro slėgio pokyčiai yra fiksuojami naudojant jautrų dinaminį pjezoelektrinį slėgio daviklį ir paverčiami paviršiaus šiurkštumą nusakančiais matematiniais parametrais [18].

1.3.1.4. Kontaktinis – adatinis šiurkštumo matavimas

Pagrindinis šio metodo elementas yra adata, slankiklis, stiprintuvas, duomenų rinktuvas ir filtras, duomenų saugojimo elementas ir jų parodymo įrenginys. Paviršiaus šiurkštumas matuojamas slankikliui, lygiagrečiai, ruošinio paviršiui, kryptimi traukiant adatą, o šiai vertikaliais judesiais atkartojant mikroreljefo nelygumus. Prietaisas fiksuoja ir užrašo mikronelygumų dydį ir

pasikartojimo dažnį. Kad atskirti mašininio apdirbimo padarytą paviršiaus banguotumą ir paviršiaus šiurkštumą, prietaise, naudojami elektroniniai filtrai [19].



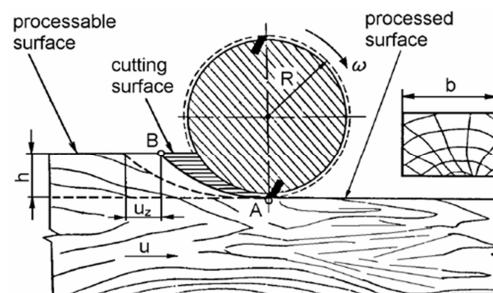
19 pav. Adatinis paviršiaus šiurkštumo matavimo metodas [19]

1.4. Frezavimo proceso technologinė paskirtis ir kinematika

Frezavimas yra medienos pjovimo procesas, kurio metu besisukantis frezavimo įrankis nuo medienos paviršiaus nupjauna spiralinę drožlę. Toks procesas vyksta besisukant įrankiui ir tik esant įrankio ar ruošinio pastūmai. Frezavimo procesas yra aprašomas frezavimo įrankio spinduliu R , įrankio sukimosi dažniu n , arba pjovimo greičiu v . Pastūmos judesys gali būti suteikiamas apdirbamam ruošiniui arba frezavimo įrankiui. Kad gauti plokščius ar profiliuotus paviršius, dažniausiai atliekamas išilginis frezavimas. Šis apdirbimo būdas užtikrina pakankamai aukštą paviršiaus kokybę ir būtiną tikslumą [6].

Frezavimo zonoje yra išskiriami trys pagrindiniai paviršiai (2 pav.): apdirbamas paviršius, apdirbtas paviršius ir nupjaunamas paviršius. Frezavimo procesas yra dviejų tipų: kuomet frezavimo įrankis sukasi prieš pastūmos kryptį ir kuomet frezavimo kryptis sutampa su pastūmos kryptimi. Tačiau abu frezavimo režimai charakterizuojami tais pačiais parametrais:

1. Nupjaunamo sluoksnio storis h (mm);
2. Frezuojamo paviršiaus pločiu b (mm);
3. Pastūma vienam pjovikliui u_z (mm);
4. Pjovimo greičiu v (m/s) [6].



20 pav. Išilginio medienos frezavimo schema. Čia : processable surface – apdirbamas paviršius; processed surface – apdirbtas paviršius; cutting surface A,B – pjaunamas paviršius; u – pastūmos kryptis; u_z – pastūma vienam pjovikliui; h – nupjaunamo sluoksnio storis; b – frezavimo plotis [6]

čia: D - frezavimo įrankio skersmuo (mm);
 n - įrankio apsisukimų dažnis (min^{-1}) [6].

1.4.1. Frezavimo būdų klasifikacija

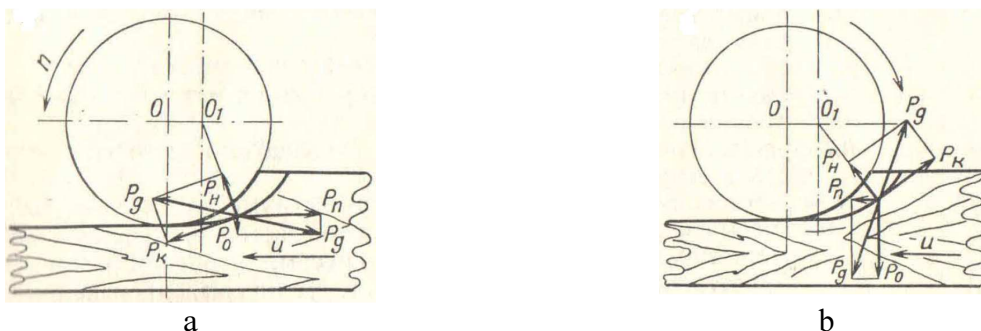
Frezavimo proceso technologinė paskirtis – galutinis apdirbamų detalių paviršių suformavimas. Tai gali būti lygių ar profilinių paviršių ruošiniam suteikimas, ar dyginių sujungimų elementų frezavimas.

Frezavimas klasifikuojamas:

- 1). Pagal frezavimo įrankio ašmenų padėtį, jo sukimosi ašies atžvilgiu:
 - Cilindrinis frezavimas;
 - Kūginis frezavimas;
 - Galinis frezavimas;
 - Profilinis frezavimas.
- 2). Pagal pastūmos judesio kryptį medienos pluošto atžvilgiu:
 - Išilgai pluošto;
 - Skersai pluoštui;
 - Statmenai pluoštui;
- 3). Pagal pastūmos kryptį ir įrankio sukimosi kryptį:
 - Tos pačios krypties;
 - Priešingos krypties;
- 4). Pagal apdirbamų paviršių skaičių:
 - Atviras frezavimas (vienas apdirbamas paviršius);
 - Pusiau uždaras frezavimas (du apdirbami paviršiai);
 - Uždaras frezavimas (trys apdirbami paviršiai) [21].

1.5. Medienos pjovimo įrankių dilimo mechanizmas

Medienos pjovimo įrankiai paprastai dirba dideliais greičiais, jų pjovimo greitis būna daugiau kaip 50–80 m/s, jų darbiniai paviršiai t.y. priekinis paviršius, pjaunančioji briauna ir užpakalinis paviršius yra veikiami didelių pjovimo jėgų, kurios susidaro pjovimo metu [23].

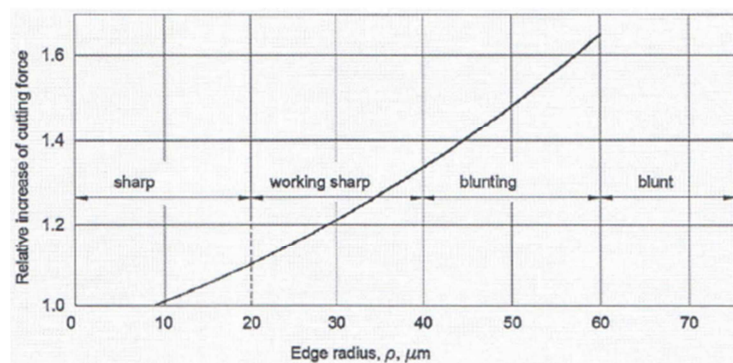


22 pav. Jėgos veikiančios frezavimo metu. Čia: P_0 – jėga, kuria pjoviklis veikia pjaunamą medžiagą ir kuria pjaunama medžiaga veikia pjoviklį; P_k – reali pjovimo jėga, P_n – pasipriešinimas pastūmai; P_0 – jėga statmenai pastūmai [20]

Judėjimas dideliu greičiu trinties energiją paverčia temperatūra. Dėl to medienos apdirbimo įrankiai yra veikiami didelių mechaninių ir temperatūrinių krūvių.

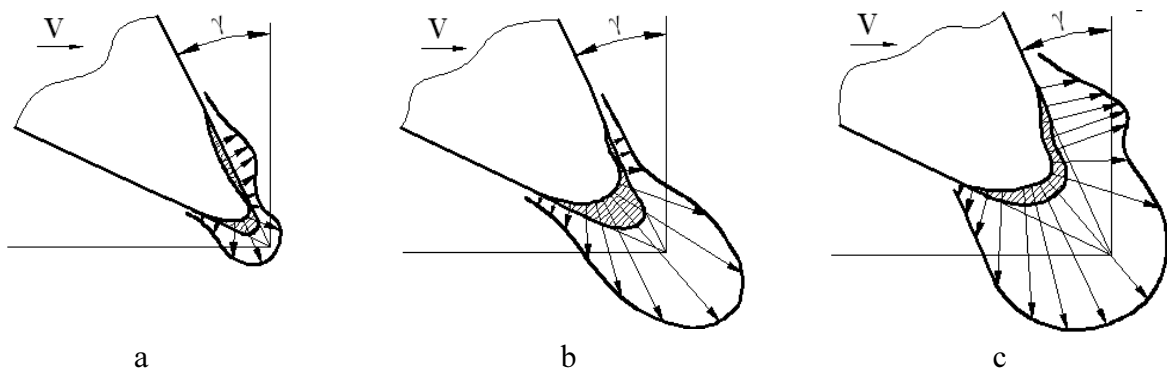
Intensyvūs pjovimo procesai skatina įrankio ašmenų dilimą. Įrankio ašmenų dilimas pasireiškia pjaunančiosios briaunos medžiagos praradimu, kurį sąlygoja mechaniniai, terminiai ir elektriniai veiksniai. Dilimo procesas skatina įrankio pjaunančiosios briaunos bukimą, dėl ko padidėja pjovimo galia ir pablogėja apdirbamo ruošinio paviršiaus kokybė. Apdirbamo paviršiaus kokybės rodikliai ir įrankio ar ruošinio pastūmos greitis labai priklauso nuo įrankio pjaunančiosios briaunos mikrogeometrijos pokyčių. Ašmenų mikrogeometrijos pokyčiai gerai matomi stebint atšipimo kreivės kitimą [22].

Pradinė ašmenų forma padaroma galandant. Didelę įtaką daro įrankio medžiagos savybės, ir jos kietis., Ašmenų profilis niekada nebūna lygus ir turi netaisyklingą mikrogeometriją. Pirminė įrankio pjaunančioji briauna nėra lygi ir atsižvelgiant į įtempių išsidėstymą, pjaunant, ji, nėra optimalios formos. Pradėjus eksploatuoti įrankį, jo ašmenų forma greitai kinta ir suapvalėja. Dilimo procesas įtakoja įrankio ašmenų suapvalinimo spindulio didėjimą. Pagal įrankio ašmenų suapvalinimo spindulio pokytį, įrankiui dirbant ir pagal apdirbtojo paviršiaus kokybę, galima išskirti keletą įrankio dilimo stadijų (3 pav.) [23].



23 pav. Įrankio dilimo stadijos. Čia: Relative increase of cutting force – pjovimo jėga; Edge radius – ašmenų užsiapvalinimo spindulys; Sharp – aštrus; Working sharp – pakankamai aštrus; Blunting – apyaštris; Blunt – atšipęs [23]

Priklausomai nuo įrankio medžiagos kietio, pirminis ašmenų suapvalinimo spindulys būna 10-15 μm . Optimalus pjaunančiosios briaunos nuapvalinimo spindulys dylant įrankiui yra 20 μm . Svarbiausia įrankio dilimo stadija yra kuomet įrankis yra aštrus, kuri sąlygoja optimalias pjovimo sąlygas su mažiausiomis energijos sąnaudomis ir puikią apdirbto paviršiaus kokybę. Esant ašmenų suapvalėjimo spinduliui didesniai nei 40 μm , įrankis tampa atšipusiu, todėl didėja pjovimo galia ir blogėja apdirbamo paviršiaus kokybė. Atšipęs įrankis sąlygoja labai išaugusią pjovimo galią, labai prastos kokybės apdirbtą paviršių [23].

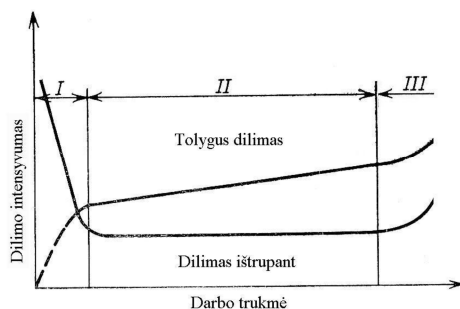


24 pav. Apkrovos pasiskirstymo ašmenyse epiūros, esant pjovimo keliui: 1 - $L_c = 8000$ m; 2 - $L_c = 14000$ m; 3 - $L_c = 19000$ m [24]

Įrankio nusidėvėjimas yra proporcingas apdirbto paviršiaus ilgiui (L_f) ir tikram pjovimo ilgiui (L_c). Tikrasis įrankio pjovimo kelias gali būti apskaičiuojamas pagal formulę (5) [23]:

šioje dilimo stadijoje gali atsirasti mikroįtrupėjimai. Bet dilimas ištrupant praktiškai pastovus ir bendrame dilimo fone nežymus.

Daugelis tyrėjų monotoninį medienos pjovimo įrankių dilimą aiškina visu kompleksu reiškinių vykstančių pjovimo zonoje: abrazyvinis, šiluminis ir oksidacinis dilimas, elektrocheminė korozija ir elektrinė erozija. [22].



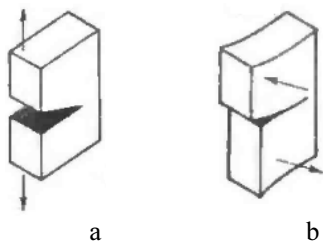
26 pav. Ašmenų dilimo stadijos

I – įdirbinio dilimo stadija; II – tolygaus dilimo stadija; III – avarinio dilimo stadija [22]

Jeigu įtrūkimas, atsirandantis ant ašmenų, dėl dilimo produktų atsiskyrimo, neviršija pjaunančiosios briaunos mikroreljefo šiurkštumo dydžio R_{max} , tai priskiriama tolygaus dilimo atvejui. Jei atsiskirianti dalelė didesnė už R_{max} dydį, tačiau mažesnė už pjovimo briaunos suapvalinimo spindulį, tai galima teigti, kad vyksta dilimas ištrupant.

Pradinėje darbo stadijoje pjaunančiosios briaunos dilimas daugiausia yra trapaus irimo pobūdžio. Šis dilimas susijęs su įtrūkimais (plyšiais), esančiais arti pjovimo briaunos. Medienos apdirbimo įrankiuose atsirandantys įtrūkimai yra dviejų tipų:

1. Įtrūkis kuomet jo kraštai persilenkat išilgai vienoje plokštumoje, bet į skirtingas kryptis.
2. Įtrūkis kuomet kraštų perstūmimas nėra plokštuminis [22].



27 pav. Ašmenų įtrūkimų tipai [22]

I-asis tipas būdingas įtrūkimams, esantiems lygiagrečiai pjovimo briaunai. *II*-asis tipas būdingas įtrūkimams, esantiems skersai pjovimo briaunai. Šio tipo įtrūkimų atsiradimą lemia netolygus pjovimo briaunos apkrovimas pagal ilgį.

Įrankis, prieš pradėdamas dirbti, turi savo paviršiuje plyšius, kurie susidaro po netinkamo terminio apdirbimo arba galandimo. Įrankiui dirbant, dėl pjovimo bei trinties jėgų poveikio, susidaro įtempių koncentracijos židiniai, kurie skatina plyšių atsiradimą. Didėjant pjovimo briaunos išdilimui ir dėl to augant ašmenų suapvalinimo spindulio skaitinėms vertėms, pastebėta, kad dilimo ištrupant intensyvumas palaipsniui sumažėja. Įtempiai, veikiantys zonoje arti pjovimo briaunos, sumažėja, kadangi pasiskirsto didesniuose plotuose. Be to, pirmoje dilimo stadijoje, pašalinami tie tūriai, kurie ribojasi su dideliais mikroįtrūkimais. Įrankinė medžiaga gali trupėti, jeigu įrankis eksploatuojamas nepalankiomis sąlygomis. Prie nepalankių sąlygų priskiriama erdvinė įtemptumo būklė, dinaminės apkrovos, žemos temperatūros, aktyvių terpių įtaka ir kiti veiksniai. Šios nepalankios sąlygos gali būti trumpalaikės arba veikti viso patvarumo periodo metu. Tuo pat metu šiame periode pastebimas procesas, nulemiantis būseną, kurią pasiekus, pjovimo įrankis praranda darbingumą dėl intensyvaus dilimo ir trupėjimo, atsirandančio dėl mikroįtrūkimų

padidėjimo. Dilimo periodų trukmė priklauso nuo apdirbamų ir įrankinių medžiagų ypatumų, apdirbimo procesų režimų, taip pat pjovimo įrankio ašmenų medžiagos prisotinimo azotu, vandeniliu, deguonimi ir kitais cheminiais elementais. Minėti cheminiai elementai iš esmės keičia įrankinių medžiagų fizikines–mechanines savybes ir jų patvarumą dilimui.

Dilimas ištrupant sudaro nuo 40 iki 60% bendrajame įrankio išdilime. Ištrupėjimų dydis priklauso nuo: pjovimo režimo, medienos kiečio, įrankio nusmailinimo kampo ir kitų veiksnių. Dilimas ištrupant suintensyvėja, kai apdirbama šakota ir gerbėta mediena. Pirmiausia susidaro maži ištrupėjimai ir įtrūkimai, o po to atsiranda kiti didesnių matmenų, kurie persidengia su pirmiau atsiradusiais. Pradiniame etape, aštrūs ašmenys tolygiai lūžinėja per visą ilgį.

Pjovimo briaunos ištrupėjimams didelę įtaką turi temperatūriniai darbo režimai. Žemose temperatūrose įrankis dyla ištrupant, o išdilimo intensyvumas spartėja didinant pjovimo greitį.

Dažnai plieninių įrankių dilimą sukelia plastinė ašmenų deformacija. Deformacijos tik paskatina ašmenų dilimą. Šie rezultatai parodo, kad įrankis nekokybiškai paruoštas darbui.

Nekokybiškai darbui paruošto įrankio priežastys:

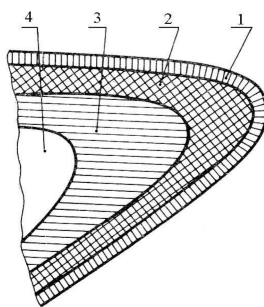
- netinkamas terminis apdirbimas, kurio metu nepasiektas reikiamas įrankio kietumas;
- galandimo metu, nesilaikant režimo sąlygų, įvyko užgrūdinto plieno atleidimas;
- pjovimo metu įvyko neleistinas ašmenų perkaitinimas.

Apdirbant medieną įrankiais, pagamintais iš plienų, turinčių dviejų fazių struktūrą, pastebėtas šių įrankių aukštesnis patvarumas, kai plieno struktūra smulkiagrūdė ir nėra ištisinio karbidų tinklelio. Stambūs karbidai metalo struktūrą veikia neigiamai, kadangi jų dydis sutampa su atsirandančiais mikroištrupėjimais. Esant nepalankiam karbidų išsidėstymui, kai susidaro karbidų juostos, ašmenų patvarumas ištrupėjimams ženkliai sumažėja. Nustatyta, kad labiau ištrupa įrankių ašmenys tų plienų, kuriuose karbidų dydis didesnis kaip 10 μ m. Dilimas ištrupant ypač suintensyvėja, kai karbidai būna išsidėstę grandinėmis pačioje pjaunančioje briaunoje, ar arti jos. Pjovimo įrankių dilimą sudaro keletas mechanizmų. Šie mechanizmai būna tarp savęs susiję. Tačiau kiekvieno mechanizmo dedamoji nuolat kinta laike. Todėl kiekvieno dilimo mechanizmo įtaka bendram dilimo mechanizmui nėra pastovus reiškinys.

Pjovimo briaunos dilimas ištrupant – tai įrankinės medžiagos irimas dėl mikroįtrūkimų, atsiradusių prieš eksploataciją artimiausiose zonose, esančiuose šalia pjovimo briaunos. Taip pat gali būti ir medžiagos nuovargio ar atsitiktinių perkrovų pasekmė. Mikroįtrūkimams pasiekus ribinę būseną, pradeda atsiskirti dilimo produktai. Šios ribinės būsenos susidarymo sąlygos gali būti nustatomos naudojant linijinės irimo mechanikos principus. Remiantis šiais principais, bandiniuose su įtrūkimais, susidaro erdvinė (daugiaašė) įtemptumo būklė su lokalinėmis zonomis, kuriose labai dideli tempimo įtempiai. Šie įtempiai susidaro dėl įtrūkimų ir ertmių. Įtrūkimo (plyšio) vietoje, įrankinės medžiagos proporcingumo riba pasiekama prie sąlyginai žemo faktinių įtempimų lygio [22].

1.5.1. Įrankio ašmenų paviršinių sluoksnių įtaka jo dilimui

Medienos pjovimo įrankių dilimo patvarumui svarbią reikšmę turi ašmenų paviršinių sluoksnių fizikinė būklė, kuri apibūdinama šiais veiksniais: fizikinėmis – cheminėmis savybėmis, šiurkštumu, banguotumu, įtemptumo rodikliais, įrankio medžiagos struktūra. Paviršinio sluoksnio, kuriame vyksta dilimo procesas, gylis ir sudėtis priklauso nuo pagrindinės medžiagos struktūros, apdirbimo būdo ir režimo, bei pjovimo įrankio ir apdirbamos medžiagos kontakto sąlygų.



28 pav. Paviršiniai sluoksniai įrankio ašmenyse: 1 – dujų ir drėgmės absorbuota plėvelė; 2 – nudeguonintas oksidų ir nitridų turintis sluoksnis; 3 – sutrūkinėjęs sluoksnis; 4 – nepakitusios įrankinės medžiagos sluoksnis [22]

Paviršinis sluoksnis, susidarantis įrankį paruošiant darbui, yra nevienalytės sandaros:

1 - Išorinis sluoksnis dujų ir drėgmės adsorbuota plėvelė (28 pav.).

2 - asis sluoksnis stipriai deformuotas ir be deguonies (nudeguoninta) įrankinė medžiaga. Jame yra oksidai, nitridai.

3 - iasis sluoksnis – tai įtrūkimai. Šie struktūriniai pakitimai vyksta įrankį galandant, veikiant apkrovoms ir temperatūrai.

4 - asis – tai įrankinės medžiagos sluoksnis, kuriame nėra struktūrinių pakitimų.

Suvedant įrankio ašmenis abrazyviniais diskais, galastuvais ar juostomis 1 – ojo sluoksnio storis nekinta, 2 – ojo ir 3 – iojo sluoksnių storiai mažėja ir tuo daugiau kuo mažesnis slėgis ir temperatūra yra suvedimo metu.

Bendrasis pakitusio sluoksnio storis maždaug toks:

– po rupaus šlifavimo 12–75 μm;

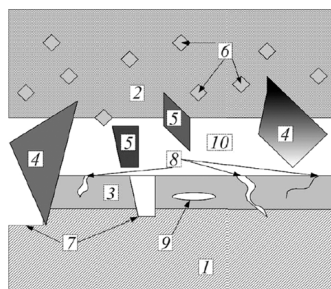
– po glotnaus šlifavimo 2–25 μm;

– po poliravimo 0,2 μm.

Paviršinis sluoksnis yra įtemptoje būklėje. Liekamieji įtempiai po mechaninio apdirbimo gali siekti 1000 MPa, gali būti tempimo arba gniuždymo. Įrankio galandimo metu veikiant dideliems tempimo įtempiams gali susidaryti įtrūkimai.

Įrankio paviršinių sluoksnių būklė nėra stabili, bet palaipsniui keičiasi pradedant nuo gamybos operacijų ir baigiant jo dilimo procesu eksploatuojant. Praktikoje paprastai reglamentuojama paviršinių sluoksnių būklė, kuri susidaro kietinant arba galandant jo darbinę dalį. Mažiau kreipiamas dėmesys į paviršinių sluoksnių pasikeitimus įrankiui dylant. Tačiau šiame periode kaip tik ir susidaro pastovi pusiausvyrinė kontaktuojančių paviršių būklė, priklausanti nuo įrankio darbinių paviršių ir apdirbamos medžiagos trinties sąlygų. Ši paviršių būklė kaip tik ir nulemia jų pasipriešinimą dilimui [22].

29 paveiksle pavaizduota sąveika tarp pjoviklio pjaunančiosios briaunos, pjoviklio dilimo produktų ir apdirbamos medienos.



29 pav. Medienos ir pjoviklio dilimo produktų kontaktas su ašmenimis; 1 – nepakitusi įrankinė medžiaga; 2 – mediena; 3 – oksido sluoksnis; 4 – išorinės abrazyvinės dalelės; 5 – nuo pjoviklio atsiskyrusios abrazyvinės dalelės; 6 – natūralios medienoje esančios abrazyvinės dalelės; 7 – juvenilinis įrankinės medžiagos paviršius; 8 – korozijos paveiktos zonos; 9 – vandenilio susikaupimo zona; 10 – koroduojanti terpė [25]

Dylantys metalinio įrankio darbiniai paviršiai, trimis skirtingomis fazėmis, trinties būdu sąveikauja su apdirbama mediena:

1. ant darbinių paviršių susiformuoja oksido sluoksnis;
2. įvyksta oksido sluoksnio mechaninis ar cheminis skaidymas;
3. įvyksta suskaidyto oksido sluoksnio reakcija su medienos ekstraktinėm medžiagom.

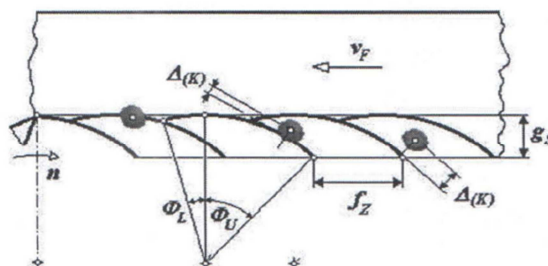
Oksido sluoksnis susidaro pjoviklio paviršiuje dėl metalo ir ore esančio deguonies sąveikos. Šis sluoksnis atsiluoksniuoja nuo paviršiaus ir tokiu būdu keičia pjoviklio paviršiaus šiurkštumo rodiklius. Oksido sluoksnį sudaro FeO vustitas (geležies II oksidas), Fe_3O_4 magnetitas ir Fe_2O_3 hematitas (geležies III oksidas). Šių $FeO : Fe_3O_4 : Fe_2O_3$ oksidų storių santykis yra artimas 100:10:1 ir jų savybės žymiai skiriasi nuo pjoviklio medžiagos [25].

Įrankio paviršinių sluoksnių dilimą padidina tai, kad trinties zonoje esant dideliems slėgiams ir aukštomis temperatūroms mediena pradeda skaidytis. Proceso pradžioje, esant 100 – 150°C temperatūrai iš medienos pradeda garuoti vanduo, vėliau esant 275 - 300°C temperatūrai, pradeda skaidytis hemiceliuliozė, toliau esant apytiksliai 400°C temperatūrai, pradeda irti medienos ląsteliena, dėl ko išsiskiria rūgštys, alkoholis ir dervos [25].

1.5.2. Abrazyvinis dilimas

Abrazyvinis dilimas atsiranda dėl kietų dalelių slydimo ar judėjimo tarp dviejų tarpusavyje paslankiai kontaktuojančių, įrankio ir apdirbamo ruošinio paviršių. Skirtingos medienos rūšys visada savyje turi skirtingą kiekį mineralinių teršalų, kurie gali būti išgryninti deginant medieną. Paprastai šios dalelės yra mažesnės nei 50 μm . Įrankio ašmenis ypač neigiamai veikia silicio (Si) dalelės, kurių priklausomai nuo medienos rūšies gali būti nuo 0,1 iki 10 g viename medienos kilograme. Medienos tankis taip pat daro įtaką, mechaniniam įrankio ašmenų dilimui. Didesnio tankio mediena yra kietesnė ir sąlygoja didesnę trintį tarp drožlės ir įrankio priekinio paviršiaus. Įrankio abrazyvinio dilimo dydis yra proporcingas nupjaunamos drožlės ilgiui ir yra tiesiogiai susijęs su pjovimo greičiu [23].

Pjovimo proceso metu mechaninė trintis sąlygoja įrankinės medžiagos dilimą, dėl ko pjoviklio ir apdirbamos medžiagos kontakto zonoje atsiranda aukšta temperatūra. Ji gali viršyti įrankio terminio stabilumo didžiausią leistiną temperatūrą, ko pasekmėje gali pradėti silpnėti ryšiai tarp įrankinės medžiagos dalelių. Dėl šių terminio irimo produktų kyla aukštų temperatūrų sukelta įrankio korozija. Tuo pat metu įrankį veikia abrazyvinis dilimas, kuris atsiranda dėl įrankio trinties pjovimo proceso metu į medienoje esančias įvairaus dydžio, formos ir cheminės sudėties mineralines daleles. Dalelės nėra stipriai prisitvirtinusios prie medžiagos apdirbamo paviršiaus, todėl pjovimo metu, stumiamos įrankio, judėdamos ir sukdamosis apie savo ašį jos trinasi į įrankio paviršių. Kiekviena mineralinė dalelė priklausomai nuo jos dydžio ir kontakto su įrankiu būdo, sukelia skirtingą įrankio abrazyvinio dilimo procesą (30 pav.) [26].



30 pav. Įrankio pjaunamosios briaunos ir mineralinių dalelių kontakto būdai. Čia: n – įrankio sukimosi kryptis; v_F – ruošinio pastūmos kryptis; f_z – pastūma vienam pjovikliui; $\Delta(K)$ – atstumas nuo mineralinės dalelės ašies iki pjaunamosios briaunos judėjimo trajektorijos [26]

Esant vienodo dydžio ir geometrinės formos mineralinėms dalelėms, didžiausią pjaunančiosios briaunos dilimo efektą duos ašmenų kontaktas į mineralinės dalelės centrinę ašį [26].

1.5.3. Triboelektrinis įrankių dilimas

Pjovimo proceso metu per ruošinį buvo paleista aukštos įtampos 1500 V nuolatinė elektros srovė ir pamatuotas įrankių ašmenų išdilimo laipsnis.

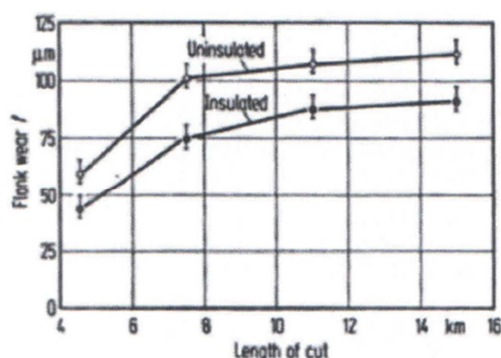
Po šio tyrimo galima padaryti tokius pastebėjimus:

1) Įrankio ašmenų dilimas buvo gerokai mažesnis, kai įrankis yra apsaugotas nuo elektros krūvio susidarymo, pjaunant drėgną ir orasausę medieną;

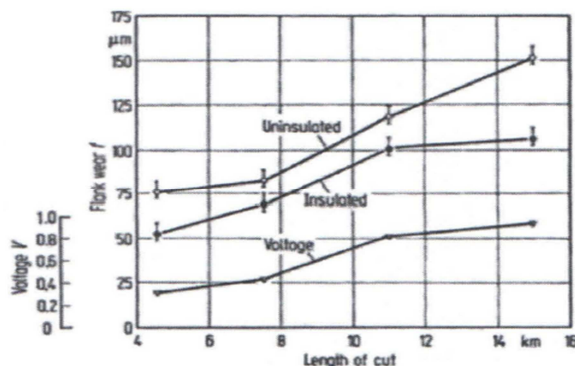
2) Pastebėtas artimas ryšys tarp pjovimo metu pjovimo zonoje susidariusio elektrinio krūvio ir įrankio nusidėvėjimo, pjaunant drėgną ir orasausę medieną;

3) Pastebėtas skirtingas įrankių nusidėvėjimo laipsnis, pjaunant drėgną ir orasausę medieną;

Taigi pjaunant orasausę medieną įrankio pjaunančiosios briaunos dilimą sąlygoja susidariusios elektrocheminės reakcijos. Pjaunant drėgną medieną įrankis, medienoje esančios drėgmės, yra tarsi apsaugotas nuo elektrocheminių reiškinių susidarymo. Taip įrankio, elektrocheminių reiškinių sukeltam, elektros krūviui neleidžiama tekėti "pjovimo zona - pjoviklis - įrengimas" grandine ir taip sumažėja įrankio dilimas. Čia medienos pjovimo įrankį veikia ne abrazyvinė trintis, bet kiti veiksniai, kurių sukeltas įrankių dilimas yra labai panašių dydžių, kaip ir abrazyvinės trinties sukeltas dilimas. Jei abrazyvinė trintis būtų vinintelė įrankių dilimo priežastis, tai vienu įrankiu orasausės medienos būtų galima apdirbti gerokai daugiau neidrėgnos. Tačiau kreivės 31 ir 32 paveiksluose šių išvadų nepatvirtina [27].



31 pav. Įrankių dilimas pagal priekinį ir užpakalinį paviršius, pjaunant tik ką nukirstą medieną izoliuotu ir neizoliuotu įrankiais [27]

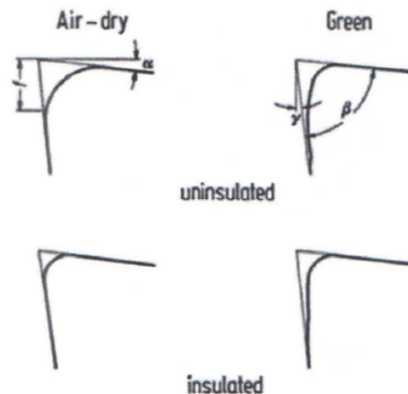


32 pav. Įrankių dilimas pagal priekinį ir užpakalinį paviršius pjaunant orasausę medieną izoliuotu ir neizoliuotu įrankiais [27]

Akivaizdu, kad pjaunant orasausę medieną, įrankio tarnavimo laikas pailgėja, kai mediena apdirbama elektrai nelaidžiais įrankiais. Didelė sausos medienos elektrinė varža tarsi nukreipia

elektros krūviui kelią: "pjovimo zona - pjoviklis - įrengimas" ir elektros srovei tiesiog nėra kur kitur nutekėti. Tačiau pastebėta, kad nelaidūs elektrai pjovikliui dėl trinties į medieną vis tiek sukuria elektrostatinis laukus.

Gali būti keletas paaiškinimų, kaip statinis krūvis didina įrankio nusidėvėjimą. Alekseev aprašė, kad darbo metu elektriniai krūviai atsiranda dėl pjovimo režimų kitimo. Šio reiškinio paaiškinimas yra tas, kad pakinta trinties dydis tarp apdirbamos medžiagos ir įrankio pjoviklių. Todėl pjovimo režimus reikia pritaikyti taip, kad nesusidarytų elektrostatiniai krūviai. Įrankių nusidėvėjimas, veikiant elektriniams krūviams parodytas 15 paveiksle.



33 pav. Tipinis HSS įrankių pjaunančiosios briaunos nusidėvėjimas pjaunant šlapią ir orasausę medieną izoliuotais ir neizoliuotais, veikiamais elektros krūvio pjovikliais. Buvo tekinama kedro mediena : pjovimo greitis 4 m/s, pastūma vienam ruošinio apsisukimui 0,125 mm, nupjaunamos drožlės storis 1,5 mm [27]

Įrankio pjaunančio orasausią medieną ašmenų suapvalinimo spindulys yra labiau simetriškas ašmenų nusmailinimo kampo pusiaukampinėje. Pjaunant šlapią medieną, dominuoja pjovimo įrankio dilimas pagal priekinį paviršių. Šis pjaunančiosios briaunos profilių skirtumas yra sąlygotas skirtingų dilimo mechanizmų [27].

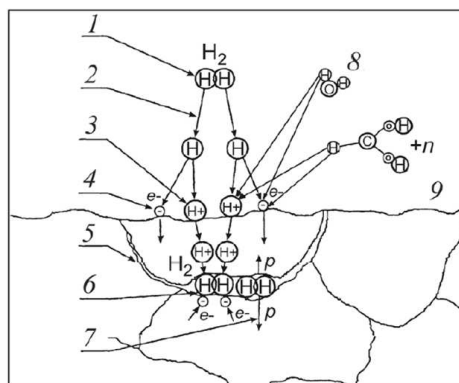
Pastebėta, kad pjovimo proceso metu įsielektrina pjoviklio apdirbamos medžiagos paviršiai. Pagal E. G. Ivanovskio tyrimus įsielektrinimo esmė yra tokia. Susidarant naujiems paviršiams, medienoje nutrūksta molekuliniai ryšiai ir atsiskyrimo paviršiuose susidaro elektriniai krūviai. Teigiamo ir neigiamo krūvio susidarymo kiekvienoje molekulėje tikimybė yra vienoda. Todėl susidaro daugybė įelektrintų taškų su atsitiktiniu krūvių pasiskirstymu. Ant pjoviklio paviršių taip pat susidaro elektriniai krūviai tikrai skirtingo ženklo. Šie krūviai juda pjoviklio paviršiumi kartu su drožle arba apdirbtu paviršiumi. Tačiau kiekvienas krūvis yra labai mažas, ir jo veikimas gali būti pastebimas tikrai susikaupus pakankamam elektros kiekiui. Medieną deformuojant, susidaro pjezokrūviai, kurių dydis ir ženklas priklauso nuo medienos deformavimo krypties ir jėgos. Pjoviklio paviršiuose susidaro krūviai priešingo ženklo. Todėl sistema „apdirbama medžiaga - pjovimo įrankis“ veikia kaip kondensatorius. Pjezo krūvio dydis mažėja tolstant nuo ašmenų. Jeigu pjezo krūvis nesumažėja iki nulio, atsiskiriant drožlei su priekiniu paviršiumi, atsiranda kibirkštis. Besitrinant pjovikliui su apdirbama mediena susidaro tribokrūviai, kurių dydis priklauso nuo medienos savybių, slėgio kontakto vietoje, slydimo greičio ir slydimo kelio. Šie krūviai didėja nuo ašmenų iki kontakto su mediena pabaigos (didėjant trinties keliui). Kibirkšties susidarymas šiuo atveju yra tikimėnis negu pjezokrūvių atveju. Sumuojantis pjezo ir tribokrūviams, trinties paviršiuose susidaro neutralizacijos srovės ir kibirkštiniai iškrūviai [28].

Kibirkštinių krūvių susidarymas mažina pjovimo įrankio patvarumą. Pjovimo proceso metu tenka juos slopinti. Tam pjovimo zonoje gali būti sudaromas vandens ar tepalo rūkas, arba jonizuojamas oras [28].

1.5.4. Elektrocheminis dilimas

Kartu su elektriniais reiškiniiais pjovimo proceso metu vyksta sudėtingi elektrocheminiai procesai, kadangi pjaunant šlapią medieną, tarp pjoviklio paviršių ir apdirbamų paviršių, veikiant pjovimo slėgiui, išsiskiria drėgmė. Drėgmė yra geras elektros laidininkas ir yra padidinto rūgštingumo. Vyksta elektrocheminė reakcija tarp pjovimo įrankio medžiagos ir apdirbamos medžiagos. Elektrocheminėms reakcijoms vykstančioms pjovimo proceso metu būdinga tai, kad elektrolitas visą laiką atsinaujina. Todėl elektrocheminių procesų greitis žymiai padidėja. Pjaunant medieną, pjovimo zonoje susidaro aukšta temperatūra, susidaro apdirbamos medžiagos skystoji fazė, susidaro triboelektra. Esant pjovimo įrankio medžiagos įvairioms struktūrinėms ypatybėms, pjovimo zonoje gali vykti ne tik įvairūs tribotechniniai ir elektriniai, bet ir elektrocheminiai procesai, kurie turi dominuojančią įtaką įrankio patvarumui. Paviršių oksidacijos procesas suintensyvėja veikiant aukštomis temperatūroms, padidėja metalo plastiškumas, susidaro sąlygos greitesniems difuzijos procesams, įvyksta įrankio medžiagos atskirų struktūrų cheminis išsėdinimas. Cheminėse ir elektrocheminėse reakcijose, vykstančiose pjovimo įrankio ir apdirbamos medžiagos kontakto zonose, dalyvauja medienos mechaninės ir terminės destruktijos produktai. Vykstant medienos mechaninei destruktijai, atsiranda laisvieji radikalai, kurie turi ypatybę jungtis su įrankio medžiaga. Tokiu būdu susidaro cheminiai junginiai, kurie silpnai sujungti su metaliniu paviršiumi ir lengvai pašalinami iš trinties zonos kaip dilimo produktai. Termodestruktijos procese susidaro dujos, vandens garai ir lakiosios organinės rūgštys (skruzdėlių ir acto). Veikiant termodestruktijos medžiagoms, atsiranda pjovimo įrankio korozijos procesas. Vykstant koroziniams pažeidimams, pjovimo įrankio ašmenų zonoje susidaro mikroįtrūkimai, kurie yra trapios irimo šaltiniai. Pjovimo proceso metu būdinga netolygi korozija. Ji turi žymiai didesnę įtaką pasipriešinimui trapijam irimui negu tolygioji.

Taip pat yra nustatyta, kad pjaunant medieną, pjovimo įrankio medžiaga prisotinama dujinėmis medžiagomis: vandeniliu, deguonimi, azotu. Įrankio patvarumui didžiausią įtaką turi vandenilis. Prisotinant plieną vandeniliu, laisvasis vandenilis reaguoja su Fe_3C (geležies karbidu). Vykstant šiai reakcijai, kuri prasideda $240\text{--}330^\circ\text{C}$ temperatūroje, cementitas virsta smulkiadispersiniu feritu, susidarant metano dujoms. Sumažėjus karbidų koncentracijai pliene pablogėja jo mechaninės charakteristikos, tuo pačiu ir patvarumas dilimui. Susidarę metano dujos nedifunduoja per metalo gardelę, todėl viduje metalo susidaro tuštumos ir įrankis gali sutrūkinėti. Taip pat vandeniliui sąveikaujant su oksido plėvelėmis, apsaugančiomis metalą nuo frikcinių pažeidimų, jos suyra ir įrankio dilimas padidėja. Išivandenilinimo procesų vykimui didelę įtaką turi pjovimo įrankių medžiagų kietumas, įtemptumo būklė, geometrinis ir struktūrinis vientisumas, paviršių šiurkštumas. [28].



34 pav. Veiksniai įtakoiantys korozinio – mechaninio dilimo intensyvumą. Čia: 1 – vandenilio molekulė; 2 – vandenilio molekulė skyla; 3 – vandenilio protonas; 4 – vandenilio elektronas; 5 – įtrūkis pjoviklio paviršiuje; 6 – susiformuoja vandens molekulės; 7 – vanduo; 8 – organinė medžiaga [25]

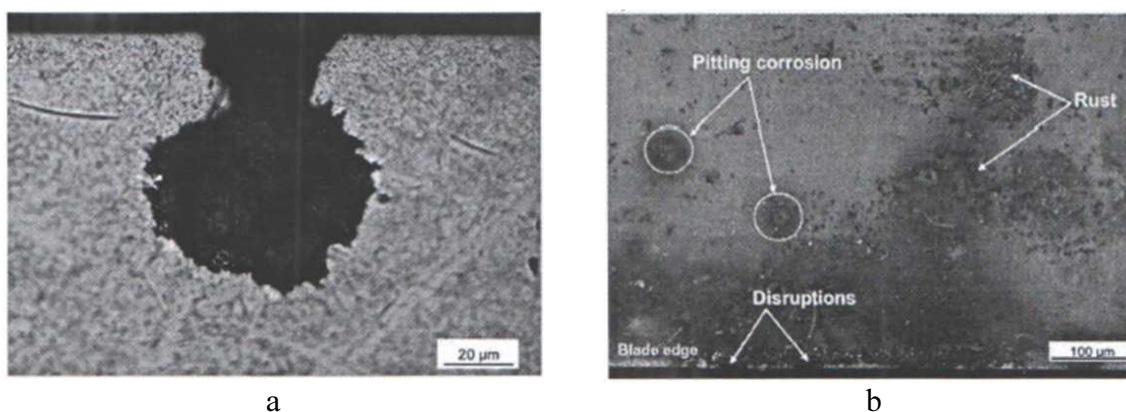
Visų procesų, vykstančių pjovimo įrankio paviršiniuose sluoksniuose, analizė parodo, kad tribocheminės ir elektrocheminės reakcijos yra svarbūs veiksniai, nulemiantys įrankio patvarumą [28].

Elektrocheminis nusidėvėjimas atsiranda ne tik dėl drėgmės, bet ir dėl medienoje esančių ekstraktinių medžiagų tokių kaip dervų, sūkų, cukrų, krakmolo, alkaloidų bei taninų. Dauguma ekstraktinių medžiagų yra reaktyvūs mišiniai reaguojantys su įrankio metalu. Medienos rūgštingumas t.y. pH dydis turi didelę reikšmę elektrocheminiam nusidėvėjimui. Pjovimo proceso metu visada vyksta elektrinės iškvos prisidedančios prie įrankio nusidėvėjimo proceso. Bandymai parodė, kad neigiami elektriniai krūviai nustatyti tarp įrankio ir apdirbamo medienos paviršiaus gali slopinti, o teigiami elektriniai krūviai gali padidinti įrankio nusidėvėjimo laipsnį. Elektrocheminio nusidėvėjimo dydis priklauso nuo įrankio ir elektrolito sąveikos laiko.

Neabejotinai įrankių plienų lydinių komponentai taip pat turi įtakos pjaunančiosios briaunos elektrocheminiam dilimui [23].

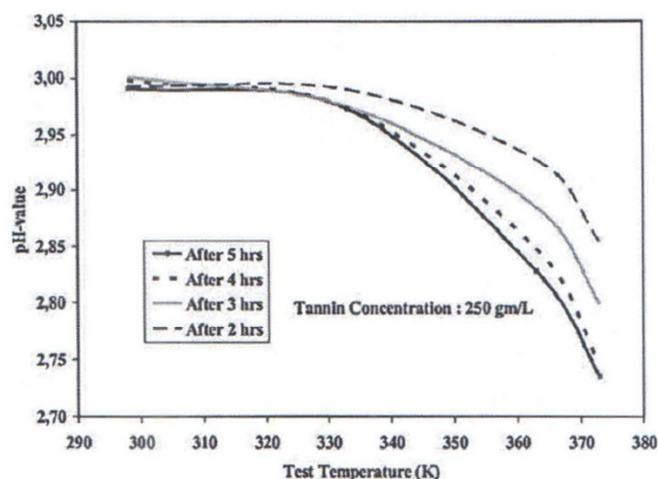
1.5.5. Medienos ekstraktinių medžiagų sukeliama korozija

Tiriant medienos pjovimo įrankių ašmenų išdilusius paviršius buvo aptikti įrankio metalo paviršiuje atsiradę ištrupėjimai. Paaiškėjo, kad korozijos poveikis įrankio tarnavimo laiką sutrumpina labiau nei mechaninis įrankių dilimas. Kadangi mechaniškai išdilusių įrankių geometrija gali būti lengvai ištaisyta galandant įrankį. Bet jei kartą įrankio ašmenis paveikė korozija to padaryti faktiškai neįmanoma, nes įrankio ašmenys galandami dažniausiai pagal vieną priekinį ar užpakalinį paviršių ir kitame paviršiuje lieka korozijos sukelti ištrupėjimai, kurie įrankiui dirbant bei veikiant korozijai ir toliau didėja. Tyrimai parodė, kad skirtingų medienos rūšių ekstraktinės medžiagos sukelia skirtingo intensyvumo įrankių ašmenų koroziją. Tai atskleidė, kad vandenyje tirpios medienoje esančios rūgštys - taninai, kurios skirtingų rūšių medienoje yra vis kitokios koncentracijos yra pagrindinės ekstraktinės medžiagos sukeliančios įrankių koroziją. Pjovimo proceso metu įrankio ašmenų temperatūra didėja. Aukšta temperatūra veikia taninus ir įtakoja jų pH dydį. Tyrimai parodė, kad veikiant aukštomis temperatūroms mažėja taninų pH pusiausvyra kas sąlygoja korozinių procesų padidėjimą. Taip pat paaiškėjo, kad papildomi mechaniniai įtempiai sąlygoja taninų ir geležies oksido darinių atsiloksniavimą nuo įrankio paviršiaus, taip atidengiant naują neapsaugoto metalo sluoksnį korozijai. Tai sąlygoja tolesnį korozijos plėtimąsi [29].



35 pav. Korozija ir jos sukelti mikroplyšiai medienos apdirbimo įrankiuose: a). Kraterio skersinis pjūvis; b) medienos pjovimo įrankio ašmenys. Čia: Pitting corrosion – korozijos sukelti krateriai; Rust – korozijos apimtas paviršius; Disruptions – pjaunančiosios briaunos ištrupėjimai [29]

Esant 210°C temperatūrai taninai pradeda skilti, bet kaip jų skilimo produktas išsiskiria galo ir kitos rūgštys [29].



36 pav. Temperatūra, kurioje pjovimo zonoje medienoje mažėja pH lygis. Čia: pH value – pH dydis; Test temperature – temperatūra [29]

Kaip parodyta 18 paveiksle, kritinė temperatūra, kurioje pH dydis pradeda smarkiai mažėti yra 333 ir 363 K (60 - 90°C). Tai yra temperatūra, kuri dažniausiai pasiekama, įrankiui apdirbant medieną. Ir manoma didesnė taninų koncentracija medienoje sąlygoja mažesnį pH lygį, kas įgalina kilti didesnę koroziją ašmenyse. Šis procesas galioja ir esant aukštomis temperatūromoms. Pradėjus kristi pH lygiui didėja korozijos lygis. Temperatūroje aukštesnėje nei 373 K (100°C), pH dydis staigiai krinta, kas reiškia staigų korozijos lygio padidėjimą. Šis procesas yra rūgščių taninų komponentų reakcijos su įrankio plieniu pasekmė, kuri yra nenutrūkstama didelėms taninų molekulėms skylant ir sudarant naujas rūgščias medžiagas. Didėjant temperatūrai, korozijos procesas tik sustiprinamas. Taninai reaguoja su metalo rūdimis $FeO(OH)$ ir sudaro taninų ir metalo masę, kuri sekančios oksidacijos metu virsta į dar kitokios struktūros taninų - metalo masę. Taninų ir metalo oksidacijos masė yra mėlynai juodos spalvos ir susidaro įrankio paviršiuje. Dėl rūgščios aplinkos ir mechaninių įtempių ši masė atskyla nuo įrankio, atidengdama naujus metalo sluoksnius korozijai [29].

1.5.6. Aukštatemperatūrės korozijos

Korozijos yra dažnas įrankių nusidėvėjimo mechanizmas, pasitaikantis pjovimo zonoje, veikiant aukštomis temperatūroms. Priklausomai nuo pjovimo greičio ir kitų pjovimo režimo parametrų pjovimo zonoje, gali atsirasti apie 800 – 900°C temperatūra. Tokios temperatūros gali sukelti įrankio plieno oksidaciją. Skirtingų rūšių mediena gali sukelti skirtingo dydžio oksidacijos procesus. Oksidacijos intensyvumas, veikiant aukštomis temperatūroms, taip pat priklauso ir nuo plieno sudėties iš kurio pagamintas įrankis. Nustatyta, kad kietlydinio (WC) įrankiuose, kuriuos sudaro volframo karbidas, pagrindinė korozijos priežastis yra rišančiosios medžiagos, kurią sudaro kobaltas. Kobalto oksidacija pablogina medžiagos paviršinių sluoksnių struktūrą.

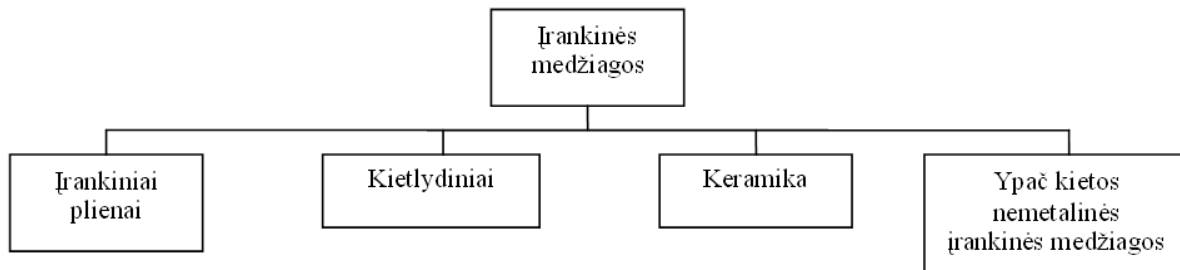
Dažnai veikiant aukštatemperatūroms korozijoms, įrankio paviršiniame sluoksnyje susidaro druskų nuosėdos. Ištyrus šias nuosėdas, paaiškėjo, kad tai yra iš medienos išsiskyres K ir Ca. Šie du elementai, esantys medienoje kaip priemaišos, esant aukštomis temperatūroms tik padidina korozijos procesus. Dar, kaip priemaišos medienoje yra nemažas kiekis ir anglies, kuri veikiant aukštomis temperatūroms taip pat padidina korozijos procesus. Elektroniniu mikroskopu ištyrus greitapjovio plieno (HS) ašmenis, pastebėta, kad matomos dėmės ir plastinės deformacijos yra atsiradusios veikiant aukštomis temperatūroms ir kad šie defektai įtakoja įrankio dilimą.

Kiekvienas įrankių dilimo procesas, paaiškina prieš tai veikusį įrankių dilimo mechanizmą, priklausantį nuo specifinių darbo sąlygų. Jie gali sąveikauti tarpusavy ar būti kitų procesų dalimi. Pavyzdžiui abrazyvinis dilimas gali atsirasti nuo įrankyje ar ant įrankio veikiant aukštomis temperatūroms korozijos proceso metu, susidariusių oksidų, karbidų, nitridų ir kitų mišinių.

Medienos medžiagose esantys klijai ar apdailinės dangos įtakoja temperatūros išaugimą pjovimo zonoje. Chloridai ir sulfatinės druskos, esantys klijuose ir apdailos medžiagose, sudaro abrazyvines daleles ir paspartina aukštatemperatūros korozijas. Todėl apdirbant apdailintas ir neapdailintas medienos medžiagų plokštes, įrankiai pagaminti iš greitapjovio plieno dyla ypač greitai [23].

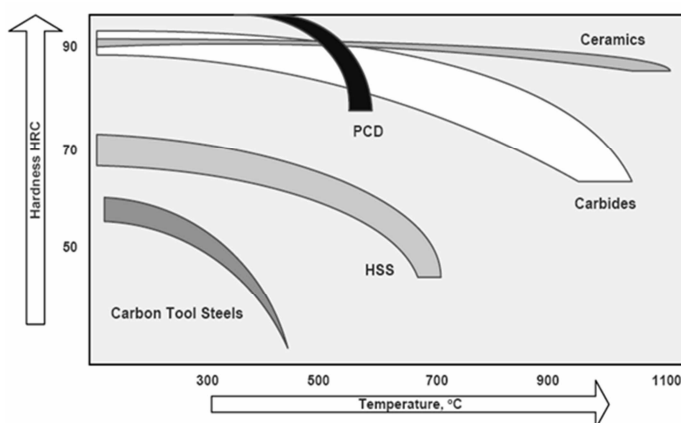
1.6. Medienos apdirbimo įrankių medžiagos ir jų savybės

Medienos apdirbimo įrankines medžiagas, atsižvelgiant į jų sudėtį, galima suskirstyti į keturias pagrindines grupes. Jų klasifikacija pavaizduota 37 paveiksle.

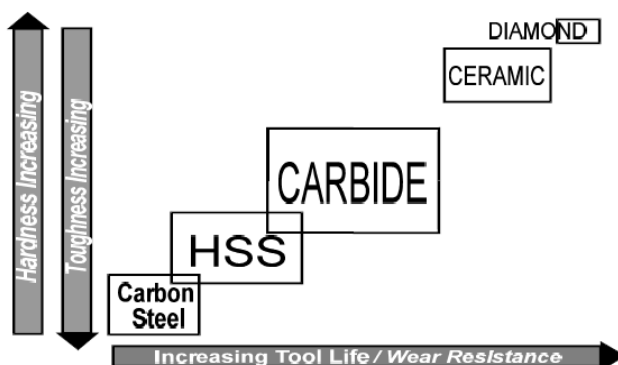


37 pav. Įrankinių medžiagų klasifikacija [30]

51 ir 52 paveiksluose palygintos įvairių įrankinių medžiagų fizikinės ir mechaninės savybės.



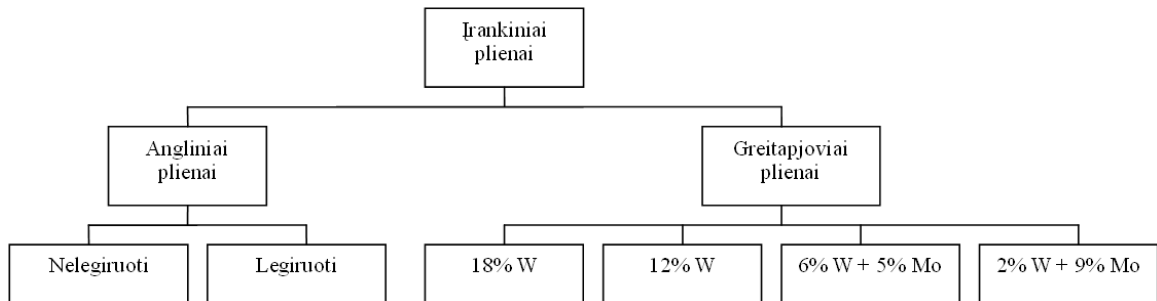
38 pav. Temperatūros įtaka įrankinių medžiagų kietumui. Čia: Hardness- kietis; Temperature – temperatūra; Carbon tool steels - anglinis įrankinis plienas; Carbides – kietlydiniai; PCD - polikristalinis deimantas; Ceramics - metalo keramika [30]



39 pav. Įrankinių medžiagų patvarumas. Čia: Hardness increasing – kietumas; Toughness increasing – tšumas; Increasing tool life / wear resistance – ilgaamžiškumas / atsparumas dilimui [39]

1.6.1. Įrankiniai plienai

Įrankiniai plienai, tai aukštos kokybės plienai, kurių fizikinių ir mechaninių savybių pakanka apdirbti kitas medžiagas. Jie skirstomi į šalto apdirbimo ir greitapjovius plienus. Šalto apdirbimo plienai naudojami, kai apdirbant medžiagas pjovimo zonoje susidariusi temperatūra neviršija 200°C. Greitapjoviai plienai naudojami kai temperatūra pjovimo zonoje siekia daugiau nei 600°C. Šių plienų savybės ir panaudojimas priklauso nuo sudėties [30].



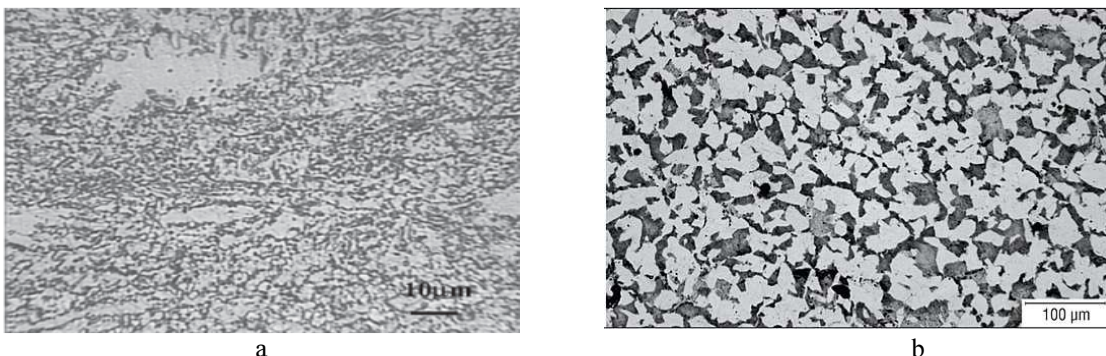
40 pav. Įrankinių plienų klasifikacija [30]

1.6.1.1. Šaltojo apdirbimo angliniai nelegiruoti plienai

Angliniai nelegiruoti plienai yra daug kur naudojami. Jų kietis siekia 62 – 64 HRC. Tačiau jis pradeda mažėti įrankiui įkaitus iki 190 – 200°C. Anglinių nelegiruotų plienų sudėtyje yra 0.6 – 1.3 % anglies (C). Kartais, norint išvengti netolygaus įrankių paviršiaus kiečio, jų sudėtis papildoma chromu (Cr). Kad būtų smulkesni grūdėliai gali būti įdedama vanadžio (V). Taip pat jų sudėtyje yra nedidelis kiekis mangano (Mn) ir sieros (Si). Kiečiausi ir atspariausi dilimui yra angliniai plienai, kuriuose yra daugiausiai C. Iš jų gaminami rankinio apdirbimo įrankiai [30].

1.6.1.2. Šaltojo apdirbimo angliniai legiruoti plienai

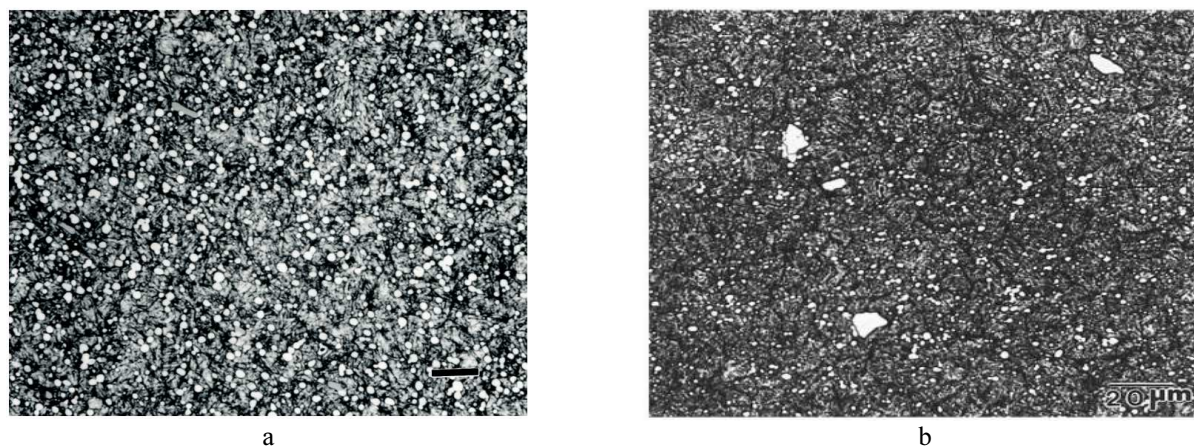
Šalto apdirbimo legiruoti plienai dar yra vadinami mažai legiruotais angliniais plienais. Jų sudėtyje yra ne daugiau kaip 5 % legiruojančių elementų. Šie plienai yra legiruojami Cr, W, Mn, Si ir V. Už nelegiruotus plienus, šie plienai pranašesni tuo, kad pasižymi didesniu kiečiu ir didesniu, daugiau nei 200°C, temperatūriniu stabilumu. Jų kietis siekia 65 – 67 HRC. Šie plienai naudojami kaltų, dildžių, plėstuvų ir medienos apdirbimo įrankių gamybai. Legiruotų plienų kietis ir ilgaamžiškumas priklauso nuo anglies kiekio. Šiems plienams būdingas karbidinis netolygumas [30, 31].



41 pav. Šalto apdirbimo plienų mikrostruktūra: a – nelegiruotas anglinis plienas [32]; b – 5120 markės legiruotas anglinis plienas [33]

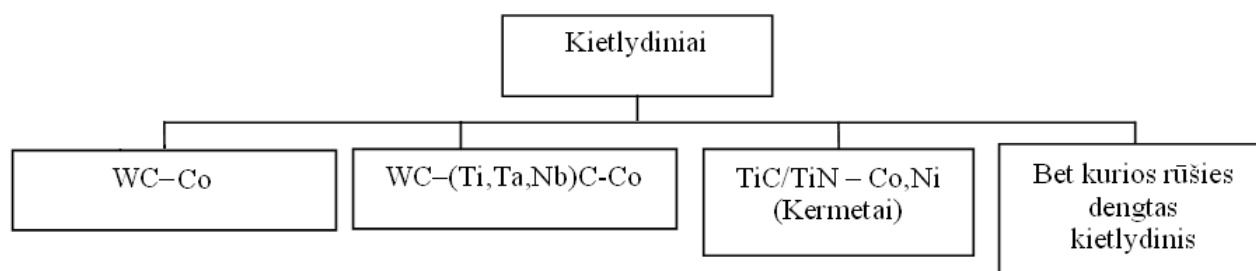
1.6.2. Greitapjoviai plienai

Greitapjoviai plienai yra gausiai legiruoti plienai. Pagrindiniai jų legiravimo elementai yra volframas (W), molibdenas (Mo), vanadis (V), kobaltas (Co) ir chromas (Cr). Šių plienų kietis yra 60 – 67 HRC, o šiluminis patvarumas išlieka iki 640°C. Įrankiais, pagamintais iš šių plienų, galima apdirbti medžiagas dideliais greičiais ir didelėmis jėgomis. Dėl šių savybių greitapjoviai plienai yra plačiai naudojami, ypač įrankių su mažais ašmenų nusmailinimo kampais gamybai. Palyginti su mažai legiruotų plienų įrankiais, šiais įrankiais apdirbimo našumas padidėja 2 – 5 kartus. Greitapjoviai plienai žymimi raidėmis HS, šalia prirašant legiruojančių elementų W-Mo-V-Co kiekį. Atsižvelgiant į W ir Mo kiekį, HS plienai skirstomi į keturias grupes. Pirmą grupę sudaro plienai, kurių sudėtyje yra didelis kiekis W. Šios grupės įrankiai naudojami didelio stiprio plienų, lietos geležies, spalvotųjų metalų ir nemetalinių medžiagų rupiam ir glotniam apdirbimui. Jie pasižymi plastiškumu. Antros rūšies plienai naudojami visų rūšių metalo tekimo ir frezavimo įrankių gamybai. Jie pasižymi aukštu temperatūriniu stabilumu ir kiečiu. Jie skirti apdirbti grūdintiems Cr, Ni plienams ir spalvotiesiems metalams. Trečia ir ketvirta grupės skiriamos pagal W ir Mo kiekį. Dėl Mo karbidų ypatingai padidėja šių grupių plienų stipris. Jie naudojami įrankių, kuriuos veikia didelės dinaminės apkrovos, gamybai, skirtų rupiam ir galutiniam įvairių medžiagų apdirbimui. Ilgaamžiškumui padidinti, greitapjovių plienų įrankiai gali būti dengiami įvairiomis kietesnėmis, antifrikcinėmis dangomis [30].



42 pav. HS plienų mikrostruktūra: a – plienas T15 P/M (1000x) [34]; b – plienas M – 2 (500x) [35]

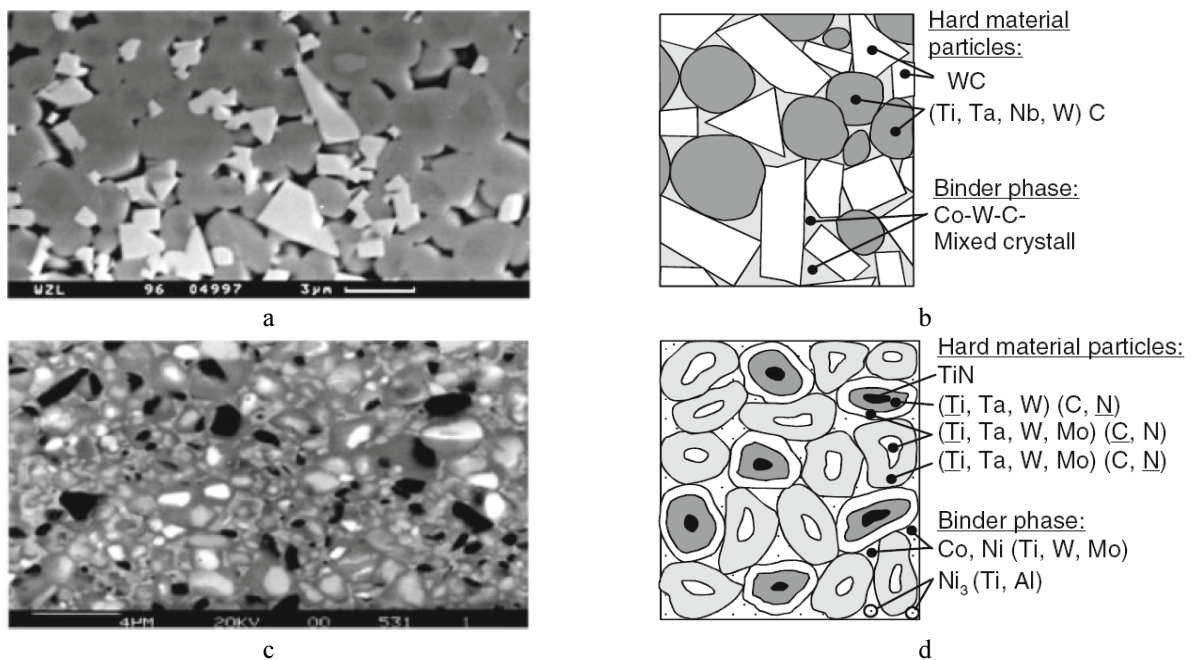
1.6.3. Kietlydiniai



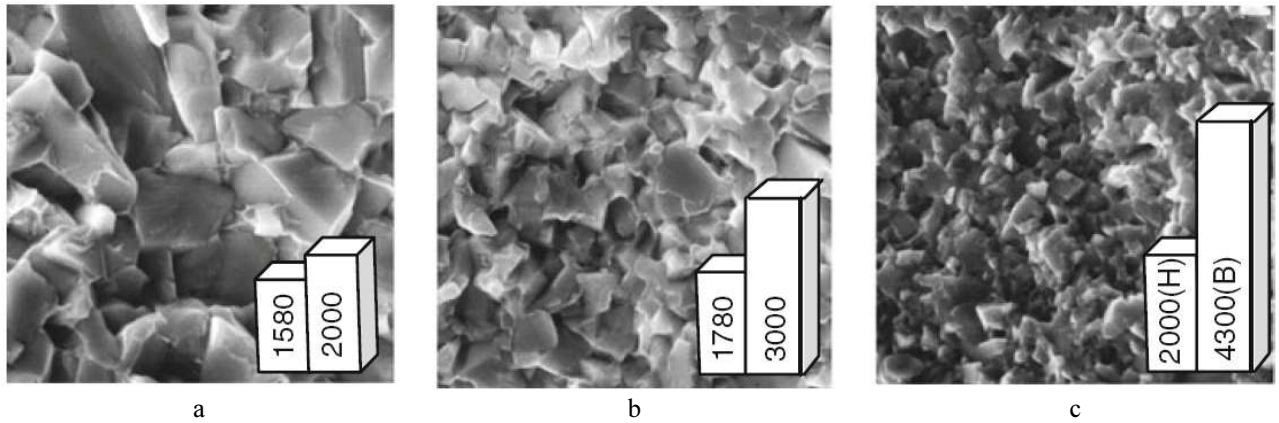
43 pav. Kietlydinių klasifikacija [30]

Kietlydiniai - tai metalų pagrindu sudarytos labai kietos ir atsparios dilimui medžiagos, kurios neminkštėja įkaitusios iki 800 - 1000°C. Didžiausią dalį sudaro įrankiams gaminti naudojami sukepintieji milteliniai kietlydiniai. Milteliniai kietlydiniai gaunami 1400 – 1500°C temperatūroje sukepinant supresuotus volframo (W), titano (Ti) bei tantalio (Ta) karbidų

miltelius su rišančiąja medžiaga – kobalto (Co) milteliais. Tokioje temperatūroje kobaltas lydosi ir stipriai suriša karbidus, sudarydamas tankią medžiagą, kurios porėtumas ne didesnis kaip 2 %. Šie kietlydiniai turi nuo 3 – 15 % Co, o likusią dalį sudaro WC grūdėliai, Kiti karbidai – niobio (Nb), cirkonio (Zr), hafnio (Hf), chromo (Cr), vanadžio (V) arba molibdeno (Mo) - naudojami retai. Rečiau pritaikoma ir kita rišančioji medžiaga – nikelis (Ni) arba geležis (Fe). Miltelinių kietlydinių kietis siekia 85 – 93 HRA. Iš jų gaminamos pjovimo įrankių darbinės dalys, taip pat smulkūs vientisi įrankiai - gražtai, frezos. Kietlydinių savybės labai priklauso nuo C ir Co santykio medžiagoje. Daugėjant Co, didėja kietlydinių atsparumas lenkimui, smūginei, bei ciklinei apkrovai, bet mažėja kietumas ir atsparumas dilimui. Kuo smulkesni grūdėliai ir kuo mažiau sudėtyje kobalto, tuo kietlydiniai atsparesni dilimui, bet mažesnis jo stiprumas ir atsparumas smūgiams. Rupiajam medienos apdirbimui bei pjovimui su smūgiais labiau tinka tasesni kietlydiniai. Volframo karbidiniai kietlydiniai yra stipriausi ir atspariausi smūginei apkrovai, bet volframas brangus ir jo trūksta. Todėl gaminami ir bevolframiniai kietlydiniai. Jų pagrindą sudaro TiC bei TiN, o rišančioji medžiaga yra Ni su Co. Šie kietlydiniai vadinami kermetais. Atsižvelgiant į apdirbamąsias medžiagas, visi kietlydiniai pagal tarptautinę (ISO) klasifikaciją skirstomi į tris grupes - P, K ir M. P grupei priskiriami kietlydiniai, iš kurių gaminami įrankiai apdirbti plieno liejiniais ir medžiagoms, kurios sudaro ištisinę drožlę. K - legiruotiems plienams ir kitoms trapioms medžiagoms, kurios sudaro briauną drožlę. M - visų grupių sunkiai apdirbamoms medžiagoms. Kiekviena grupė suskirstyta į pogrupius, žymimus skaičiais nuo 01 iki 50. Mažesniais skaičiais žymimi kietesni, dilimui atsparesni kietlydiniai, o didesniais - atsparesni smūgiams. Kietlydinio įrankiai naudojami apdirbti džiovintą įvairių rūšių masyvią medieną, įvairias klijuotas medienos medžiagas ir medienos plastikus. Medienos ir medienos medžiagų apdirbimui dažniausiai naudojami WC kietlydiniai. Kietlydinio įrankių, patvarumas ir ilgaamžiškumas padidinamas 2...4 kartus, padengus jas 5...10 mikrometrų storio titano junginių - karbido, nitrido, karbonitrido bei borido – dangomis [31].

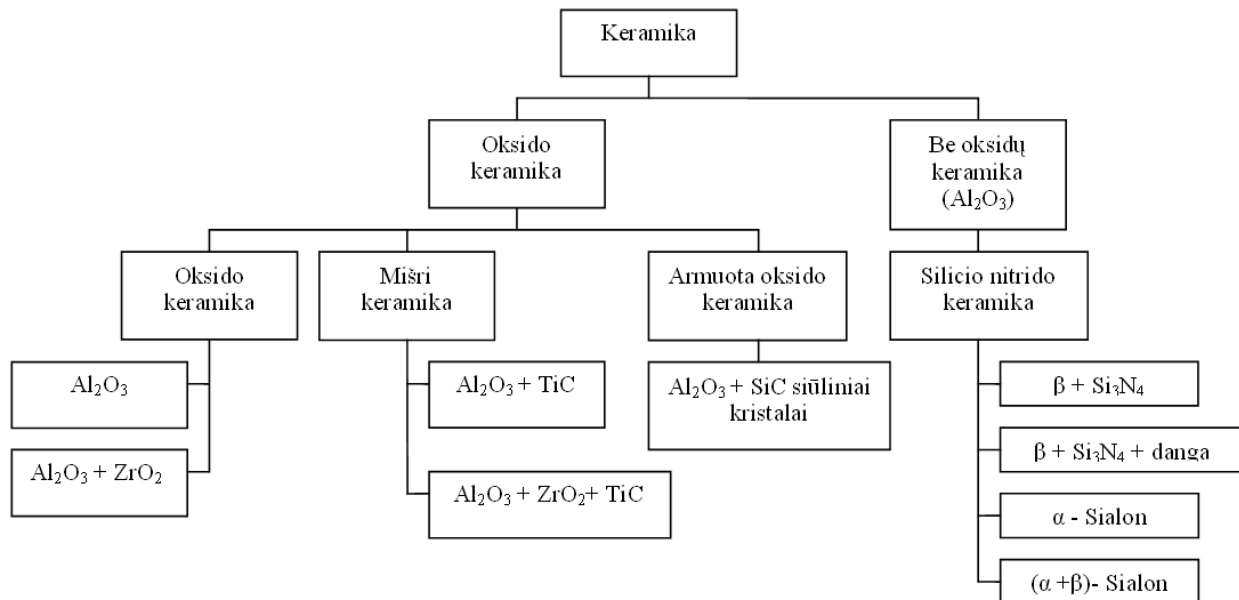


44 pav. Kietlydiniai: a – kietlydinio HW – P10 mikrostruktūra; b - kietlydinio HW – P10 mikrostruktūros schematinis vaizdavimas; c – kietlydinio HT – P15 (kermeto) mikrostruktūra; d - kietlydinio HT – P15 (kermeto) mikrostruktūros schematinis vaizdavimas; Hard material particles – kietųjų medžiagų dalelės (karbidai); Binder phase – rišančioji medžiaga [30]



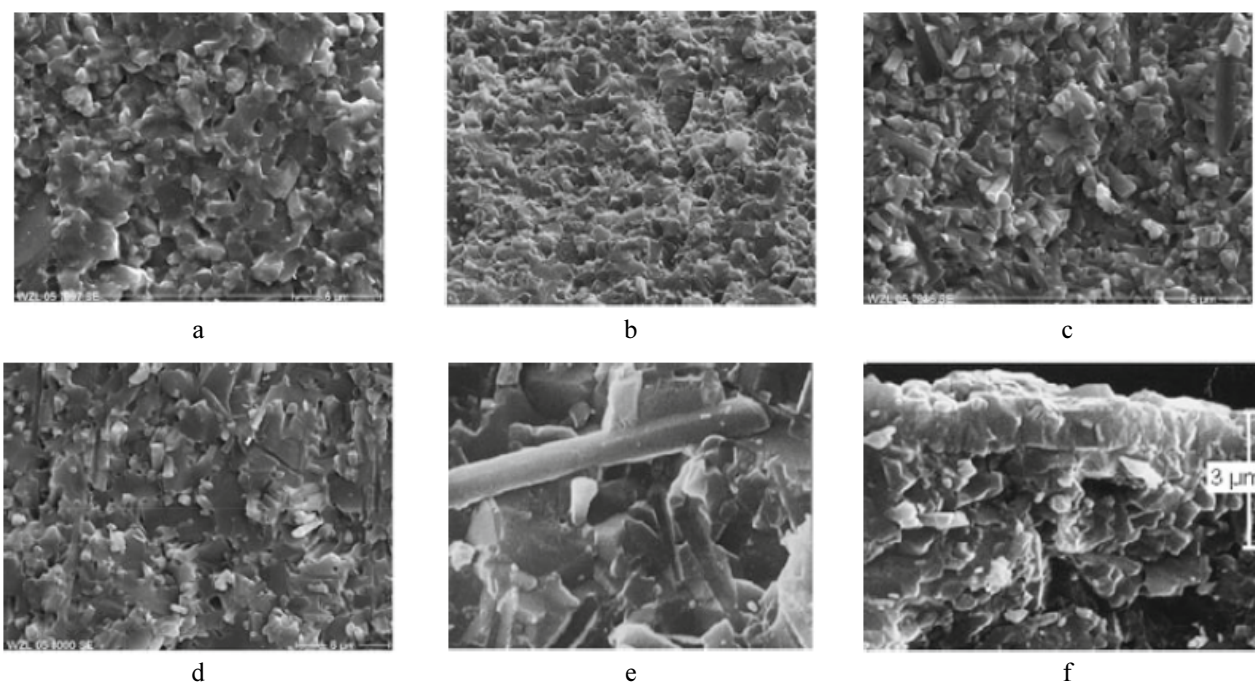
45 pav. WC karbidų grūdelių dydžio įtaka kietlydinio struktūrai ir savybėms: a – standartinės frakcijos (M) (grūdelių dydis = 2.5 – 4 μm); b – smulkios frakcijos (F) (grūdelių dydis = 1 – 1.4 μm); c – labai smulkios frakcijos (SMG) (grūdelių dydis = 0.5 – 0.7 μm); H – kietis; B – lenkiamasis stipris [30, 36]

1.6.4. Keramika



46 pav. Keraminių medžiagų klasifikacija [30]

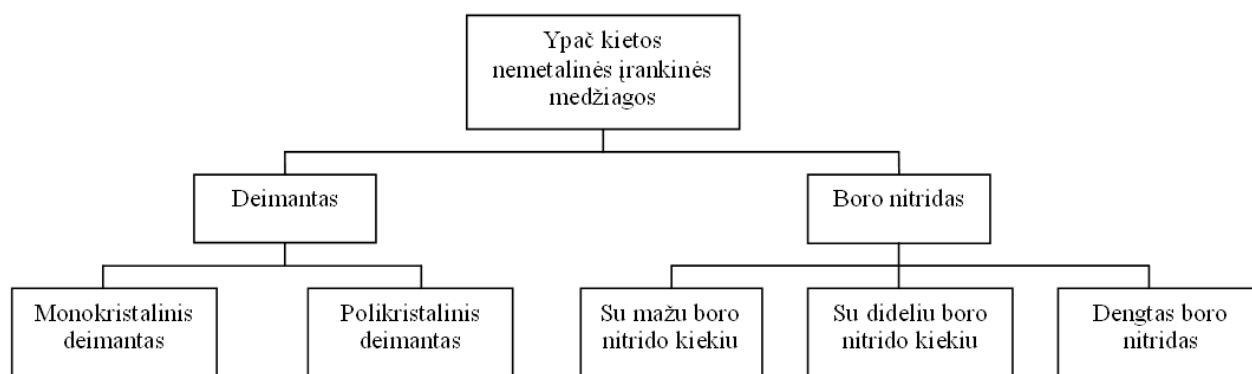
Keraminės medžiagos tai yra visos nemetalinės ir neorganinės medžiagos ir metalinių medžiagų cheminiai junginiai su nemetalinėm medžiagom. Yra išskiriamos oksidinės ir beoksidės keramikos. Didžiausia keramikų grupė yra oksidai. Oksidinių keramikų pagrindą sudaro aliuminio oksidas (Al_2O_3). Mišriose oksidinėse keramikose be Al_2O_3 yra ir metalinės medžiagos, tai TiC ar TiCN. Gaminamos ir armuotos oksidinės keramikos. Jose į Al_2O_3 matricą yra įterpti silicio karbido (SiC) siūliniai kristalai. Šių kristalų stipris siekia 7000 N/mm^2 . Beoksidės keramikos yra pagamintos karbidų, boridų, nitridų ir silicio pagrindu. Kai kurie autoriai keramikas skirsto į metalines ir nemetalines. Keraminių medžiagų kietis siekia daugiau nei 2000 HV, o didžiausia darbinė temperatūra viršija 1000°C , taip pat jos pasižymi aukštu cheminiu stabilumu. Jų pritaikymas pjovimo įrankiams labai platus. Dažniausiai jos naudojamos tokių sunkiai apdirbamų medžiagų, kaip Fe ir Ni pagrindu, pagamintų lydinių apdirbimui. Kad padidinti ilgaamžiškumą, beoksidės keramikos įrankiai gali būti dengiami vienasluoksniemis Al_2O_3 ar daugiasluoksniemis Al_2O_3 ir TiN dangomis.



47 pav. Keramika: a – Oksido keramika (Al_2O_3); b – Mišri keramika ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$); c – Silicio nitrido keramika ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{MgO}$); d – Armuota keramika ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$); e - Armuota keramika ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$ siūlinis kristalas); f – Dengta keramika ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{danga}$) [30]

1.6.5. Ypač kietos nemetalinės įrankinės medžiagos

Ypač kietomis ir nemetalinėmis įrankinėmis medžiagomis yra vadinamas deimantas ir boro nitrido pagrindu pagamintos medžiagos. Abi šios medžiagos priskiriamos prie keraminių medžiagų. Jų klasifikacija parodyta 47 paveiksle.

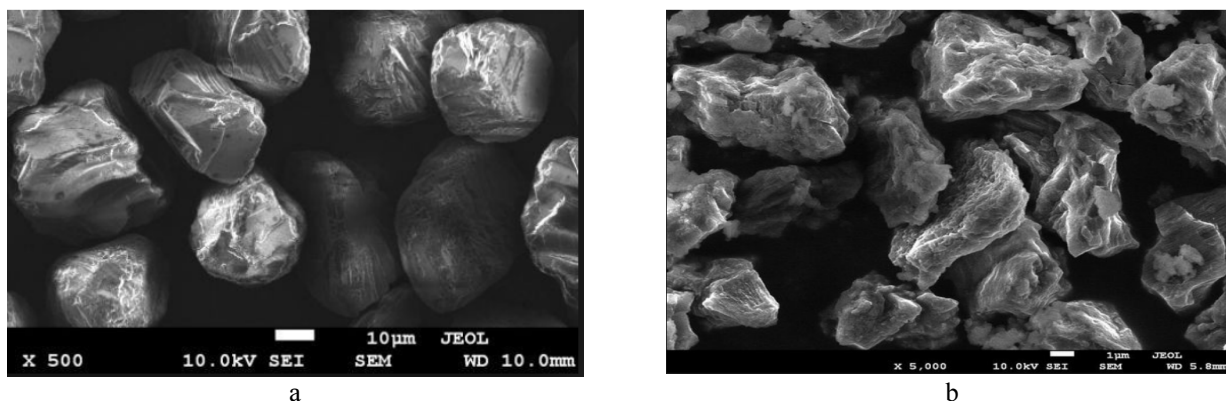


48 pav. Ypač kietų įrankinių medžiagų klasifikacija [30]

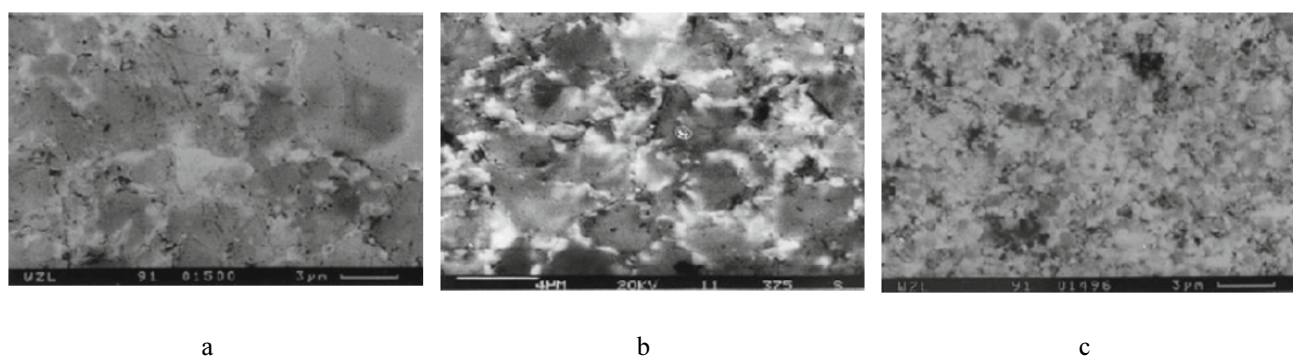
1.6.5.1. Deimantas

Deimantas yra skirstomas į natūralų ir sintetinį. Sintetinis deimantas gaunamas dideliame slėgyje, aukštomis temperatūromis modifikuojant kristalinę anglį (C). Deimantą sudaro kubinių kristalinių gardelių visuma, kurioje C atomai išsidėsto tetraedro forma ir tarpusavyje jungiasi kovalentiniais ryšiais [31]. Ypač stiprūs tarpatominiai ryšiai daro deimantą kietesniu už visas kitas įrankines medžiagas. Natūralus ir sintetinis deimantas skirstomi į monokristalinį ir polikristalinį. Monokristalinis deimantas pasižymi anizotropiškumu, kas smarkiai įtakoja jo kietį,

stiprį ir tampriąsias savybes. Dėl ekonominių ir technologinių priežasčių, įrankių gamybai naudojamas sintetinis polikristalinis deimantas. Dėl atsitiktinio kristalų pasiskirstymo, šioje medžiagoje anizotropiškumo nėra. Sintetinio polikristalinio deimanto įrankiai gaminamas iš smulkių (iki 25 μm) mikrokristalų, kurie esant aukštam (60 – 70 kbar) slėgiui, 1400 – 2000°C temperatūroje su rišančiąja medžiaga surišami į vieną kristalinį kūną. Kaip rišančioji medžiaga yra naudojamas Co, Si, W ar WC. Tokiu būdu gaminamas 0,5 mm storio deimantinis sluoksnis, kuris užnešamas ant kietlydinio plokštelių. Iš gauto kompozito išpjauti pjovikliai tvirtinami prie įrankių korpusų. Sintetinio polikristalinio deimanto kietis siekia 90 HRC, o maksimali darbinė temperatūra viršija 450°C. Įrankiai, pagaminti iš monokristalinio deimanto, naudojami metalų, gumos, stiklo, plastiko ir akmens pjovimui. Polikristaliniai deimantai naudojami visų išvardintų medžiagų ir sunkiai apdirbamų metalų lydinių, bei keramikos pjovimui [30].



49 pav. Deimanto kristalai: a – monokristalinio (500x) [37]; b – polikristalinio (5000x) [38]

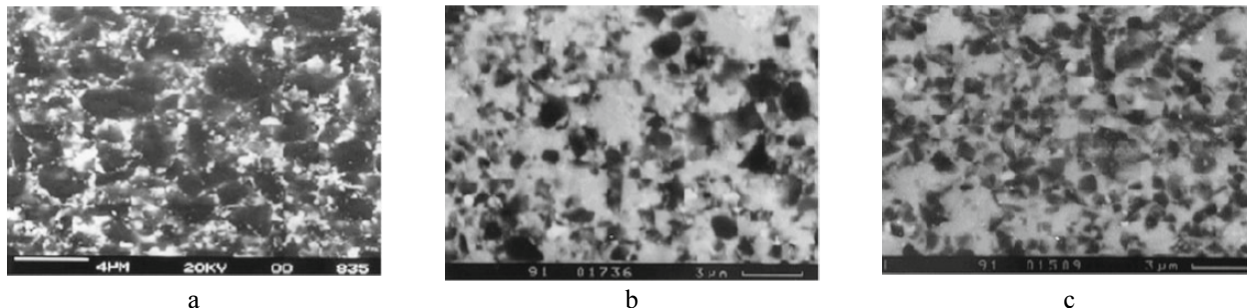


50 pav. Polikristalinio deimanto mikrostruktūra: a – Grūdelių dydis 6 – 10 μm, rišančioji medžiaga – W(9%) ir Co(91%); b - Grūdelių dydis 2 – 6 μm, rišančioji medžiaga – W(12%) ir Co(88%); c - Grūdelių dydis 0.5 – 1 μm, rišančioji medžiaga – W(47%) ir Co(53%) [30]

1.6.5.2. Boro nitridas

Natūralus gamtoje egzistuojantis boro nitridas yra minkšta, heksagoninės kristalinės gardelės, medžiaga, netinkanti pjovimo įrankiams gaminti. Šią medžiagą paveikus dideliu (50 -90 kbar) slėgiu ir aukštomis (1800 – 2200 K) temperatūromis, heksagoninė gardelė modifikuojama į kubinę kristalinę gardelę, suteikiant, jai, pjovimo medžiagoms būdingų savybių. Kubinės kristalinės gardelės boro nitridas (cBN) yra antra pagal kietį medžiaga po deimanto. Jos tankis 3,45g/cm³, lydymosi temperatūra 2730°C. cBN pasižymi didesniu cheminiu stabilumu, nei deimantas. Mikrokristalų dydis 1 – 50 μm. Esant dideliame slėgiui ir aukštomis temperatūroms, su rišančiąja medžiaga šie kristalai sulydomi į 0,5 mm storio sluoksnį, kuris, kaip ir deimantas, užnešamas ant kietlydinio pagrindo. Didžiausia darbinė temperatūra priklauso nuo rišančiosios medžiagos savybių.

Kaip rišančioji medžiaga yra naudojamas Al, Ti, TiAlN, TiC, Co, Ni ir W. cBN skirstomas į didelės koncentracijos cBN (BH) ir į mažos koncentracijos cBN (BL). Didelės koncentracijos cBN sudaro 80 – 90% cBN su W – Co ar TiC, TiN pagrindo rišančiąja medžiaga. Mažos koncentracijos cBN sudaro 45 – 65% cBN su TiC, TiN pagrindo rišančiąja medžiaga. cBN naudojamas rupiai ir glotniai apdirbti medžiagas, kurių kietis 55 – 68 HRC, t.y. HS, lieta geležį, šlakus, Ni, Co lydinius ir kitas sunkiai apdirbamas medžiagas [30]



51 pav. Skirtingų boro nitrido rūšių įrankių išdilimas apdirbant 100Cr6 metalą [30]

1.7. Įrankių patvarumo padidinimo būdai

1.7.1. Metalų terminis apdirbimas

Terminiu apdirbimu vadinamas metalų įkaitinimas iki tam tikros temperatūros, išlaikymas ir tam tikru greičiu ataušinimas, kad pasikeitus metalo sandarai, būtų gaunamos norimos fizikinės ir mechaninės savybės [31].

Atkaitinimas. Atkaitinimas tai metalo, kuris anksčiau termiškai apdirbtas įgijo įtemptumo būseną, įkaitinimas iki aukštos temperatūros, išlaikymas joje ir lėtas aušinimas. Įkaitinimas padidina atomų paslankumą, o išlaikymas aukštoje temperatūroje sudaro galimybę jiems persitvarkyti. Taip sumažėja kristalinės sandaros netobulumų, panaikinami vidiniai įtempiai, sumažinamas kietis bei stipris, išlyginamas cheminės sudėties netolygumas – metalas tampa stabilesnis [31].

Normalizavimas. Tai plienų įkaitinimas iki pilnai austenitinės sandaros, pakankamas išlaikymas ir aušinimas ramiaame ore, susidarant smulkiam perlitui. Taip gaunamas tšsus, šiek tiek kietesnis ir didesnis stipris, kaip po įprastinio atkaitinimo, plienas [31].

Grūdinimas. Grūdinimas – tai įkaitintų iki austenitinės sandaros ir šioje temperatūroje išlaikytų plienų staigus aušinimas, susidarant kiečiausiai, bei stipriausiai nors ir trapiam martensitinei sandarai [31].

Atleidimas. Atleidimu vadinamas užgrūdinto plieno pakaitinimas iki temperatūros, žemesnės už austenizacijos pradžios temperatūrą, pakankamas išlaikymas ir lėtas arba greitas aušinimas. Po grūdinimo atleidimas atliekamas visada. Tai daroma kad sumažinti užgrūdinto plieno vidinius įtempius ir trapumą bei suteikti didžiausią smūginį tšsumą, išlaikant grūdinimu suteiktą kietį ir stiprį [31].

1.7.2. Paviršinis plienų stiprinimas

Medienos apdirbimo įrankio skerspjūvyje įtempiai nuolat kinta. Labiausiai jie kinta paviršiniuose sluoksniuose. Dėl metalo nuovargio, atsiradusio dėl įtempių kaitos, įrankio paviršiuje

atsiranda įtrūkiiai. Kad padidinti įrankio atsparumą nuovargiui, paviršiniuose sluoksniuose sudaromi gniuždymo įtempiai, kurie trukdo atsiverti plyšiams [31].

Paviršinis plienų grūdinimas. Tai toks grūdinimas, kai iki austenizacijos temperatūros įkaitinami tik paviršiniai metalo sluoksniai. Jie užgrūdinami nespėjus įkaisti gilesniems sluoksniams. Grūdinant šiuo būdu gaunamas kietas, atsparus dilimui paviršius, o pats įrankis išlieka plastiškas ir atsparus smūgiams [31].

1.7.3. Termocheminis apdirbimas

Tai metalo paviršinių sluoksnių įsotinimas vienu ar keliais elementais, šiuos metalus aukštoje temperatūroje išlaikant aktyvioje įsotinančioje terpėje. Pasikeitus paviršinių sluoksnių cheminei sudėčiai, įrankio savybės gali pasikeisti labiau, negu apdirbant vien termiškai [31].

Cementavimas. Cementavimu vadinamas plienų paviršinių sluoksnių įanglinimas, juos esant aukštai 900 – 950°C temperatūrai, išlaikant įanglinančioje aplinkoje. Įprastas tokio sluoksnio kietis yra 60 – 62 HRC. Įanglintas sluoksnis nėra tāsus, bet labiau atsparus nuovargiui, nei viduriniai metalo sluoksniai. Cementuoti gaminiai visuomet grūdinami ir atleidžiami [31].

Azotinimas. Įazotinimas vadinamas nitravimu. Tai plienų paviršinių sluoksnių įsotinimas azotu (N), juos aukštoje temperatūroje išlaikant įazotinančioje aplinkoje. Jis padidina paviršinį kietį, atsparumą abrazyviniam dilimui ir korozijai. Įrankiai grūdinami prieš azotinimą. Azotinimo temperatūra nepažeidžia terminio apdirbimo metu gautų savybių [31].

Karbonitravimas. Tai toks termocheminio apdirbimo būdas, kai tuo pačiu metu, plieno paviršiniai sluoksniai, prisotinami anglies (C) ir azoto (N), šiuos plienus aukštesnėje kaip austenizacijos temperatūroje, prisotinančioje terpėje. Yra dvi karbonitravimo rūšys: nitrocementavimas ir cianavimas. Karbonitruojant padidinamas įrankių kietis, atsparumas abrazyviniam dilimui ir nuovargiui [31].

Borinimas. Borinimas – tai metalų paviršinių sluoksnių difuzinis įsotinimas boru, šiuos metalus išlaikant aukštoje temperatūroje, aplinkoje išsiriančioje boro atomus. Borinimas padidina įrankių kietį, atsparumą abrazyviniam dilimui. Įborinti paviršiai išlaiko kietį iki 700°C [31].

1.7.4. Difuzinis įsotinimas metalais

Plienų paviršiai įsotinami metalais, kad padidinti kietį, atsparumą abrazyviniam dilimui, oksidacijai aukštoje temperatūroje ir korozijai. Dažniausiai metalai įsotinami aliuminiu (Al) ir Chromu (Cr) [31].

Chrominimas. Plienas, kurio paviršiai įsotinami chromu (Cr) yra atsparesnis kaitrai, korozijai, o kai jame anglies daugiau kaip 0.3 – 0.4 % , kietesnis ir atsparesnis dilimui. Įchromintas plienas atsparus oksidacijai iki 800°C [31].

Alitavimas. Tai plieno paviršinių sluoksnių įsotinimas aliuminiu (Al). Taip apdirbto plieno paviršiuje susidaro standi aliuminio oksido (Al₂O₃) plėvelė, kurios atsparumas oksidacijai siekia 850 – 900°C temperatūrą, 400 – 500 HV kietį, tačiau ji nėra abrazyvinei trinčiai [31].

1.7.5. Termomechaninis apdirbimas

Termomechaninis – tai toks plienų apdirbimas, kai derinamas deformacinis metalų sukietinimas su terminiu apdirbimu. Paprastai tai plienas įkaitinamas iki austenitinės sandaros ir mechaniškai deformuojamas sandarai sutvirtinti, tada grūdinamas. Toks apdirbimas skirstomas į aukštatemperatūrį termomechanį apdirbimą ir žematemperatūrį mechaninį apdirbimą [31].

1.7.6. Plienu legiravimas ir cheminių elementų savybės

Titanas yra sidabriškai pilkos spalvos metalas. Jis gana lengvas (4505 kg/ml), plastiškas, lengvai deformuojamas, stiprumu prilygsta plienui, o atsparumu korozijai pranoksta nerūdijantįjį plieną. Jo lydymosi temperatūra – 1668°C. Dėl mažo tankio ir didelio santykinio stiprio titanas plačiai naudojamas metalurgijoje lydiniams legiruoti. Titanas legiruojamas aliuminiu, vanadžiu, molibdenu, niobiu, manganu, alavu, variu ir magniu. Užgrūdintų ir pasendintų šių lydinų tempimo stiprio riba siekia 1100 ir 1600 MPa.

Chromas didina stiprį, kietį, atsparumą dilimui, smūginį tąsumą ir atsparumą kaitrai. Jis yra dažniausias plieno legiravimo elementas. Chromo paskirtis - didinti įgrūdinamumą. Optimali chromo koncentracija šiuose plienuose yra 4%. Kai chromo mažiau, ne tik, sumažėja įgrūdinamumas, bet ir atsparumas dilimui, padidėja trapumas, pablogėja pjovimo savybės [23].

Nikelis yra magnetinis, jo tamprumo modulis (209 MPa) yra beveik toks pat, kaip ketaus ar plieno. Tačiau jis yra gerokai atsparesnis korozijai ir kaitrai. Nikelis atsparus šarmams, kai kuriems vandeniniams druskos tirpalams, tačiau neatsparus rūgštims. Jo tankis - 8900 kg/ml, lydymosi temperatūra – 1453°C. Juo legiruojamas plienas, dengiamos metalinės detalės. Nikelis legiruojamas variu, kobaltu, chromu, manganu, molibdenu, geležimi, aliuminiu. Korozijai atsparūs nikelio lydiniai sudaromi su Cu, Mo, Si ir Fe. Lydinys Ni-Cu vadinamas moneliu. Jis labai atsparus korozijai agresyvioje aplinkoje. Kaitrai atsparūs (iki 800- 1200 °C temperatūros) nikelio lydiniai paprastai legiruojami Cr, Al ir Ti. Ni-Si lydiniai, turintys 12 % Si, labai atsparūs rūgštims.

Molibdeno lydymosi temperatūra – 2619°C. Jam būdingas didelis tamprinio modulis, mažas šiluminis plėtimasis ir didelis šilumos laidis. Molibdenas legiruojamas titanu, cirkoniu, niobiu, hafniu ir volframu. Molibdeno lydinų eksploatavimo temperatūra gali siekti 1500°C. Daug molibdeno sunaudojama plienui legiruoti. Įkaites šis metalas neatsparus oksidacijai, o tai blogina jo aukštatemperatūros savybes. Todėl, kad būtų galima eksploatuoti aukštose temperatūrose, jis padengiamas apsauginėmis silicio ir aliuminio pagrindu sudarytomis dangomis.

Volframo lydymosi temperatūra – 3410°C. Jis yra kietiausias, stipriausias ir vienas iš sunkiausių metalų. Volframas gali būti legiruojamas molibdenu, reniu, cirkoniu, hafniu, niobiu. Dirbinių iš volframo lydinų eksploatavimo temperatūra gali siekti 2000°C. Kad padidinti atsparumą aukštatemperatūrei oksidacijai volframas dengiamas apsauginėmis silicio ir aliuminio pagrindu sudarytomis dangomis [40].

1.7.7. Įrankinių medžiagų kietinimas dengiant kietesnėmis dangomis

Mažesnio kietumo įrankiai yra gaminami su mažesniais nusmailinimo kampais, palyginus su PCD įrankiais. Mažesni nusmailinimo kampai yra būtini apdirbant medieną ir įtakoja geresnę apdirbtų paviršių kokybę. Bet kuo didesnis ašmenų nusmailinimo kampas, tuo didesnis ašmenų dilimas. Būtent todėl HS ar HM įrankiai turi būti dengiami kietesnėmis, dilimui atspariomis dangomis [30].

Kietosios plėvelės pavidalo dangos, pirmiausiai, pradėtos naudoti, metalo apdirbimo pramonėje [23]. Dangos padidina paviršių kietį ir atsparumą abrazyviniam bei adheziniam dilimui, sumažina slydimo trinties jėgas tarp įrankio ir ašmenų paviršių ir drožlės, apsaugo kontaktinį paviršių nuo adhezijos, sumažina temperatūrą, kuri išsiskiria dėl trinties tarp drožlės ir įrankio ašmenų, sumažina šilumos kiekį, padidina atsparumą korozijai ir oksidacijai, padidina atsparumą dilimui, kuris vyksta ištrupant paviršiaus sluoksniams ir susidarant krateriams, pagerina apdirbtų paviršių kokybę.

Šios dangos ant viso įrankio ar specialiai paruoštų ašmenų, užnešamos fiziniu (PVD) arba cheminio (CVD) nusodinimo iš garų fazės metodais, taikant įvairius režimus. Naudojamos vienasluoksnės ir daugiasluoksnės dangos [23]. Daugiasluoksnių dangų sluoksniai gali būti įvairių storių ir formuojami iš skirtingos cheminės sudėties medžiagų. Taip gaunamos geresnės fizikinės – mechaninės dangų savybės.

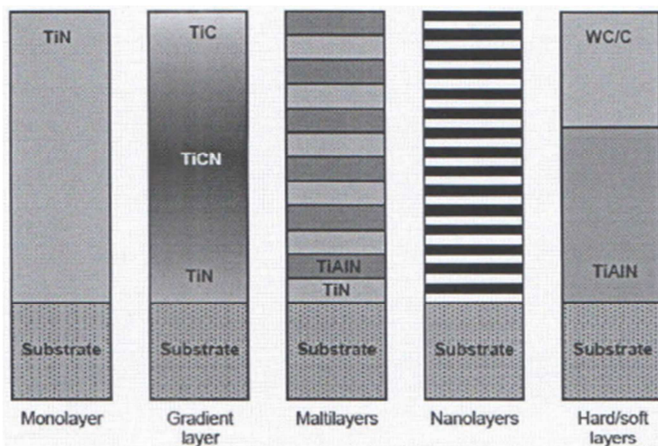
Metalu ir medienos apdirbimo įrankių ašmenims padengti, naudojamos keturios dangų grupės. Pirmai ir plačiausiai taikomai grupei priskiriamos, TiN, TiC ir TiCN, dangos sukurtos titano pagrindu. Šios grupės dangų metalinė fazė dažnai papildoma kitais metalais, kaip Al ir Cr, kurie padidina kietį ir atsparumą oksidacijai. Antroji grupė tai keramikinės Al₂O₃ dangos. Trečioji grupė tai ypač kietos deimantinės dangos, kurios dengiamos CVD būdu. Ketvirtoji grupė – tai trintį mažinančios dangos. Daugiausiai naudojamos amorfinio metalo – anglies danga, arba minkštosios dangos, tokios kaip MoS₂, arba grynasis grafitas nusodintas ant kitos kietesnės dangos. Dangų tipai ir charakteristikos pateiktos 1 lentelėje.

5 lentelė. Dangų charakteristikos

Danga	Paskirtis	Spalva	Kietis HV(0,005)	Trinties koeficientas	Šiluminis patvarumas, °C
TiN	Padidina atsparumą abrazyviniam dilimui	auksinė	2300	0,3	600
TiCN	Pasižymi geresniu atsparumu dilimui lyginant su TiN danga.	Pilkai violetinė	3000	0,4	750
TiAlN ir TiAlCN	Pasižymi geru atsparumu dilimui. Mažina įrankio įkaitimą.	Juodai violetinė	3000 - 3500	0,45	800 - 900
WC-C ir MoS ₂	Trintį mažinančios dangos.	Pilkai juoda	1000-3000	0,1	300
CrN	Atspari aukštai temperatūrai.	Sidabrinė	1800	0,5	700
DLC	Padidina atsparumą abrazyviniam dilimui	Pilkai juoda	10000	0,1	700

Kietlydiniai yra puikus pagrindas tokioms vientisoms ar daugiasluoksnėms dangoms kaip TiN, TiAlN, TiCN.

Dažniausiai pasitaikančios kietlydinių įrankių vienasluoksnės ir daugiasluoksnės dangos yra pavaizduotos 8 paveiksle.



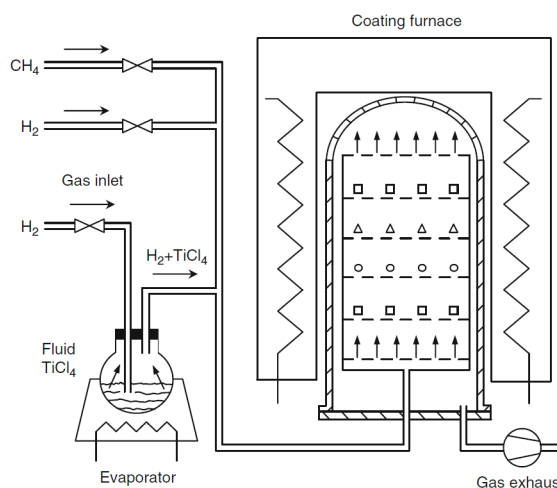
52 pav. Dangų pavyzdžiai. Čia: Monolayer – monodanga; Gradient layer – kintančio medžiagiškumo danga; Multilayer – daugiasluoksnė danga; Nanolayer – nano lygmenyje daugiasluoksnė danga; Hard/soft layers – mišri danga su kietu ir minkštu sluoksniais; Substrate – pagrindinė įrankinė medžiaga; TiN – titano nitridas; TiC – titano karbidas; TiCN – titano karbonitridas; TiAlN – titano aliuminio nitridas; WC/C – volframo karbidas ir anglis [23]

Dangos tvirtumas taip pat svarbus kaip ir kietis kas trukdo atsirasti įtrūkiams. Dangoms yra būtina pusiausvyra tarp didelių spaudimo įtempių ir mažų liekamųjų įtempių [23].

1.8. Dangų nusodinimo metodai

1.8.1. Cheminis (CVD) dangų nusodinimo iš garų fazės metodas

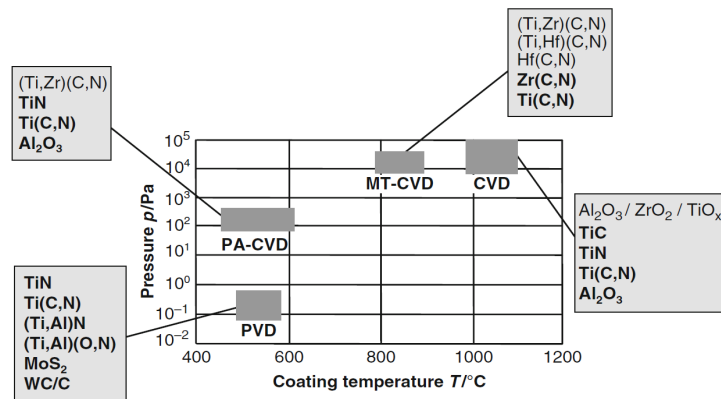
Pirmasis išrastas kietų, antifrikcinių dangų ant įrankių paviršių užnešimo būdas yra cheminis garų nusodinimo metodas (CVD). Šis metodas sukurtas prieš trisdešimt metų. Juo buvo užnešamos vienasluoksnės dangos. Dabar šiuo būdu įrankiai dengiami ir daugiasluoksnėmis dangomis. CVD metodu daugiausiai dengiami kietlydinio įrankiai. Šiam metodui naudojamos labai aukštos temperatūros siekiančios net 1000°C . CVD dangų užnešimo būdas turi du pranašumus: dėl gilesnės, dangos, atomų difuzijos į pagrindinę įrankinę medžiagą, danga geriau sukimba su ja ir santykinai paprastesnis plonesnių vienasluoksnių ir daugiasluoksnių didesnę elektrinę varžą turinčių dangų, susidedančių iš Al_2O_3 , užnešimas [41]. CVD būdu užnešamos dangų storis paprastai būna $3 - 10\mu\text{m}$. Dėl labai aukštos, 1000°C siekiančios, temperatūros, tarp dangos ir įrankinės medžiagos, susidaro labai gera adhezija. Dėl aukštos temperatūros, įrankiams gaminamiems iš grūdinto plieno, po dangos padengimo proceso CVD būdu, turi būti atliktas papildomas grūdinimas. Tačiau reikia atsižvelgti į galimas įrankių deformacijas ir padidėjusį įrankio dangos šiurkštumą [42]. CVD dangos yra dengiamos trim būdais: CVD, MT – CVD (vidutinės temperatūros CVD) ir PA – CVD (plazminis CVD) (26 pav.) [42].



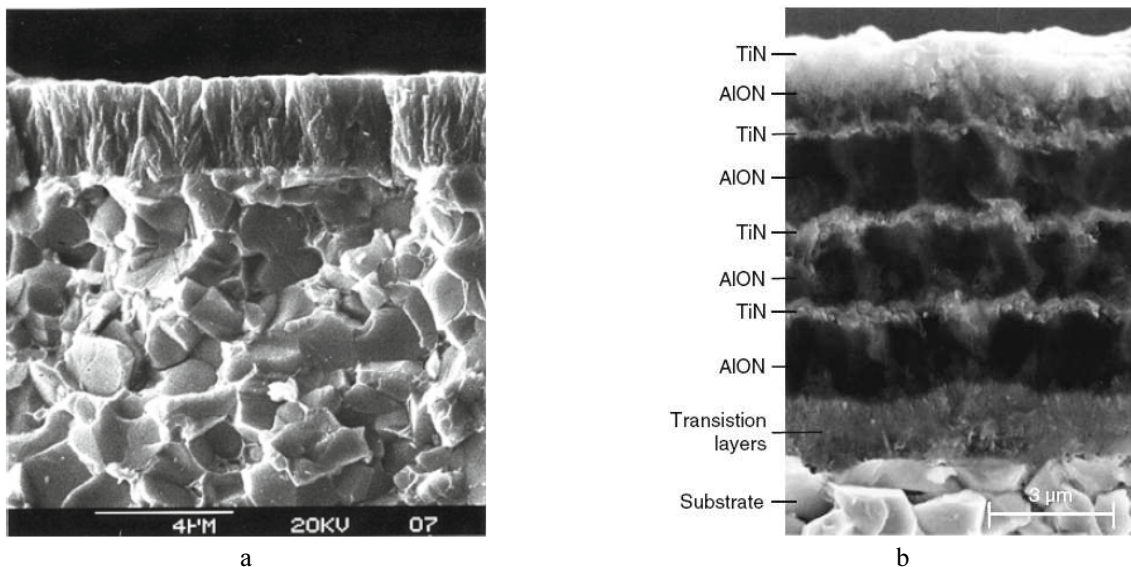
53 pav. CVD dangų nusodinimo iš garų fazės metodo principinė schema. Čia: Fluid – skysta dengiamos dangos medžiaga; Evaporator – dangos garinimo įrenginys; H₂ – vandenilis; CH₄ – metano dujos; Coating furnace – dangų užnešimo kamera; Gas exhaust – dujų išleidimo vožtuvas [30]

1.8.2. Plazminis - Cheminis (PA - CVD) dangų nusodinimo iš garų fazės metodas

PA - CVD yra santykinai naujas metodas CVD būdu užnešti dangas, tik gerokai žemesnėse temperatūrose. Šis procesas yra labai panašus į standartinį CVD būdu dangų užnešimo procesą, bet esant jonizuotų dujų aplinkoje (plazmoje) daleles, kurios sudaro įrankio dangą, reikia įkaitinti iki apytiksliai $450 - 550^{\circ}\text{C}$ [42].



54 pav. PVD, PA – CVD , MT – CVD ir CVD dangų nusodinimo iš garų fazės metodų sugretinimas. Čia: Pressure – slėgis; Coating temperature – dangos užnešimo temperatūra [30]



55 pav. PA – CVD būdu, ant kietlydinio pagrindo, nusodintos dangos: a – vienasluoksnė TiN danga; b – daugiasluoksnė TiN ir AlON danga; Transition layers – tarpinis sluoksnis; Substrate – pagrindas [30]

1.8.3. Fizinis (PVD) dangų nusodinimo iš garų fazės metodas

Dangų užnešimas fiziniu garų nusodinimo metodu atsirado prieš dvidešimt metų. Šiuo būdu dangos užnešamos esant 500°C temperatūrai. PVD metodu dangos pirmiausiai buvo nusodintos ant HS įrankių. Buvo pastebėta, kad šis metodas tinkamas ir medienos apdirbimui naudojamiems kietlydinio įrankiams [41].

Naudojant PVD technologiją įmanoma pagaminti ypač kietas įrankines dangas su puikomis fizikinėmis ir cheminėmis savybėmis (mažu trinties koeficientu, dideliu kiečiu, atsparumu dilimui, aukštu temperatūriniu atsparumu – 550 – 750°C, geromis antikorozinėmis savybėmis ir t.t.). Išgarinimas elektros lanku ir išgarinimas magnetronu yra labiausiai paplitę fizikinio garų nusodinimo metodo naudojimo būdai. Tai yra specialiai sukurta technologija kurios pagalba, esant nedidelei elektrinei įtampai ir naudojant nedidelį 0,1 – 1,0 Pa slėgį, azoto aplinkoje išgarinamas metalas. Tekant apytiksliai 100A srovei, temperatūra pakyla iki 10 000 – 20 000°C, kas praktiškai bet kokią medžiagą gali priversti garuoti. Išgaravę atomai ar jų grupelės yra jonizuojami, t.y. jiems suteikiamas elektrinis krūvis, taip jie įgauna apytiksliai 50 m/s⁻¹ pagreitį ir nusėda ant dengiamo įrankio paviršiaus. Dengiant įrankius PVD būdu, padengimo temperatūra svyruoja nuo 200 iki 500°C, kas leidžia dangomis dengti net greitapjovius plienus nepakeičiant jų savybių.

2. METODINĖ DALIS

2.1. Darbo tikslas

Šio tyrimo tikslas – palyginti frezų su kotu, nepadengtų danga ir padengtų įvairiomis dangomis, patvarumą dilimui, frezuojant ažuolo medieną, įvairiais pjovimo greičiais. Taip pat buvo tiriama frezų dilimo ir pjovimo greičių įtaką frezuotų paviršių kokybei.

2.2. Frezavimo įrankiai

Tyrimai atlikti su spiralinėmis kotonėmis glotniojo apdirbimo frezomis (1 pav.), pagamintomis iš T06MG markės kietlydinio (6 lent.) nepadengtomis danga bei padengtomis titano karbonitrido (TiCN), chromo nitrido (CrN) ir cheminiu būdu nusodintos anglies (DLC) dangomis. Dangų charakteristikos pateiktos 7 lentelėje.



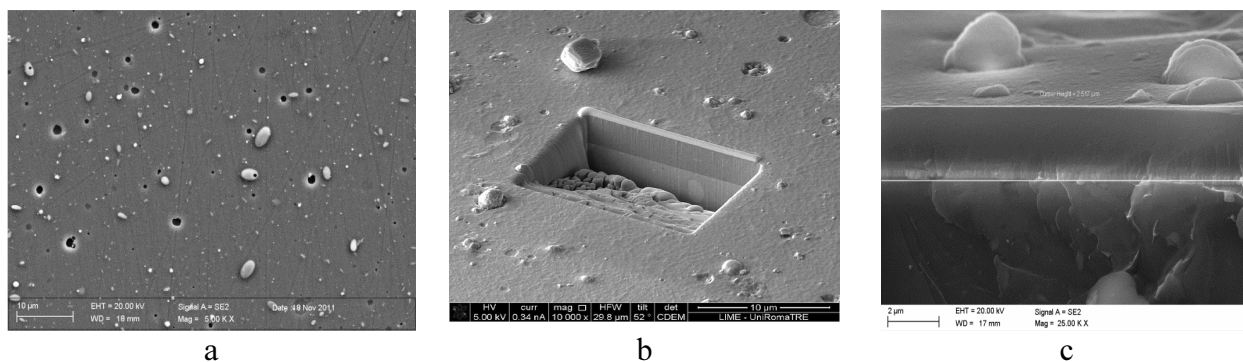
58 pav. Spiralinė, glotnaus apdirbimo freza su kotu

6 lentelė Frezų, su kotu, charakteristikos [1]

Kietlydinio markė	T06MG	Paviršiaus šiurkštumas R_a	0.04 μm
Rišamoji medžiaga	6 % Co	Skersmuo D	$\varnothing 12$ mm
WC grūdelių dydis	0,7 – 1,0 μm	Ašmenų ilgis l	54 mm
Kietis	1800 HV 10	Bendras ilgis L	101 mm
Atsparumas lenkimui	2700 N/mm ²	Priekinis kampas γ	21°
Tašumas	8,2 K ₁ C/MPa.m ^{-1/2}	Nusmailinimo kampas β	59°
Darbinė temperatūra	800–1000 °C	Užpakalinis kampas α	10°
Trinties koeficientas	0,4 – 0,6 μ_s	Sraigtiškumo kampas λ	20°

7 lentelė Dangų charakteristikos [2,3]

Dangos žymėjimas	Dangos pavadinimas	Spalva	Padengimo būdas	Dangos storis, μm	Dangos kietis HV	Dangos padengimo temperatūra, °C	Didžiausia darbinė temperatūra, °C	Trinties koeficientas	Paviršiaus šiurkštumas, R_a , μm
TiCN	Titano karbonitridas	Rausvai ruda	PVD	3	3000	450	600	0,3	0,09
CrN	Chromo nitridas	Sidabrinė pilka	PVD	3	1800	450	700	0,5	0,20
DLC	Polikristalinis deimantas	Pilka	PA - CVD	3	10000	550	700	0,1	0,08



59 pav. Dangų mikrostruktūra: a – CrN [47]; b – TiCN [50]; c – DLC [47]

2.3 Bandiniai

Kotinių frezų patvarumas, buvo, tiriamas frezuojant ažuolo medienos klijuotus tašelinius skydus, kurių išmatavimai buvo 900×900×20 mm. Skydai buvo pagaminti, ažuolinius tašelius, kurių plotis buvo 67 mm, suklijavus polivinilo acetato dispersiniais klijais (Danafix 437 D3, EN204/205). Tyrimams naudotos ažuolo medienos fizikinės savybės pateiktos 3 lentelėje.

8 lentelė

Fizikinės medienos savybės

Medienos rūšis	Vidutinis drėgnis ω , %	Metinių rėvių skaičius 1 cm, vnt.	Vidutinis metinių rėvių plotis, mm	Vidutinis tankis, ρ , kg/m ³
Ažuolas	7...9	4,6	2,17	737

2.4 Frezavimo bandymai

Kotinių frezų patvarumo dilimui bandymai atlikti CNC apdirbimo centre (Holzher Pro Master 7123K) (2 pav.a, b). Tiriama freza buvo tvirtinama HSK 63F greibtuve. Įtvirtintos frezos ilgis buvo 60 mm.



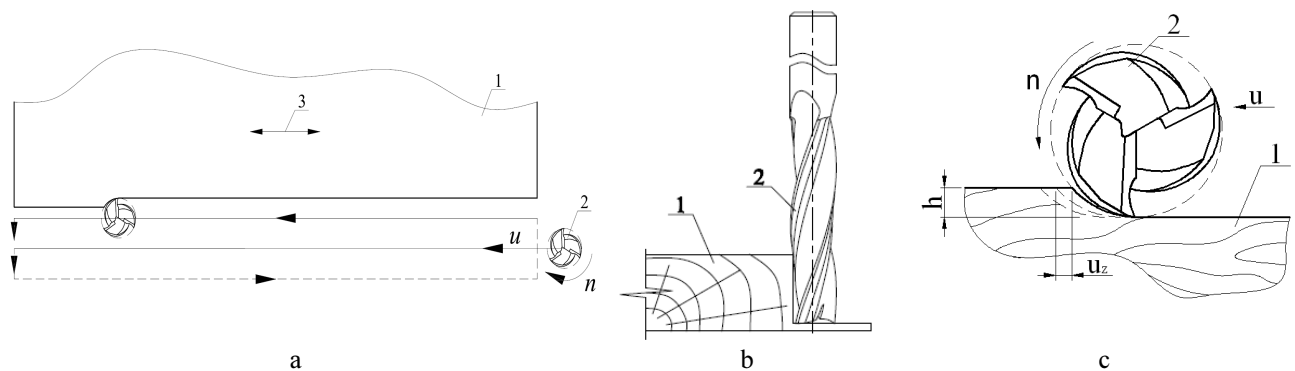
a



b

60 pav. CNC apdirbimo centras „Holzher Pro Master 7123K“:
a – bendras vaizdas; b – bandinio frezavimas: 1 – bandinys; 2 – freza

Bandiniai buvo frezuojami išilgai medienos pluošto, kai pjovimo greičio v ir pastūmos u vektorių kryptys sutampa. Bandiniai buvo įtvirtinti nejudamai, o pastūmos judesį atlikdavo frezas (61 pav. a).



61 pav. Bandinių frezavimo schema; a – vaizdas iš viršaus; b – vaizdas iš bandinio galo; c – vaizdas iš frezos galo; 1 – bandinys; 2 – freza; 3 – medienos pluošto kryptis; h – nupjaunamo sluoksnio storis; u_z – pastūma vienam pjovikliui; u – pastūmos kryptis; n – frezos sukimosi kryptis

Bandinių frezavimai atlikti trimis skirtingais frezavimo režimais. Režimų charakteristikos pateiktos 9 lentelėje.

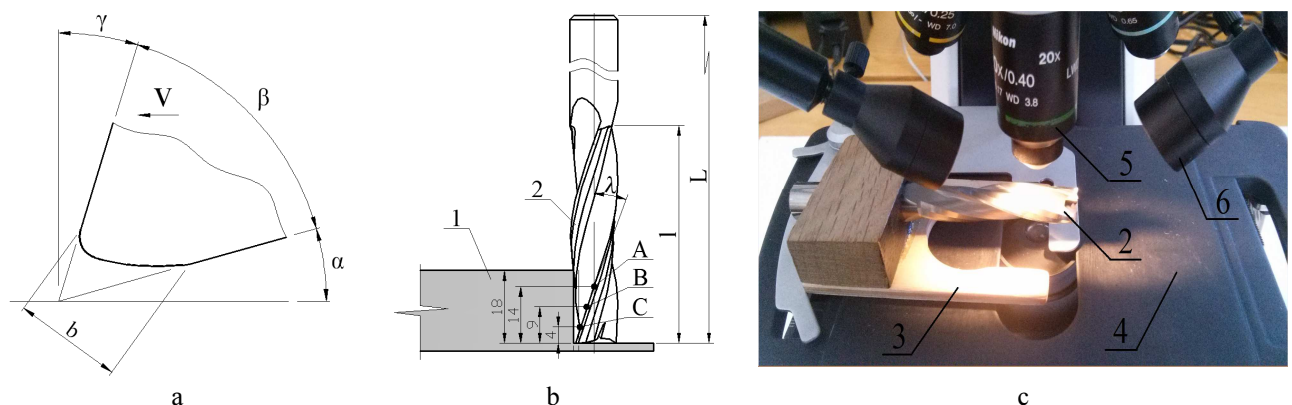
9 lentelė Frezavimo režimų charakteristikos

Frezavimo režimas	Įrankio sukimosi dažnis n , min^{-1}	Pjovimo greitis v , m/s	Pastūma vienam pjovikliui u_z , mm	Pastūmos greitis u , m/min	Nupjaunamo sluoksnio storis h , mm
1	18000	11,304	0,092	5,00	1
2	21000	13,188	0,092	5,859	1
3	24000	15,072	0,092	6,696	1

Patalpose, kur buvo atliekami tyrimai, vidutinė temperatūra buvo $t = 19 \pm 2^\circ\text{C}$, o santykinis oro drėgnis $\psi = 30 \pm 5\%$.

2.5. Ašmenų mikrogeometrijos matavimai

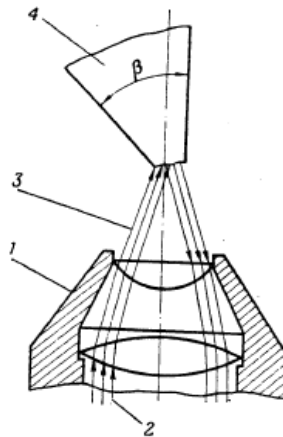
Pagrindinė charakteristika, įvertinanti kotinių frezų dilimą, buvo ašmenų plotis b (62 pav. a) [4].



62 pav. a – frezos ašmenų skersinis pjūvis; b – pjaunančiosios briaunos pločio matavimo schema; c – frezos įtvirtinimas ant mikroskopo 1 – ruošinys; 2 – kotinė freza; 3 – frezos įtvirtinimo stovas; 4 – mikroskopo staliukas; 5 – objektyvas; 6 – apšviestuvas; A, B, C – pjaunančiosios briaunos pločio matavimų taškai, b – pjaunančiosios briaunos plotis

Faktinės ašmenų pločio b vertės išmatuotos optiniu būdu [5,6] (62 pav.c.), naudojant optinį mikroskopą (Nicon Eclipse E 200) su skaitmenine vaizdo kamera (Lumenera Infinity 1).

Šio matavimo metodo principas tas, kad specialiai apšviesta pjaunančioji briauna išryškinama kaip šviesus ruoželis. Gauti vaizdai apdoroti ir išmatuoti naudojant personalinę kompiuterį ir programinę įrangą (Infinity Analyze Release 5.0.2).



63 pav. Optinis tiesioginio stebėjimo metodas:

1 - mikroskopo objektyvas; 2 - apšviestuvas; 3 - šviesos spindulių kryptys; 4 – ašmenys [5]

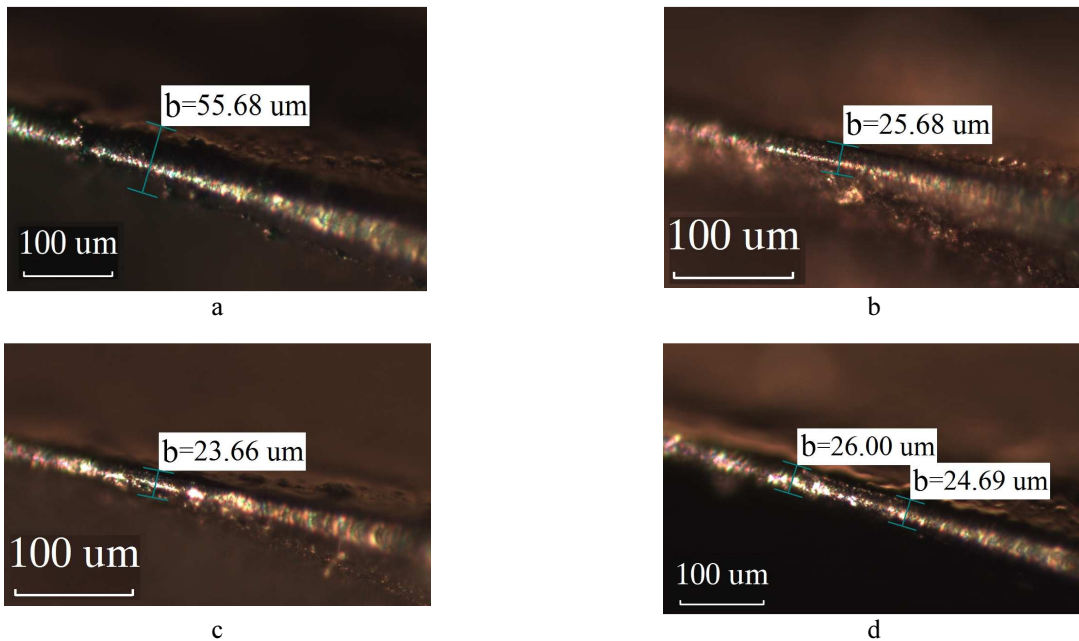
Jis tinkamas tik aštriems įrankiams tyrinėti [5].

Pjaunančiosios briaunos plotis b buvo matuojamas nustatytuose pjovimo kelio L intervaluose (5 lent.). Kiekviename pjovimo kelio L intervale ašmenų matavimai atlikti trijose vietose (A, B ir C) (62 pav. b).

10 lentelė. Pjaunančiosios briaunos pločio b ir frezuoto paviršiaus šiurkštumo R_z matavimų intervalai

Frezos tipas	Frezavimo režimo nr.	Ašmenų pločio b ir bandinių šiurkštumo parametro R_z matavimų intervalai, m.
WC	1	130, 1190, 2248, 3267, 4332, 5403, 6547, 7585, 11024, 14953, 19980, 26130
	2	130, 1630, 3130, 4630, 6130, 7630, 9130, 10630, 12130, 17130, 22130, 26130
	3	130, 1011, 1892, 2774, 3655, 4536, 5418, 6299, 7180, 12180, 17180, 22180, 26130
WC + TiCN WC + CrN WC + DLC	1	130, 1130, 2130, 3130, 4130, 5130, 6130, 7130, 11130, 15130, 20130, 26130
	2	130, 1630, 3130, 4630, 6130, 7630, 9130, 10630, 15130, 20130, 26130
	3	130, 1011, 1892, 2774, 3655, 4536, 5418, 6299, 7180, 12180, 17180, 22180, 26130

64 paveiksle pavaizduota nedengtų ir TiCN, CrN ir DLC dangomis dengtų įrankių pjaunančioji briauna ir išmatuotas jos plotis.



64 pav. Pjaunančioji briauna ir jos matavimo pavyzdžiai: a – frezos be dangos ($L = 26130$ m) (150x); b – frezos dengtos TiCN danga ($L = 11130$ m) (150x); c – frezos dengtos CrN danga ($L = 11230$ m) (150x); d – frezos dengtos DLC danga ($L = 26130$ m) (150x)

2.6. Frezuotų paviršių kokybės matavimai

Buvo palyginamas, šiomis frezomis, apdirbto paviršiaus šiurkštumas. Apdirbto paviršiaus šiurkštumo parametras R_z buvo matuojamas kontaktiniu adatiniu paviršiaus šiurkštumo matuokliu (Mahr MarSurf PS1) (65 pav.), kurio deimantinės adatos spindulys $2 \mu\text{m}$, matavimo kampas 90° , o matavimo eiga 17.5 mm. Nufrezuotų paviršių šiurkštumas R_z buvo matuojamas nustatytuose pjovimo kelio L intervaluose (10 lent.). Viename bandinyje matavimai buvo atliekami penkiose vietose, išilgai medienos pluoštui.



65 pav. Nufrezuoto paviršiaus šiurkštumo matavimas; 1 – šiurkštumo matuoklis; 2 – bandinys

2.7. Pjovimo režimų skaičiavimai

Pastūma, vienam pjovikliui, buvo apskaičiuota pagal formulę:

$$u_z = \frac{1000 \times u}{nz} \quad (2)$$

Čia: u – pastūmos greitis, m/min;
 n – pjovimo įrankio apsisukimų dažnis, min⁻¹.
 z – pjoviklių skaičius, vnt;

Pastūmos greitį galima apskaičiuoti pagal formulę:

$$u = \frac{u_z z n}{1000} \quad (3)$$

Čia: u – pastūmos greitis, m/min;
 u_z – pastūma vienam pjovikliui, mm;
 z – pjoviklių skaičius, vnt;
 n – pjovimo įrankio apsisukimų dažnis, min⁻¹.

Pjovimo greitis buvo apskaičiuotas pagal formulę:

$$v = \frac{\pi D n}{60 \times 1000} \quad (4)$$

Čia: v – pjovimo greitis, m/s;
 D – įrankio skersmuo, mm;
 n – įrankio apsisukimų dažnis, min⁻¹.

Kontaktinio lanko ilgis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$l = \sqrt{hD} \quad (5)$$

Čia: l – kontaktinio lanko ilgis, mm;
 h – nupjaunamo sluoksnio storis, mm.
 D – įrankio skersmuo, mm.

2.8. Statistiniai skaičiavimai

Matavimo rezultatų aritmetinis vidurkis apskaičiuojamas naudojant formulę:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}; \quad (6)$$

Čia: $\sum_{i=1}^n x_i$ – matavimo rezultatų suma;
 n – rezultatų kiekis.

Dispersija apskaičiuojama:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}; \quad (7)$$

Čia: $x_i - \bar{x}$ – atskiro rezultato nuokrypis nuo aritmetinio vidurkio.

Vidutinis kvadratinis nuokrypis apskaičiuojamas:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}; \quad (8)$$

Variacijos koeficientas apskaičiuojamas:

$$v = \frac{s}{\bar{x}} 100; \quad (9)$$

Čia: s – vidutinis kvadratinis nuokrypis;
 \bar{x} – matavimo rezultatų aritmetinis vidurkis

Atsitiktinė matavimo rezultato paklaida apskaičiuojama pagal formulę:

$$\Delta = t_{\beta} \frac{s}{\sqrt{n}}; \quad (10)$$

Čia: t_{β} – koeficientas (Stjudento kriterijus).

Pasikliautinis intervalas apskaičiuojamas:

$$I_{\beta} = (\bar{x} - \Delta; \bar{x} + \Delta); \quad (11)$$

Čia: Δ - atsitiktinė matavimo rezultatų paklaida.

Santykinė atsitiktinė paklaida apskaičiuojama:

$$\delta_{ats.} = \frac{\Delta}{\bar{x}} 100; \% \quad (12)$$

Bendroji matavimo rezultato santykinė paklaida randama:

$$\delta_b = \sqrt{\delta_{ats.}^2 + \delta^2}; \quad (13)$$

Čia: $\delta_{ats.}$ – santykinė atsitiktinė paklaida;
 δ – santykinė sisteminė paklaida.

3. REZULTATŲ APITARIMAS

Atlikus tyrimus, nustatyta dangos tipo, pjovimo greičio ir pjovimo kelio įtaka frezų ašmenų patvarumo dilimui. Nustatyta kaip paminėti veiksniai įtakoja frezų ašmenų mikrogeometrijos pokyčius. Šio tyrimo metu taip pat nuosekliai buvo tirta kokią įtaką frezuotų paviršių kokybei turi frezos ašmenų dilimas ir frezavimo greičio pokytis. Frezuotų paviršių kokybė įvertinta šiurkštumo parametru R_z .

3.1 Įvairių veiksnių įtaka frezų ašmenų dilimui

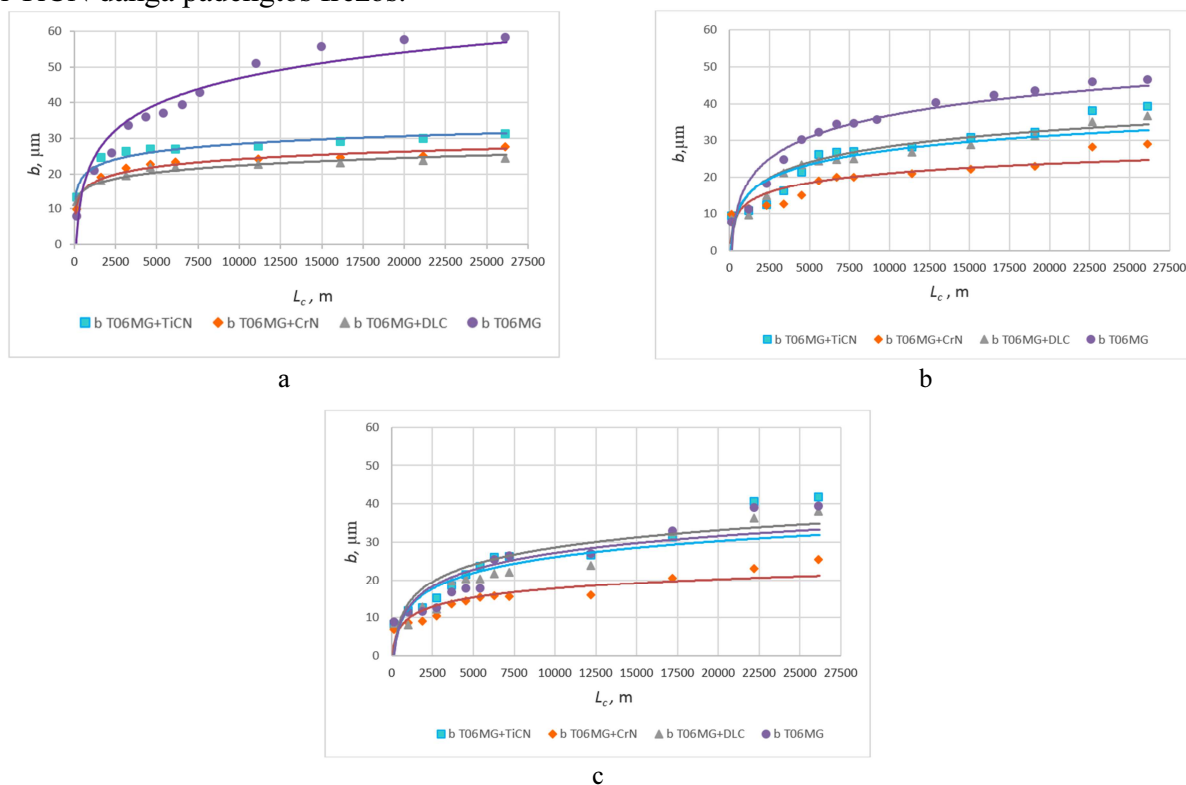
3.1.1 Dangos tipo įtaka frezų ašmenų dilimui

Tyrimo metu nustatyta, kad dangos tipas yra svarbus veiksnys, įtakojantis frezų ašmenų patvarumą dilimui. Rezultatų grafikai pateikti 66 paveiksle, o skaitinės vertės pateiktos 3 priede.

Rezultatai parodė, kad frezuojant režimu Nr. 1, T06MG freza, nepadengta jokia danga, buvo mažiausiai patvari dilimui. Freza padengta TiCN danga buvo 46,3 % patvaresnė, CrN danga padengta freza buvo 52,7 % patvaresnė. Patvariausia dilimui T06MG + DLC danga dengta freza. Šios frezos ašmenys dilo vidutiniškai 58,1 % mažiau nei T06MG frezos.

Frezuojant režimu Nr. 2, T06MG freza, buvo mažiausiai patvari dilimui. Freza padengta TiCN danga buvo 15,3 % patvaresnė, DLC danga padengta freza buvo 21,1 % patvaresnė. Patvariausia dilimui CrN danga dengta freza. Šios frezos ašmenys dilo vidutiniškai 37,6% mažiau nei T06MG frezos.

Frezuojant režimu Nr. 3, mažiausiai patvari dilimui buvo freza padengta TiCN danga. T06MG freza buvo 5,7 % patvaresnė, DLC danga padengta freza buvo 9,1 % patvaresnė. Patvariausia dilimui CrN danga dengta freza. Šios frezos ašmenys dilo vidutiniškai 39,2 % mažiau nei TiCN danga padengtos frezos.



66 pav. Ašmenų dangos įtaka frezų ašmenų patvarumui: a – frezuojant režimu Nr. 1; b – frezuojant režimu Nr. 2; c –

Gautus rezultatus palyginus su W. Szymanski ir kitų tyrėjų tyrimo rezultatais, pastebėta, kad įrankius padengus CrCN/CrN danga, įrankių atsparumas dilimui padidėjo, lyginant su dangomis nepadengtais įrankiais [51]. M. A. Djouadi ir kiti savo straipsnyje teigia, kad, lyginant TiN, CrN, Cr ir DLC dangomis padengtus įrankius, didžiausiu patvarumu dilimui pasižymėjo CrN padengti įrankiai. Jie buvo vidutiniškai 2,5 karto patvaresni už TiN danga padengtus įrankius ir vidutiniškai 1.8 karto patvaresni už DLC danga padengtus įrankius [52].

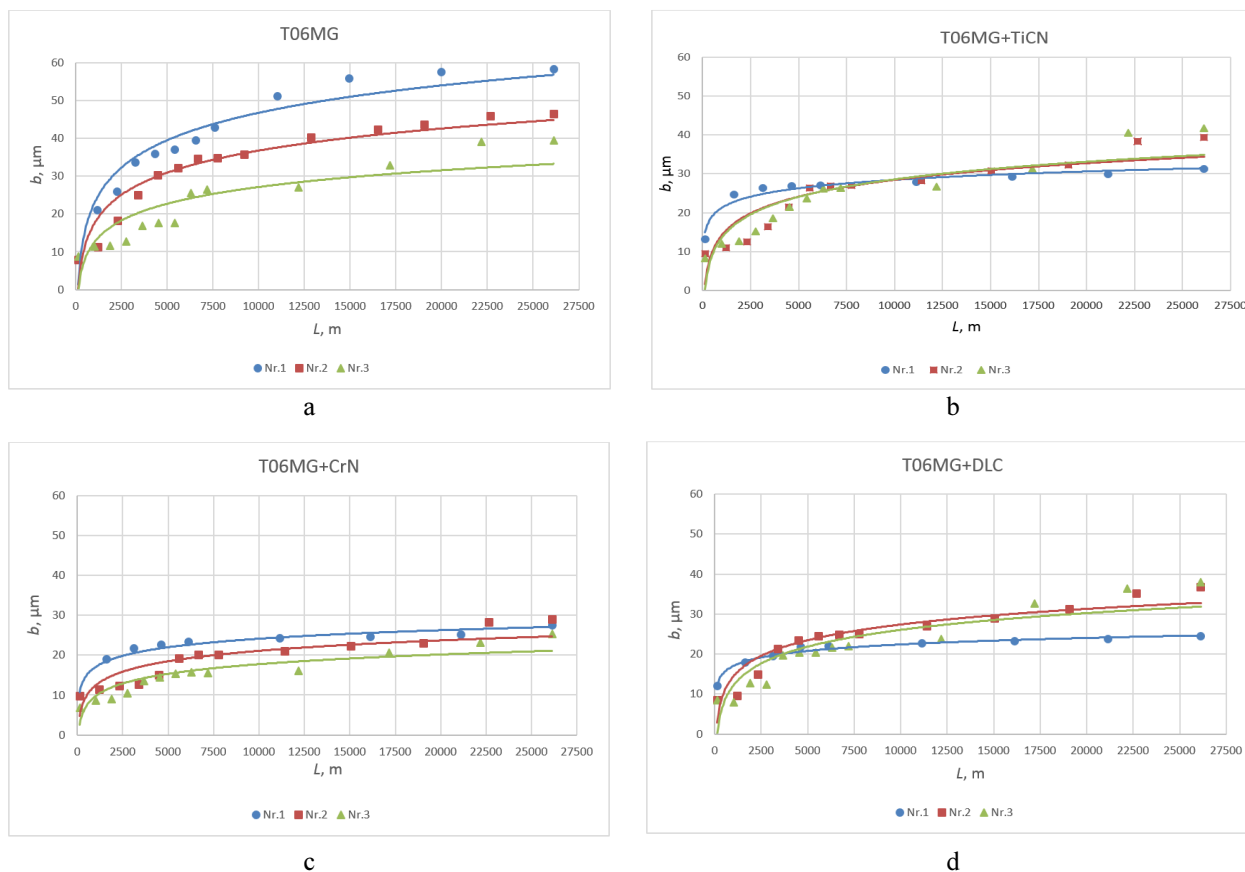
3.1.2 Pjovimo greičio įtaka frezų ašmenų dilimui

Antrasis veiksnys, įtakojantis įrankių patvarumą dilimui buvo pjovimo greitis v . Jo įtaka nustatyta, analizuojant dangomis nepadengtos T06MG frezos patvarumo dilimui rezultatus (67 pav. a), gautus frezuojant režimais Nr. 1; 2 ir 3. T06MG freza intensyviau dyla kai buvo frezuojama režimu Nr. 1. Frezuojant režimu Nr 2, t.y. padidėjus pjovimo greičiui v nuo 11,3 m/s iki 13,2 m/s, šios frezos dilimas sulėtėja 25,2 %. Frezuojant režimu Nr 3, didėjant pjovimo greičiui v iki 15,1 m/s šios frezos ašmenys dyla vidutiniškai 32,4 % mažiau, nei frezuojant frezavimo režimu Nr.1.

Analizuojant frezų, padengtų dangomis, rezultatus, pastebėta, kad esant frezavimo režimui Nr. 2, TiCN danga padengtos frezos ašmenys dyla vidutiniškai 2,9 % daugiau, nei frezuojant frezavimo režimu Nr. 1. Didėjant pjovimo greičiui v , esant frezavimo režimui Nr. 3, šios frezos ašmenys dyla vidutiniškai 33,5 % daugiau, nei frezuojant frezavimo režimu Nr.1 (67 pav.b).

Esant frezavimo režimui Nr 2, CrN danga dengtos frezos ašmenys dyla vidutiniškai 16,7 % mažiau, nei frezuojant frezavimo režimu Nr. 1. Didėjant pjovimo greičiui v ir esant frezavimo režimui Nr.3, šios frezos ašmenų dilimas sumažėja vidutiniškai 8 %, nei frezuojant frezavimo režimu Nr. 1 (67 pav. c).

Frezuojant režimu Nr 2, DLC danga padengtos frezos ašmenys dyla vidutiniškai 27,9 % daugiau, nei frezuojant frezavimo režimu Nr. 1. O frezuojant režimu Nr. 3, šios frezos pjaunančioji briauna dyla vidutiniškai 55,7 % daugiau, nei frezuojant frezavimo režimu Nr. 1 (67 pav. d).



67 pav. Pjovimo greičio v įtaka frezų ašmenų patvarumui, frezuojant: a – T06MG freza; b – T06MG + TiCN freza; c – T06MG + CrN freza; d – T06MG + DLC freza; L – pjovimo kelias; b – ašmenų plotis

Gauti rezultatai buvo palyginti su kitų autorių darbais. G. Ramasamy ir M. C. Perkins savo straipsnyje teigia, kad frezuojant kai kurių rūšių medieną, didėjant pjovimo greičiui, įrankių dilimas gali intensyvuoti [53].

3.1.3 Pjovimo kelio įtaka frezų ašmenų dilimui

Trečiasis veiksnys, įtakojantis įrankių patvarumą dilimui buvo pjovimo kelias L . Nustatyta, kad didėjant pjovimo kelio L skaitinėms vertėms, padidėja ašmenų ašmenų plotis b . Pjovimo kelio L įtaka nustatyta, analizuojant frezų, patvarumo dilimui rezultatus (66 pav. a), gautus frezuojant režimais Nr. 1; 2 ir 3.

Frezuojant režimu Nr. 1, tyrimų rezultatai parodė (66 pav. a), kad pjovimo kelio L atkarpoje iki 3132 m visų frezų dilimo pobūdis yra panašus. Šiame etape vyksta intensyvus įdirbinis dilimas, kurio metu sparčiai didėja visų frezų ašmenų pločio b skaitinės vertės. Šioje frezavimo kelio atkarpoje, freza T06MG dyla intensyviausiai, lyginant su frezomis, kurios padengtos dangomis.

Pjovimo kelio atkarpoje iki 9130 m, visų frezų dilimas tampa mažiau intensyvus, tačiau jau pastebimas akivaizdus skirtumas tarp nepadengtos danga ir padengtų dangomis frezų patvarumo dilimui.

Tolimesnėje kelio L atkarpoje iki 26132 m visų frezų dilimas sulėtėja, Tačiau patvarumo skirtumas tarp frezos T06MG ir frezų padengtų dangomis, padidėja (66 pav. a).

Frezuojant režimu Nr. 2, nepadengta freza, pastebėta, kad įdirbinis dilimas vyksta iki 4498 m pjovimo kelio L ribos. Šioje atkarpoje pastebėta, kad nepadengta freza dyla intensyviausiai. Atkarpoje nuo 4498 iki 6682 m pjovimo kelio L ribos dilimas sulėtėja, vyksta pereinamasis etapas iš įdirbinio dilimo į nusistovėjusio dilimo fazę. Toliau, pjovimo kelio L atkarpoje iki 26130 m ašmenų dilimo intensyvumas dar labiau sumažėja, vyksta nusistovėjusio ašmenų dilimo fazė.

Tačiau patvarumo skirtumas tarp nedengtos ir dengtų frezų padidėja ir išlieka didžiausias (66 pav. b).

Frezuojant režimu Nr. 2, TiCN ir CrN dangomis padengtomis frezomis, pastebėta, kad intensyviausias įdirbinis, dilimas vyksta iki 4498 m pjovimo kelio L ribos. Atkarpoje nuo 4498 iki 26130 m pjovimo kelio L ribos, ašmenų dilimas sulėtėja, vyksta nusistovėjusio dilimo fazė. Pereinamojo etapo tarp įdirbinio ir nusistovėjusio dilimo fazių nepastebėta (66 pav. b).

Frezuojant režimu Nr. 2, DLC danga padengta freza, pastebėta, kad intensyviausias dilimas vyksta iki 3406 m pjovimo kelio L ribos. Atkarpoje nuo 3406 iki 5590 m pjovimo kelio L ribos dilimo intensyvumas sumažėja, vyksta pereinamasis etapas iš įdirbinio dilimo į nusistovėjusio dilimo fazę. Pjovimo kelio L atkarpoje iki 26130 m ašmenų dilimas dar labiau sumažėja, vyksta nusistovėjusio ašmenų dilimo fazė (66 pav. b). Frezuojant režimu Nr. 2, CrN danga padengta freza dyla mažiausiai.

Frezuojant režimu Nr. 3, labiausiai dilo freza padengta TiCN danga. Šios frezos intensyviausias įdirbinis dilimas, vyko iki 6299 m pjovimo kelio L ribos. Jau šioje frezavimo kelio atkarpoje, pastebėta, kad freza dengta TiCN danga dyla intensyviausiai. Pjovimo kelio L atkarpoje nuo 6299 iki 26130 m dilimo intensyvumas sumažėja, tačiau išlieka didžiausias lyginant su kitomis frezomis (66 pav. c).

Frezuojant režimu Nr. 3, nepadengta ir DLC danga padengta frezomis, pastebėta, kad jų dilimo pobūdis yra panašus. Abi šios frezos intensyviausiai dilo iki 3655 m. pjovimo kelio L ribos. Pjovimo kelio L atkarpoje nuo 3655 iki 6299 m dilimas tapo mažiau intensyvus. O pjovimo kelio L atkarpoje nuo 6299 iki 26130 m dilimo intensyvumas dar labiau sulėtėjo (66 pav. c). Frezuojant režimu Nr. 3, mažiausiai dilo CrN danga padengta freza. Intensyviausias šios frezos dilimas vyko pjovimo kelio L atkarpoje iki 3655 m. Atkarpoje nuo 3655 m iki 26130 m pjovimo kelio L ribos, CrN danga dengtos frezos dilimo intensyvumas sumažėja (66 pav. c). Kad įsitikinti ar gauti rezultatai atitinka dėsningumus, reikia paminėti keleto autorių išvadas: K. Demjanovskij teigia, kad didėjant pjovimo kelio L skaitinėms vertėms, padidėja ašmenų pločio b skaitinės vertės [24]. G. A. Zotov, E. A. Pamfilov bei G. Ramasamy ir J. Ratnasingam savo tyrimuose nustatė, kad intensyviausias įrankio ašmenų dilimas vyksta esant įdirbiniam dilimo etapui. Įrankio ašmenų dilimui sumažėjus prasideda nusistovėjusio ašmenų dilimo fazė [25, 48].

3.2 Įvairių veiksnių įtaka frezuotų paviršių kokybei

3.2.1 Frezų ašmenų mikrogeometrijos įtaka apdirbto paviršiaus kokybei

Pirmasis veiksnys įtakojantis apdirbto paviršiaus kokybę yra ašmenų mikrogeometrija. Kintant ašmenų pločio b skaitinėms vertėms, kinta apdirbto paviršiaus kokybė. Apdirbto paviršiaus kokybė buvo nustatyta matuojant šiurkštumo parametro R_z skaitines vertes.

Frezuojant režimu Nr. 1, esant pjovimo kelio $L = 130$ m atkarpai, didžiausiu šiurkštumu pasižymėjo nepadengta, T06MG, freza apdirbtas paviršius. TiCN danga padengta freza apdirbto paviršiaus šiurkštumas buvo 13,1 % mažesnis. DLC danga padengta freza apdirbtas paviršius pasižymėjo 17,8 % mažesniu šiurkštumu. Mažiausiu šiurkštumu pasižymėjo CrN danga padengta freza apdirbtas paviršius. Jis buvo 20,7 % mažesnis, lyginant su nepadengta freza apdirbtu paviršiumi, esant 130 m pjovimo keliui L .

Frezuojant režimu Nr. 1, esant pjovimo kelio $L = 26130$ m atkarpai, didžiausiu šiurkštumu pasižymėjo taip pat jokia danga nepadengta freza apdirbtas paviršius.

TiCN danga padengta freza apdirbto paviršiaus šiurkštumas buvo 72,4 % mažesnis. CrN danga padengta freza apdirbtas paviršius pasižymėjo 74 % mažesniu šiurkštumu. Mažiausiu šiurkštumu pasižymėjo DLC danga padengta freza apdirbtas paviršius. Jis buvo 74,4 % mažesnis, lyginant su nedengta freza apdirbtu paviršiumi (68 pav. a).

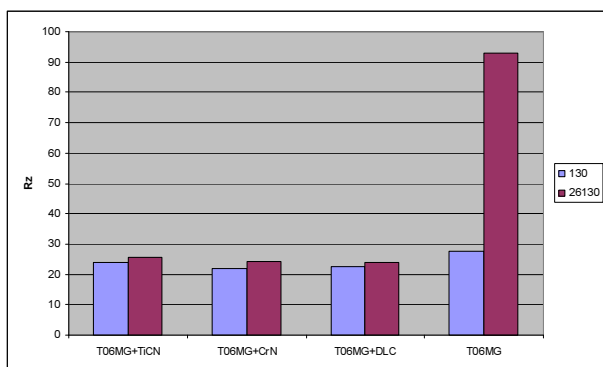
Frezuojant režimu Nr. 2, 130 m pjovimo kelio *L* atkarpoje, didžiausiu šiurkštumu pasižymėjo nedengta freza apdirbtas paviršius. TiCN danga dengta freza apdirbto paviršiaus šiurkštumas buvo 12,9 % mažesnis. CrN danga dengta freza apdirbtas paviršius pasižymėjo 13,6 % mažesniu šiurkštumu. Mažiausiu šiurkštumu pasižymėjo DLC danga padengta freza apdirbtas paviršius. Jis buvo 19 % mažesnis, lyginant su nedengta freza apdirbtu paviršiumi, esant 130 m pjovimo keliui *L*.

Frezuojant režimu Nr. 2, esant pjovimo kelio *L* 26130 m atkarpai, didžiausiu šiurkštumu pasižymėjo T06MG freza apdirbtas paviršius. TiCN danga dengta freza apdirbto paviršiaus šiurkštumas buvo 33,1 % mažesnis. DLC danga dengta freza apdirbtas paviršius pasižymėjo 38,9 % mažesniu šiurkštumu. Mažiausiu šiurkštumu pasižymėjo CrN danga dengta freza apdirbtas paviršius. Jis buvo 50,3 % mažesnis, lyginant su T06MG freza apdirbtu paviršiumi (68 pav.b.).

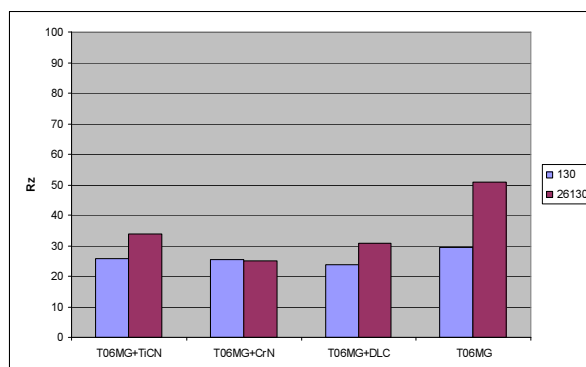
Frezuojant režimu Nr. 3, 130 m pjovimo kelio *L* atkarpoje, didžiausiu šiurkštumu pasižymėjo T06MG freza apdirbtas paviršius. DLC danga padengta freza apdirbto paviršiaus šiurkštumas buvo 8,2 % mažesnis. CrN danga dengta freza apdirbtas paviršius pasižymėjo 11,5 % mažesniu šiurkštumu. Mažiausiu šiurkštumu pasižymėjo TiCN danga dengta freza apdirbtas paviršius. Jis buvo 12,5 % mažesnis, lyginant su nedengta freza apdirbtu paviršiumi, esant 130 m pjovimo keliui *L* (68 pav. c.).

Frezuojant režimu Nr. 3, esant pjovimo kelio *L* = 26130 m atkarpai, didžiausiu šiurkštumu pasižymėjo TiCN danga padengta freza apdirbtas paviršius. Jis buvo 6,7 % šiurkštesnis nei jokia danga nepadengta freza apdirbtas paviršius. DLC danga dengta freza apdirbto paviršiaus šiurkštumas buvo 0,4 % didesnis nei nedengta freza apdirbto paviršiaus šiurkštumas. Mažiausiu šiurkštumu pasižymėjo CrN danga dengta freza apdirbtas paviršius. Jis buvo 48,4 % mažesnis, lyginant su nepadengta freza apdirbtu paviršiumi (68 pav.c.).

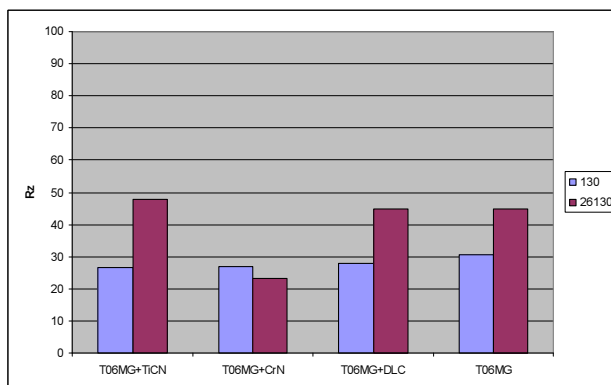
Gautus rezultatus palyginome su kitų tyrėjų gautais rezultatais. K. I. Demjanovskij teigia, kad didėjant ašmenų pjaunančiosios briaunos pločiui, blogėja apdirbto paviršiaus kokybė [24]. A. Gilewicz ir kiti savo straipsnyje teigia, kad įrankiais dengtais dangomis, kurių pagrindą sudaro CrN, apdirbto paviršiaus kokybė pagerėjo lyginant su paviršiais, kurie buvo apdirbti įrankiais nepadengtais jokiomis dangomis [54]. Apie TiCN ir DLC dangomis padengtais įrankiais apdirbto paviršiaus kokybę duomenų nepateikta.



a



b



c

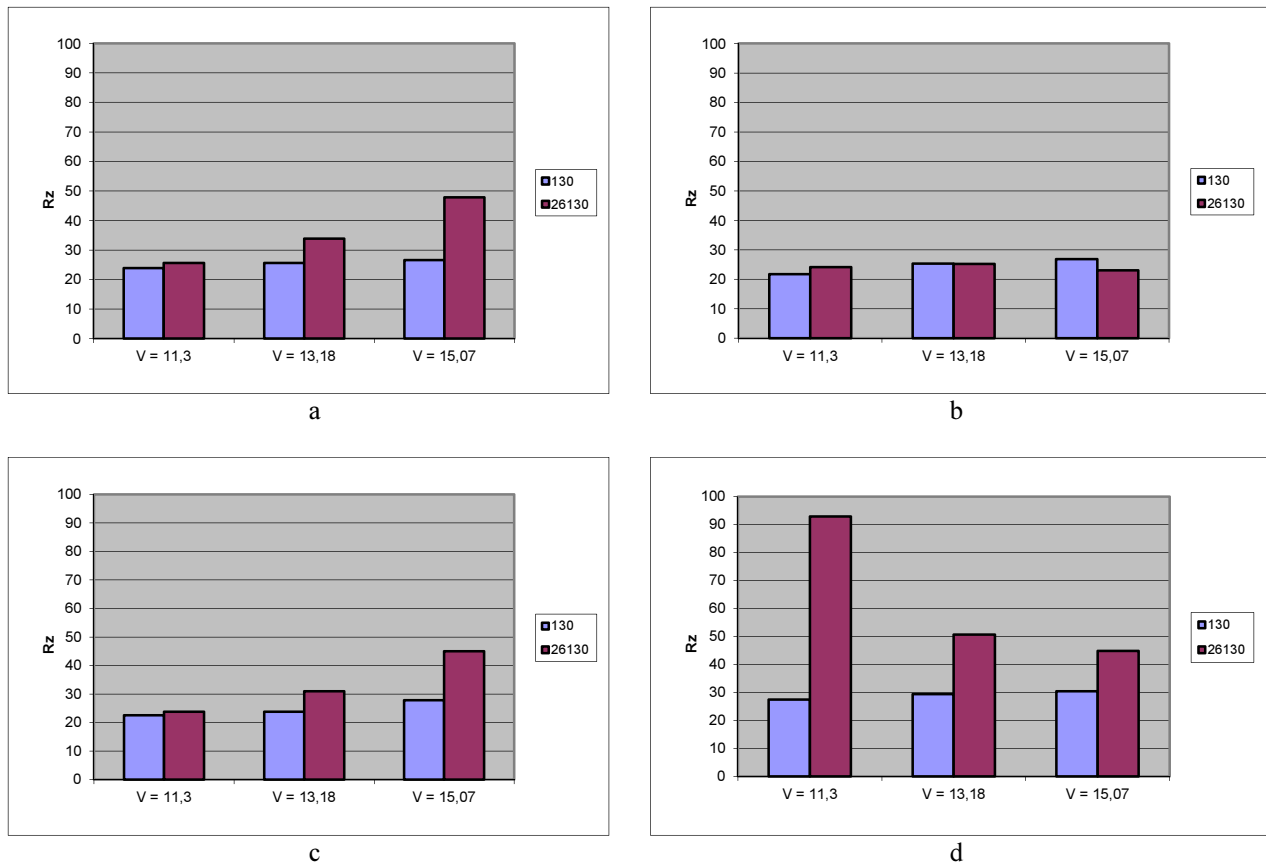
68 pav. Ašmenų dangos įtaka frezuotų paviršių šiurkštumui: a – frezuojant režimu Nr. 1; b – frezuojant režimu Nr. 2; c – frezuojant režimu Nr. 3; R_z – paviršiaus šiurkštumo parametras

3.2.2 Pjovimo greičio įtaka frezuotų paviršių kokybei

Antrasis veiksnys įtakojantis apdirbto paviršiaus kokybę, buvo pjovimo greitis v . Pjovimo greičio v įtaka apdirbto paviršiaus kokybei buvo tiriama frezuojant ažuolo medienos bandinius įvairiais režimais.

Esant pjovimo keliui $L = 130$ m, freza padengta TiCN danga, režimu Nr. 2 nufrezuoto paviršiaus šiurkštumas padidėja 6,6 %, nei frezuojant režimu Nr. 1. Frezuojant režimu Nr. 3 nufrezuoto paviršiaus šiurkštumas padidėja 10,2 %, nei frezuojant režimu Nr. 1 (69 pav. a).

Esant pjovimo keliui $L = 26130$ m, TiCN danga padengta freza, režimu Nr. 2 nufrezuoto paviršiaus šiurkštumas padidėja 24,5 %, nei frezuojant režimu Nr. 1. Padidinus pjovimo greitį v , t.y. frezuojant režimu Nr. 3, nufrezuoto paviršiaus šiurkštumas padidėja 46,4 %, nei frezuojant režimu Nr. 1 (69 pav. a).



69 pav. Pjovimo greičio v įtaka nufrezuoto paviršiaus šiurkštumui R_z , frezuojant: a – TiCN danga dengta freza; b – CrN danga dengta freza; c – DLC danga dengta freza; d – jokiomis dangomis nedengta freza

Esant pjovimo keliui $L = 130$ m, freza padengta CrN danga, režimu Nr. 2 nufrezuoto paviršiaus šiurkštumas padidėja 14,2 %, nei frezuojant režimu Nr. 1. Frezuojant režimu Nr. 3, nufrezuoto paviršiaus šiurkštumas padidėja 19 %, nei frezuojant režimu Nr. 1 (69 pav. b).

Esant pjovimo keliui $L = 26130$ m, CrN danga padengta freza, režimu Nr. 2, nufrezuoto paviršiaus šiurkštumas padidėja 4 %, nei frezuojant režimu Nr. 1. Padidinus pjovimo greitį v , frezuojant režimu Nr 3, nufrezuoto paviršiaus šiurkštumas sumažėja 4,8 %, nei frezuojant režimu Nr. 1 (69 pav. b).

Esant pjovimo keliui $L = 130$ m, freza padengta DLC danga, režimu Nr. 2 nufrezuoto paviršiaus šiurkštumas padidėja 5 %, nei frezuojant režimu Nr. 1. Frezuojant režimu Nr. 3, nufrezuoto paviršiaus šiurkštumas padidėja 19 %, nei frezuojant režimu Nr. 1 (69 pav. c).

Esant pjovimo keliui $L = 26130$ m, DLC danga padengta freza, režimu Nr. 2 nufrezuoto paviršiaus šiurkštumas padidėja 23,2 %, nei frezuojant režimu Nr. 1. Padidinus pjovimo greitį v , frezuojant režimu Nr 3, nufrezuoto paviršiaus šiurkštumas padidėja 47,1 %, nei frezuojant režimu Nr. 1 (69 pav. c).

Esant pjovimo keliui $L = 130$ m, freza nepadengta jokia danga, režimu Nr. 2 nufrezuoto paviršiaus šiurkštumas padidėja 6,5 %, nei frezuojant režimu Nr. 1. Frezuojant režimu Nr. 3, nufrezuoto paviršiaus šiurkštumas padidėja 9,5 %, nei frezuojant režimu Nr. 1 (69 pav. d).

Esant pjovimo keliui $L = 26130$ m, nepadengta freza, režimu Nr. 2 nufrezuoto paviršiaus šiurkštumas sumažėja 83,2 %, nei frezuojant režimu Nr. 1. Padidinus pjovimo greitį v , t.y. frezuojant režimu Nr 3, nufrezuoto paviršiaus šiurkštumas sumažėja 107,4 %, nei frezuojant režimu Nr. 1 (69 pav. d).

Tyrėjai I. Usta ir kiti, bei A. Malkocoglu teigia, kad didėjant pjovimo greičiui, apdirbto paviršiaus kokybė blogėja [55, 5]. Tačiau G. Keturakio ir I. Juodeikienės tyrimų rezultatai rodo, kad padidinus pjovimo greitį apdirbto paviršiaus kokybė pagerėjo [6].

3.2.3 Pjovimo kelio įtaka frezuotų paviršių kokybei

Trečiasis veiksnys įtakojantis apdirbto paviršiaus kokybę, buvo pjovimo kelias L . Apdirbto paviršiaus kokybė buvo tiriama didėjant pjovimo kelio L skaitinėms vertėms, frezuojant bandinius režimais Nr. 1, Nr. 2, Nr. 3.

Frezuojant režimu Nr. 1, freza nedengta jokia danga, pastebėta, kad apdirbto paviršiaus šiurkštumas esant pjovimo keliui $L = 26130$ m, yra 70,4 % didesnis, nei esant 130 m pjovimo kelio L atkarpai (žr. 69 pav.). Frezuojant freza padengta TiCN danga, pastebėta, kad apdirbto paviršiaus šiurkštumas esant pjovimo keliui $L = 26130$ m, yra 6,6 % didesnis, nei esant 130 m pjovimo kelio L atkarpai. Frezuojant freza padengta CrN danga, pastebėta, kad apdirbto paviršiaus šiurkštumas esant pjovimo keliui $L = 26130$ m, yra 9,9 % didesnis, nei esant 130 m pjovimo kelio L atkarpai. Frezuojant freza padengta DLC danga, pastebėta, kad apdirbto paviršiaus šiurkštumas esant pjovimo keliui $L = 26130$ m, yra 23,8 % didesnis, nei esant 130 m pjovimo kelio L atkarpai.

Frezuojant režimu Nr. 2, freza nedengta jokia danga, pastebėta, kad apdirbto paviršiaus šiurkštumas esant pjovimo keliui $L = 26130$ m, yra 42 % didesnis, nei esant 130 m pjovimo kelio L atkarpai. Frezuojant freza padengta TiCN danga, pastebėta, kad apdirbto paviršiaus šiurkštumas esant pjovimo keliui $L = 26130$ m, yra 24,5 % didesnis, nei esant 130 m pjovimo kelio L atkarpai. Frezuojant freza padengta CrN danga, pastebėta, kad apdirbto paviršiaus šiurkštumas esant pjovimo keliui $L = 26130$ m, yra 0,8 % mažesnis, nei esant 130 m pjovimo kelio L atkarpai. Frezuojant freza padengta DLC danga, pastebėta, kad apdirbto paviršiaus šiurkštumas esant pjovimo keliui $L = 26130$ m, yra 23,2 % didesnis, nei esant 130 m pjovimo kelio L atkarpai.

Frezuojant režimu Nr. 3, freza nedengta jokia danga, pastebėta, kad apdirbto paviršiaus šiurkštumas esant pjovimo keliui $L = 26130$ m, yra 32,1 % didesnis, nei esant 130 m pjovimo kelio L atkarpai. Frezuojant freza padengta TiCN danga, pastebėta, kad apdirbto paviršiaus šiurkštumas esant pjovimo keliui $L = 26130$ m, yra 44,4 % didesnis, nei esant 130 m pjovimo kelio L atkarpai. Frezuojant freza padengta CrN danga, pastebėta, kad apdirbto paviršiaus šiurkštumas esant pjovimo keliui $L = 26130$ m, yra 16,5 % mažesnis, nei esant 130 m pjovimo kelio L atkarpai.

Frezuojant freza padengta DLC danga, pastebėta, kad apdirbto paviršiaus šiurkštumas esant pjovimo keliui $L = 26130$ m, yra 38 % didesnis, nei esant 130 m pjovimo kelio L atkarpai.

Gautų rezultatų palyginimui, reikia pastebėti, jog tyrėjai G. Keturakis ir I. Juodeikienė teigia, kad didėjant pjovimo keliui didėja įrankio ašmenų pločio faktinės vertės, todėl medienos apdirbto paviršiaus kokybė blogėja [6].

4. IŠVADOS

1. Nustatyta, kad dangos tipas yra svarbus veiksnys, įtakojantis frezų ašmenų patvarumą dilimui. Tačiau dangų patvarumą ir elgseną įtakoja frezavimo režimo technologiniai veiksniai, iš kurių didžiausią įtaką daro pjovimo greitis. Didėjant pjovimo greičiui, dangų patvarumas dilimui keitėsi.
2. Nustatyta, kad prie frezavimo režimų Nr. 1 ir Nr. 2, mažiausiai patvari dilimui buvo jokia danga nepadengta freza.
3. Atlikus frezavimo bandymus režimu Nr. 1, patvariausia dilimui buvo DLC danga padengta freza. Ji buvo 2,4 karto patvaresnė dilimui, nei freza be dangos. Tuo tarpu freza su CrN danga buvo 2,1 karto, o freza su TiCN danga – 1,9 karto patvaresnės už frezą be dangos.
4. Atlikus frezavimo bandymus režimu Nr. 2, patvariausia dilimui buvo CrN danga padengta freza. Ji buvo 2 kartus patvaresnė dilimui, nei freza be dangos. Tuo tarpu freza su DLC danga buvo 1,9 karto, o freza su TiCN danga – 1,6 karto patvaresnės už frezą be dangos.
5. Atlikus frezavimo bandymus režimu Nr. 3, patvariausia dilimui buvo CrN danga padengta freza. Ji buvo 1,6 karto, o freza su DLC danga - 1,1 karto patvaresnė dilimui, nei freza be dangos. Tuo tarpu frezos su TiCN danga patvarumas dilimui buvo 5,7 % mažesnis už frezos be dangos.
6. Nustatyta, kad pjovimo greičio padidėjimas nevienodai veikia įvairiomis dangomis padengtų frezų ašmenų dilimą. Padidėjus pjovimo greičiui nuo 11,3 iki 15,1 m/s, frezos nepadengtos danga ašmenų dilimo intensyvumas sumažėjo vidutiniškai 1,5 karto, padengtos CrN danga – 1,1 karto. Tačiau frezos padengtos TiCN danga dilimo intensyvumas padidėjo 1,3 karto, o frezos padengtos DLC danga, padidėjo 1,6 karto.
7. Didžiausią įtaką frezų ašmenų dilimui turėjo pjovimo kelias. Frezuojant įvairiais frezavimo režimais, intensyviausiai ašmenys dilo įdirbiniame dilimo etape, pjovimo kelio atkarpoje iki 3132 m. Pjovimo kelio atkarpoje nuo 3132 iki 26132 m visų frezų dilimas nusistovėjo ir laipsniškai perėjo į monotoninio dilimo etapą.
8. Nustatyta, kad įdirbiniame ašmenų dilimo etape, didėjant pjovimo greičiui, įvairiomis dangomis padengtų frezų apdirbtų paviršių kokybė pablogėjo.
9. Nustatyta, kad didėjant pjovimo kelio skaitinėms vertėms, frezuojant įvairiais pjovimo greičiais, nepadengtos danga ir TiCN bei DLC dangomis padengtų frezų ašmenų dilimas padidėja ir tai įtakoja frezuotų paviršių kokybės pablogėjimą. Didėjant pjovimo greičiui ir pjovimo kelio skaitinėms vertėms, CrN danga padengtos frezos ašmenų dilimas taip pat padidėja, bet apdirbto medienos paviršiaus kokybė pagerėja. Šie rezultatai reikalauja papildomų tyrimų.
10. Rekomenduojama toliau tęsti frezų padengtų TiCN, CrN ir DLC dangomis, patvarumo tyrimus, tiriant pjovimo bei pastūmos greičių, medienos biologinės rūšies ir drėgnio įtaką frezų ašmenų dilimo dinamikai bei apdirbtų paviršių kokybei.

5. LITERATŪROS SĄRAŠAS:

1. **Č. Jakimavičius**, Medienotyra, Kaunas, Technologija, 2002.
2. **I. Juodeikienė**, Medienos sandara. Kaunas, Technologija, 2011.
3. **J. V. Gražulevičius, R. Kavaliūnas**, Medienos cheminė technologija, Lietuva, 2012
4. **A. Morkevičius, B. Papreckis**, Mediena ir jos gaminiai, Senoja, 2004.
5. **A. Malkocoglu**. Machining properties and surface roughness of various wood species planed in different conditions. Science Direct Building and Environment 42 (2007) 2562–2567.
6. **G. Keturakis, I. Juodeikienė**. Investigation of Milled Wood Surface Roughness. Department of Mechanical Wood Technology, MATERIALS SCIENCE (MEDŽIAGOTYRA). Vol. 13, No. 1. 2007,
7. **J. Ruseckas**. Medienos pjovimo režimų skaičiavimas, metodiniai nurodymai. Kaunas, KPI, 1985.
8. **E. Magoss**. General Regularities of Wood Surface Roughness. Department of Wood Engineering, University of West Hungary, Sopron, Hungary Acta Silv. Lign. Hung., Vol. 4 (2008) 81-93.
9. **S. Aslan, H. Coskun, M. Kilic**. The effect of the cutting direction, number of blades and grain size of the abrasives on surface roughness of Taurus cedar (*Cedrus Libani* A. Rich.) woods. Science Direct, Building and Environment 43 (2008) 696–701.
10. **R. E. Hernandez, J. Cool**. Effects of cutting parameters on surface quality of paper birchwood machined across the grain with two planing techniques. Springer-Verlag 2008, Holz Roh Werkst (2008) 66: 147–154.
11. **S. Tiryaki, A. Malkocoglu, S. Ozsahin**. Using artificial neural networks for modeling surface roughness of wood in machining process. Construction and Building Materials 66 (2014) 329–335.
12. **L. Yixing, W. Jinman, L. Jian, Z. Xuezheng**. The Effect of wood surface roughness of different species of trees on wood color in working operation. Northeast Forestry University. J. Northeast For. Univ. Vol. 6, No.1, Mar. 1995
13. **S. El abed, K. S. Ibsouda, H. Latrache & S. Boutahari**. Theoretical effect of cedar wood surface roughness on the adhesion of conidia from *Penicillium expansum*. Springer-Verlag and the University of Milan 2011, Ann Microbiol (2012) 62:1361–1366.
14. **Internetinė prieiga:**
<http://www.mahr.com/scripts/relocateFile.php?ContentID=11904&NodeID=12343&FileID=10076&ContentDataID=35444&save=0>. – .
15. **M. Kilic, S. Hiziroglu, E. Burdurlu**. Effect of machining on surface roughness of wood. Building and Environment 41 (2006) 1074–1078.
16. **Wei Tang, Nanxuan Chen, Jiankai Zhang, Si Chen, Shirong Ge, Hua Zhu, Shaogang Zhang, Haifeng Yang**. Characterization of Tactile Perception and Optimal Exploration Movement. Springer Science+Business Media, New York 2015.
17. **J. Valíček, M. Držík, T. Hryniewicz, M. Harničárová, K. Rokosz, M. Kušnerová, K. Barčová, D. Bražina**. Non-Contact Method for Surface Roughness Measurement After Machining. MEASUREMENT SCIENCE REVIEW, Volume 12, No. 5, 2012.
18. **P. Koshy, D. Grandy, F. Klocke**, Pneumatic non-contact topography characterization of finish-ground surfaces using multivariate projection methods, Precision Engineering 35 (2011) 282–288, Elsevier.
19. **B. Bhushan**, Surface Roughness Analysis and Measurement Techniques, The Ohio State University, 2001.
20. **E. G. Ivanovskii, P. V. Vasilevskaja, E. M. Lautner**, Frezirovanie i pilenie drevesiny i drevesnykh materialov, Lesnaja promyslenost, Moskva, 1971 (Rusų kalba).
21. **A. Baltrušaitis**, Medienos pjovimo teorija, Mokomoji knyga. Kaunas, Technologija, 2009.

22. **Г. А. Зотов, Е. А. Памфилов**, Повышение стойкости дереворежущего инструмента, Экология, Москва, 1990.
23. **E. Csanady and E. Magoss**. Tool Wear, chapter 7, Mechanics of wood machining. DOI: 10.1007/978-3-642-2995-1_7, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013.
24. **К. Demjanovskii** Iznosostikost instrumenta dle frezerovanie drevesiny. Lesnaja promyslenost, Moskva, 1968 (Rusų kalba).
25. **E. A. Pamfilov, S. V. Lukashov, and Ya. S. Prozorov**; Mechanochemical fracture of the components of wood-cutting equipment. Materials Science, Vol. 50, No. 1, July, 2014 (Rusų kalba).
26. **B. Porankewicz**, Theoretical simulation of cutting edge wear when milling wood and wood based products. Springer - Verlag 2005 Wood Sci Technol 2006 40: 107 117.
27. **B. E. Klamecki**. Electrical Effects in Woodcutting Tool Wear, University of California, Forest Products Laboratory. Richmond Holz als Rob- Lind Werkstoff36 (1978) 107 - 110.
28. **J. Ruseckas**. Medienos pjovimo įrankių patvarumas paskaitų konspektas.
29. **H. Winkelmann, E. Badisch, M. Roy and H. Danninger**; Corrosion mechanisms in wood industry, especially caused by tanins. Materials and Corrosion 2009,60, No. 1.
30. **V. P. Astakhov**. Cutting Tool Materials and Tools; Chapter 4.
31. **L. Kulikauskas**. Medžiagotyra; Konstrukcinės medžiagos, Žara 1997.
32. **Internetinė prieiga:** <http://www.scielo.br/imgfbpemrv5n3a19f05.gif>
33. **Internetinė prieiga:** <http://www.forgemag.com/articles/83796-forging-materials-plain-carbon-and-low-alloy-steels-part-ii?v=preview>
34. **Internetinė prieiga:** <http://vacaero.com/information-resources/metallography-with-george-vander-voort/1174-revealing-the-microstructure-of-tool-steels.html>
35. **Internetinė prieiga:** <http://practicalmaintenance.net/?p=1595>
36. Įmonės **Tigra** įrankių katalogas 2011.
37. **Internetinė prieiga:** http://www.alibaba.com/product-detail/Best-seller-Monocrystalline-diamond-powder_301715726.html
38. **Internetinė prieiga:** http://unionamy.en.ec21.com/High_Efficiency_Polycrystalline_Diamond_Powder--5696262_5712976.html
39. **CNC Production routing guide**, 800 Liberty Drive Libertyville, Onsrud Cutter, 1996.
40. **S. Bočkus**. Medžiagų inžinerija 1 dalis, Technologija 2013, Kaunas.
41. **J. Ratajski, W. Gulbiński, J. Staśkiewicz, J. Walkowicz, P. Myśliński, A. Czyżniewski, T. Suszko, A. Gilewicz, B. Warcholiński**. Hard coatings for woodworking tools – a review. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. VOLUME 37 ISSUE 2 December 2009.
42. **C. A. Straede** Application of ion implantation in tooling industry Tribology Centre, DTI Industry, Danish Technological Institute, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 113(1996) I61 – 166.
43. **M. Rousek, Z. Kopecky**. Wear – resistant layers prepared by PVD technologies, Wood research, 52 (4): 2007, 89-100.
44. **A. K. Vershina**. Combined Plasma–Vacuum Processing of Wood-Cutting Tools. Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 2009, vol. 45, no. 3, p. 246–251. Allerton Press, Inc., 2009.
45. Įmonės **CemeCon** duomenys. Scandinavia A/S, Lokesvej 5, DK – 8230 Aabyhoej.
46. Įmonės **Zuani** duomenys.
47. **Internetinė prieiga:** <http://www.intechopen.com/books/new-features-on-magnesium-alloys-investigation-of-the-structure-and-properties-of-pvd-and-pacvd-coated-magnesium-die-cast-alloys>.
48. **G. Ramasamy, and J. Ratnasingam**. A Review of Cemented Tungsten Carbide Tool Wear during Wood Cutting Processes, Journal of Applied Sciences 10 (22): 2799-2804, 2010.

49. **S. Jakub¹, P. Bartosz², K. Grzegorz³**, Measurement Of The Cutting Tool Edge Recession With Optical Methods 1 Trees and Timber Institute IVALSA/CNR, San Michele All'Adige, ITALY, 2 Poznan University of Life Sciences, Poznan, POLAND, 3 Wood Technology Institute, Poznan, POLAND.
50. **Internetinè prieiga:** <https://www.flickr.com/photos/stmdimiuniroma3/5056977090>
51. **W. Szymański, A. Gilewicz, G. Pinkowski, P. Beer.** Durability of blades covered by multilayer anti-wear coatings during wood milling Ann. WULS - SGGW, Forestry and Wood Technology, 2010. 68/2009: 353 – 357.
52. **M. A. Djouadi, P. Beer, R. Marchal, A. Sokolowska, M. Lambertin, W. Precht, C. Nouveau.** Antiabrasive coatings: application for wood processing Surface and Coatings Technology 116–119 (1999) 508–516.
53. **J. Ratnasingam, and M. C. Perkins.** An investigation into the tool wear characteristics of rubber wood (*Hevea brasiliensis*) laminated veneer lumber. Holz Roh Werkst, 1998. 56: 31 - 35.
54. **A. Gilewicz., B. Warcholiński, P. Mysliński, W Szymański.** Anti-wear multilayer coatings based on chromium nitride for wood machining tools, Wear 2010. 270/2010: 32 –38.
55. **I. Usta, S. Demirci, Y. Kilic.** Comparison of surface roughness of Locust acacia (*Robinia pseudoacacia L.*) and European oak (*Quercus petraea (Mattu.) Lieble.*) in terms of the preparative process by planing. Building and Environment, 2007. 42: 2988-2992.

6. PRIEDAI

Priedas Nr. 1

Ąžuolo medienos bandinių tankio ρ skaičiavimai

Bandinių tūris V , m^3 apskaičiuojamas:

$$V = LWH, m^3; \quad (14)$$

Čia: L – bandinio ilgis, mm;
 W – bandinio plotis, mm;
 H – bandinio aukštis, mm.

Bandinių tankis ρ , kg/m^3 apskaičiuojamas:

$$\rho = \frac{m}{V}, kg/m^3; \quad (15)$$

Čia: m – bandinio masė, kg;
 V – bandinio tūris, m^3 .

Bandinio nr.	Ilgis L , mm	Plotis W , mm	Aukštis H , mm	Tūris V , m^3	Masė m , kg	Tankis ρ kg/m^3
1	900	31	20	0.000558	0.428	767.025
2	900	31	20	0.000558	0.334	598.566
3	900	31	20	0.000558	0.379	679.211
4	900	31	20	0.000558	0.416	745.520
5	900	31	20	0.000558	0.382	684.588
6	900	31	20	0.000558	0.419	750.896
7	900	31	20	0.000558	0.423	758.065
8	900	31	20	0.000558	0.433	775.986
9	900	31	20	0.000558	0.433	775.986
10	900	31	20	0.000558	0.425	761.649
11	900	31	20	0.000558	0.425	761.649
12	900	31	20	0.000558	0.409	732.975
13	900	31	20	0.000558	0.441	790.323
14	900	31	20	0.000558	0.381	682.796
15	900	31	20	0.000558	0.414	741.935
16	900	31	20	0.000558	0.416	745.520
17	900	31	20	0.000558	0.435	779.570
18	900	31	20	0.000558	0.421	754.480
19	900	31	20	0.000558	0.426	763.441
20	900	31	20	0.000558	0.406	727.599
21	900	31	20	0.000558	0.404	724.014
22	900	31	20	0.000558	0.397	711.470
23	900	31	20	0.000558	0.459	822.581
24	900	31	20	0.000558	0.42	752.688
25	900	31	20	0.000558	0.382	684.588
26	900	31	20	0.000558	0.411	736.559
27	900	31	20	0.000558	0.403	722.222
Vidutinis ąžuolo medienos bandinių tankis ρ , kg/m^3 :						738.2

Priedas Nr. 2

Frezų dangų paviršiaus šiurkštumo parametro R_a matavimo rezultatai

Frezos tipas	Paviršiaus šiurkštumas R_a , μm					Vidutinės vertės
	Matavimo vieta I	Matavimo vieta II	Matavimo vieta III	Matavimo vieta IV	Matavimo vieta V	
T06MG	0.31	0.3	0.38	0.32	0.33	0.3
TiCN	0.57	0.52	0.69	0.86	0.44	0.6
CrN	1.47	1.62	1.62	1.72	1.64	1.6
DLC	0.38	1.44	0.71	0.5	0.43	0.7

Priedas Nr. 3

Ašmenų pjaunančiosios briaunos pločio b matavimo rezultatai

Freza nepadengta jokia danga.

Frezavimo režimas Nr. 1: $h = 1$, $n = 18000$, $u = 5$, $u_z = 0.092$, $V = 11.304$.

Pjovimo kelias L , m	Pjaunančiosios briaunos plotis b , μm			
	Matavimo vieta A	Matavimo vieta B	Matavimo vieta C	Vidutinė vertė
132	8.02	7.95	7.76	7.9
1188	14.75	20.75	27.39	21.0
2246	19.75	24.75	33.3	25.9
3265	31.3	33.27	36.49	33.7
4330	33.07	36	38.82	36.0
5401	32.95	37.18	40.8	37.0
6545	36.79	39.54	41.9	39.4
7583	39.19	43.29	46.3	42.9
11022	61.8	40.92	50.67	51.1
14951	60.36	55.68	51.42	55.8
19978	62.2	57.01	53.63	57.6
26130	58.42	63.14	53.4	58.3

Frezavimo režimas Nr. 2: $h = 1$, $n = 21000$, $u = 5.859$, $u_z = 0.092$, $V = 13.188$.

Pjovimo kelias L , m	Pjaunančiosios briaunos plotis b , μm			
	Matavimo vieta A	Matavimo vieta B	Matavimo vieta C	Vidutinė vertė
132	5.62	10.45	7.32	7.8
1222	10.62	10.22	12.83	11.2
2314	15.24	20.75	18.64	18.2
3406	33.84	21.74	19.04	24.9
4498	35.27	33.99	21.65	30.3
5590	35.41	31.37	29.76	32.2
6682	38.4	35.42	29.69	34.5
7774	40.04	36.69	27.34	34.7
9231	36.26	29.88	41.11	35.8
12873	29.07	38.08	53.85	40.3
16515	30.5	39.35	57.45	42.4
19064	33.51	39.33	57.91	43.6
22664	39.89	45.41	52.52	45.9
26130	41.83	44.51	53.21	46.5

Frezavimo režimas Nr. 3: $h = 1$, $n = 24000$, $u = 6.696$, $u_z = 0.092$, $V = 15.072$.

Pjovimo kelias L , m	Pjaunančiosios briaunos plotis b , μm			
	Matavimo vieta A	Matavimo vieta B	Matavimo vieta C	Vidutinė vertė
132	9.56	8.53	8.32	8.8
1011	11.93	11.19	11.51	11.5
1892	11.93	11.61	11.26	11.6
2774.0	14.55	12.4	11.15	12.7
3655	18.76	17.09	14.47	16.8
4536	22.11	17.37	13.62	17.7
5418	20.37	16.39	16.24	17.7
6299	21.78	30.33	24.26	25.5
7180	31.05	25.87	22.72	26.5
12180	31.56	26.57	23.28	27.1
17180.0	39.9	33.63	25.02	32.9
22180	47.91	39.81	29.62	39.1
26130	43.59	39.54	35.04	39.4

Freza padengta TiCN danga.

Frezavimo režimas Nr. 1: $h = 1$, $n = 18000$, $u = 5$, $u_z = 0.092$, $V = 11.304$.

Pjovimo kelias L , m	Pjaunančiosios briaunos plotis b , μm			
	Matavimo vieta A	Matavimo vieta B	Matavimo vieta C	Vidutinė vertė
132	11.63	13.13	14.75	13.2
1632	27.36	22.36	24.35	24.7
3132	25.26	24.06	29.49	26.3
4632	24.82	26.17	29.82	26.9
6132	25.77	26.98	28.34	27.0
11132	25.68	26.28	31.37	27.8
16132	26.28	27.19	34.11	29.2
21132	26.66	28.16	34.97	29.9
26132	26.45	28.37	39.07	31.3

Frezavimo režimas Nr. 2: $h = 1$, $n = 21000$, $u = 5.859$, $u_z = 0.092$, $V = 13.188$.

Pjovimo kelias L , m	Pjaunančiosios briaunos plotis b , μm			
	Matavimo vieta A	Matavimo vieta B	Matavimo vieta C	Vidutinė vertė
130	8.23	10.98	9.02	9.4
1222	8.37	12.03	12.43	10.9
2314	13.23	15.04	9.02	12.4
3406	20.66	16.07	12.03	16.3
4498	24.47	18.96	20.99	21.5
5590	21.33	26.11	31.31	26.3
6682	22.1	25.64	32.98	26.9
7774	20.55	27.87	32.96	27.1
11416	22.92	28.9	32.86	28.2
15058	26.6	29.28	36.58	30.8
19064	27.29	29.19	40.19	32.2
22664	31.62	37.38	45.72	38.2
26130	33.9	38.59	45.56	39.4

Frezavimo režimas Nr. 3: $h = 1$, $n = 24000$, $u = 6.696$, $u_z = 0.092$, $V = 15.072$.

Pjovimo kelias L , m	Pjaunančiosios briaunos plotis b , μm			
	Matavimo vieta A	Matavimo vieta B	Matavimo vieta C	Vidutinė vertė
130	7.98	7.45	9.52	8.3
1011	14.28	10.8	10.52	11.9
1892	16.08	10.39	11.51	12.7
2774	17.01	16.04	12.54	15.2
3655	18.57	23.42	13.51	18.5
4536	26.02	21.92	16.2	21.4
5418	27.54	24.67	18.71	23.6
6299	30.56	28.58	19.01	26.1
7180	32.11	26.61	20.05	26.3
12180	28.15	27.62	24.08	26.6
17180	36.14	31.12	26.7	31.3
22180	59.9	36.05	25.73	40.6
26130	60.06	39.84	25.49	41.8

Freza padengta CrN danga.

Frezavimo režimas Nr. 1: $h = 1$, $n = 18000$, $u = 5$, $u_z = 0.092$, $V = 11.304$.

Pjovimo kelias L , m	Pjaunančiosios briaunos plotis b , μm			
	Matavimo vieta A	Matavimo vieta B	Matavimo vieta C	Vidutinė vertė
132	9.32	10.13	9.82	9.8
1632	24.04	18.55	14.26	19.0
3132	22.14	17.34	25.65	21.7
4632	22.36	19.75	25.77	22.6
6132	20.94	23.35	25.65	23.3
11132	22.36	23.75	26.5	24.2
16132	22.45	24.46	26.91	24.6
21132	22.87	25.21	27.31	25.1
26132	27.86	28.26	26.66	27.6

Frezavimo režimas Nr. 2: $h = 1$, $n = 21000$, $u = 5.859$, $u_z = 0.092$, $V = 13.188$.

Pjovimo kelias L , m	Pjaunančiosios briaunos plotis b , μm			
	Matavimo vieta A	Matavimo vieta B	Matavimo vieta C	Vidutinė vertė
130	7.22	14.83	7.22	9.8
1222	9.15	14.83	10.22	11.4
2314	9.82	12.43	14.53	12.3
3406	12.03	10.87	15.24	12.7
4498	13.73	14.67	16.45	15.0
5590	23.28	15.78	18.1	19.1
6682	17.99	19.37	22.99	20.1
7774	16.75	20.32	22.97	20.0
11416	18.97	20.96	22.98	21.0
15058	19.18	21.45	26.2	22.3
19064	20.72	22.87	25.55	23.0
22664	20.77	27.21	36.75	28.2
26130	22.59	28.82	35.44	29.0

Frezavimo režimas Nr. 3: $h = 1$, $n = 24000$, $u = 6.696$, $u_z = 0.092$, $V = 15.072$.

Pjovimo kelias L , m	Pjaunančiosios briaunos plotis b , μm			
	Matavimo vieta A	Matavimo vieta B	Matavimo vieta C	Vidutinė vertė
130	6.23	7.07	7.35	6.9
1011	9.18	7.92	8.94	8.7
1892	8.98	8.44	9.58	9.0
2774	12.08	10.19	9.05	10.4
3655	17.49	13.7	9.72	13.6
4536	13.27	18.43	11.61	14.4
5418	15.08	14.94	15.75	15.3
6299	18.9	16.56	11.86	15.8
7180	18.63	15.82	12.33	15.6
12180	19.7	15.15	13.07	16.0
17180	25.07	21.4	15.3	20.6
22180	28.77	23.26	17.23	23.1
26130	31.63	26.27	18.43	25.4

Freza padengta DLC danga.

Frezavimo režimas Nr. 1: $h = 1$, $n = 18000$, $u = 5$, $u_z = 0.092$, $V = 11.304$.

Pjovimo kelias L , m	Pjaunančiosios briaunos plotis b , μm			
	Matavimo vieta A	Matavimo vieta B	Matavimo vieta C	Vidutinė vertė
132	12.15	12.33	11.63	12.0
1632	20.78	15.16	17.77	17.9
3132	19.75	17.14	21.17	19.4
4632	19.14	21.34	24.96	21.8
6132	21.17	22.05	22.36	21.9
11132	21.74	22.14	24.25	22.7
16132	21.45	23.85	24.25	23.2
21132	21.45	24.57	25.1	23.7
26132	22.36	24.69	26	24.4

Frezavimo režimas Nr. 2: $h = 1$, $n = 21000$, $u = 5.859$, $u_z = 0.092$, $V = 13.188$.

Pjovimo kelias L , m	Pjaunančiosios briaunos plotis b , μm			
	Matavimo vieta A	Matavimo vieta B	Matavimo vieta C	Vidutinė vertė
130	6.41	11.12	7.84	8.5
1222	7.84	9.82	11.12	9.6
2314	9.67	14.13	20.58	14.8
3406	11.76	29.76	22.21	21.2
4498	17.65	23.65	28.77	23.4
5590	19.57	23.73	29.76	24.4
6682	20.61	24.42	29.67	24.9
7774	17.62	26.16	31.25	25.0
11416	18.71	29.1	32.74	26.9
15058	20.64	31.52	34.58	28.9
19064	22.12	34.18	37.4	31.2
22664	24.47	37.75	43.15	35.1
26130	29.42	36.79	44	36.7

Frezavimo režimas Nr. 3: $h = 1$, $n = 24000$, $u = 6.696$, $u_z = 0.092$, $V = 15.072$.

Pjovimo kelias L , m	Pjaunančiosios briaunos plotis b , μm			
	Matavimo vieta A	Matavimo vieta B	Matavimo vieta C	Vidutinė vertė
130	6.65	9.15	9.52	8.4
1011	6.78	8.27	9.05	8.0
1892	12.35	14.84	11.26	12.8
2774	14.42	11.72	10.79	12.3
3655	23.99	21.91	13.2	19.7
4536	17.88	27.54	15.5	20.3
5418	22.18	19.53	19.4	20.4
6299	24.4	21.13	19.59	21.7
7180	24.04	22.54	19.28	22.0
12180	27.2	24.59	19.59	23.8
17180	39.31	34.35	24.55	32.7
22180	45.44	37.46	25.85	36.3
26130	44.79	39.95	29.35	38.0

Priedas Nr. 4

Nufrezuoto paviršiaus šiurkštumo parametro R_z matavimo rezultatai

Freza nepadengta jokia danga

Frezavimo režimas Nr. 1: $h = 1$, $n = 18000$, $u = 5$, $u_z = 0.092$, $V = 11.304$.

Pjovimo kelias L , m	Paviršiaus šiurkštumas R_z , μm					Vidutinė vertė
	Matavimo vieta I	Matavimo vieta II	Matavimo vieta III	Matavimo vieta IV	Matavimo vieta V	
130	25.5	25.9	26.8	25.2	34.2	27.5
26130	94.5	115	36.8	88.1	130	92.9

Frezavimo režimas Nr. 2: $h = 1$, $n = 21000$, $u = 5.859$, $u_z = 0.092$, $V = 13.188$.

Pjovimo kelias L , m	Paviršiaus šiurkštumas R_z , μm					Vidutinė vertė
	Matavimo vieta I	Matavimo vieta II	Matavimo vieta III	Matavimo vieta IV	Matavimo vieta V	
130	22	28.2	31.4	33.4	32	29.4
26130	36.5	66.6	36.4	74.9	39.1	50.7

Frezavimo režimas Nr. 3: $h = 1$, $n = 24000$, $u = 6.696$, $u_z = 0.092$, $V = 15.072$.

Pjovimo kelias L , m	Paviršiaus šiurkštumas R_z , μm					Vidutinė vertė
	Matavimo vieta I	Matavimo vieta II	Matavimo vieta III	Matavimo vieta IV	Matavimo vieta V	
130	25.7	21.5	35.7	33.6	35.6	30.4
26130	22.5	74.1	37.5	52.5	37.5	44.8

Freza padengta TiCN danga.

Frezavimo režimas Nr. 1: $h = 1$, $n = 18000$, $u = 5$, $u_z = 0.092$, $V = 11.304$.

Pjovimo kelias L , m	Paviršiaus šiurkštumas R_z , μm					Vidutinė vertė
	Matavimo vieta I	Matavimo vieta II	Matavimo vieta III	Matavimo vieta IV	Matavimo vieta V	
130	27.4	24	16.8	17.2	34.1	23.9
26130	28.5	21.7	22.8	31	24.2	25.6

Frezavimo režimas Nr. 2: $h = 1$, $n = 21000$, $u = 5.859$, $u_z = 0.092$, $V = 13.188$.

Pjovimo kelias L , m	Paviršiaus šiurkštumas R_z , μm					Vidutinė vertė
	Matavimo vieta I	Matavimo vieta II	Matavimo vieta III	Matavimo vieta IV	Matavimo vieta V	
130	24.5	22.2	26.4	31	24	25.6
26130	29.1	24.5	34	39.5	42.3	33.9

Frezavimo režimas Nr. 3: $h = 1$, $n = 24000$, $u = 6.696$, $u_z = 0.092$, $V = 15.072$.

Pjovimo kelias L , m	Paviršiaus šiurkštumas R_z , μm					Vidutinė vertė
	Matavimo vieta I	Matavimo vieta II	Matavimo vieta III	Matavimo vieta IV	Matavimo vieta V	
130	34.3	36.8	20.5	18	23.5	26.6
26130	45.9	44.5	34.7	53.5	60.4	47.8

Freza padengta CrN danga.

Frezavimo režimas Nr. 1: $h = 1$, $n = 18000$, $u = 5$, $u_z = 0.092$, $V = 11.304$.

Pjovimo kelias L , m	Paviršiaus šiurkštumas R_z , μm					
	Matavimo vieta I	Matavimo vieta II	Matavimo vieta III	Matavimo vieta IV	Matavimo vieta V	Vidutinė vertė
130	19.8	34.4	15.2	16	23.8	21.8
26130	28.9	21.7	23.9	24.3	22.3	24.2

Frezavimo režimas Nr. 2: $h = 1$, $n = 21000$, $u = 5.859$, $u_z = 0.092$, $V = 13.188$.

Pjovimo kelias L , m	Paviršiaus šiurkštumas R_z , μm					
	Matavimo vieta I	Matavimo vieta II	Matavimo vieta III	Matavimo vieta IV	Matavimo vieta V	Vidutinė vertė
130	30	30.1	29.9	12.3	24.5	25.4
26130	21.7	22.9	39.2	25.1	17.2	25.2

Frezavimo režimas Nr. 3: $h = 1$, $n = 24000$, $u = 6.696$, $u_z = 0.092$, $V = 15.072$.

Pjovimo kelias L , m	Paviršiaus šiurkštumas R_z , μm					
	Matavimo vieta I	Matavimo vieta II	Matavimo vieta III	Matavimo vieta IV	Matavimo vieta V	Vidutinė vertė
130	22.6	29.6	16.3	35.6	30.3	26.9
26130	21.3	24.8	24.5	21.3	23.8	23.1

Freza padengta DLC danga.

Frezavimo režimas Nr. 1: $h = 1$, $n = 18000$, $u = 5$, $u_z = 0.092$, $V = 11.304$.

Pjovimo kelias L , m	Paviršiaus šiurkštumas R_z , μm					
	Matavimo vieta I	Matavimo vieta II	Matavimo vieta III	Matavimo vieta IV	Matavimo vieta V	Vidutinė vertė
130	19.3	22.2	28.7	20.9	21.9	22.6
26130	32.6	23.6	24.8	23.2	14.8	23.8

Frezavimo režimas Nr. 2: $h = 1$, $n = 21000$, $u = 5.859$, $u_z = 0.092$, $V = 13.188$.

Pjovimo kelias L , m	Paviršiaus šiurkštumas R_z , μm					
	Matavimo vieta I	Matavimo vieta II	Matavimo vieta III	Matavimo vieta IV	Matavimo vieta V	Vidutinė vertė
130	26.2	24.5	20.7	23.8	23.8	23.8
26130	48.7	16.5	18.3	43.1	28.5	31.0

Frezavimo režimas Nr. 3: $h = 1$, $n = 24000$, $u = 6.696$, $u_z = 0.092$, $V = 15.072$.

Pjovimo kelias L , m	Paviršiaus šiurkštumas R_z , μm					
	Matavimo vieta I	Matavimo vieta II	Matavimo vieta III	Matavimo vieta IV	Matavimo vieta V	Vidutinė vertė
130	28	38.5	23.5	29.9	19.4	27.9
26130	27.1	40.8	91.5	44.3	21.2	45.0

Priedas Nr. 5

Statistiniai skaičiavimai

Ašmenų pjaunančiosios briaunos plotis b , μm .

Frezavimo režimas Nr. 1: $h = 1$, $n = 18000$, $u = 5$, $u_z = 0.092$, $V = 11.304$.

Frezos tipas	L , m	Matavimai			vid	s^2	s	v	Δ	δ
TiCN	132	11.63	13.13	14.75	13.2	2.205333	1.485036	11.2759	2.380104	18.07216
	1632	27.36	22.36	24.35	24.7	11.59633	3.405339	13.79238	5.45782	22.10539
	3132	25.26	24.06	29.49	26.3	8.360333	2.891424	11.00656	4.634156	17.64049
	4632	24.82	26.17	29.82	26.9	6.839259	2.615198	9.708691	4.191441	15.56036
	6132	25.77	26.98	28.34	27.0	1.162133	1.078023	3.988246	1.727774	6.392059
	11132	25.68	26.28	31.37	27.8	9.940037	3.152782	11.35047	5.053041	18.19168
	16132	26.28	27.19	34.11	29.2	19.55873	4.422525	15.14909	7.088088	24.27982
	21132	26.66	28.16	34.97	29.9	21.293	4.614434	15.41742	7.395666	24.70987
	26132	26.45	28.37	39.07	31.3	51.19713	7.155217	22.86255	11.46784	36.64237
CrN	132	9.32	9.82	10.13	9.8	-0.75885	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
	1632	24.04	18.55	14.26	19.0	32.40013	5.692112	30.03753	9.122886	48.14188
	3132	22.14	17.34	25.65	21.7	23.45633	4.843174	22.30849	7.762273	35.75437
	4632	22.36	19.75	25.77	22.6	10.63984	3.261876	14.41607	5.227889	23.10499
	6132	20.94	23.35	25.65	23.3	6.454059	2.540484	10.89713	4.071696	17.46509
	11132	22.36	23.75	26.5	24.2	4.361615	2.088448	8.628762	3.347206	13.82953
	16132	22.45	24.46	26.91	24.6	5.44117	2.332632	9.479673	3.738566	15.1933
	21132	22.87	25.21	27.31	25.1	5.698133	2.387076	9.498911	3.825825	15.22414
	26132	27.86	28.26	26.66	27.6	-0.19407	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
DLC	132	12.15	12.33	11.63	12.0	-0.84599	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
	1632	20.78	15.16	17.77	17.9	14.80701	3.847988	21.49314	6.167265	34.44758
	3132	19.75	17.14	21.17	19.4	5.156281	2.270745	11.73309	3.639378	18.80491
	4632	19.14	21.34	24.96	21.8	9.671259	3.109865	14.25672	4.984256	22.84958
	6132	21.17	22.05	22.36	21.9	-0.40447	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
	11132	21.74	22.14	24.25	22.7	1.056333	1.027781	4.525675	1.647249	7.253409
	16132	21.45	23.85	24.25	23.2	2.828148	1.68171	7.253961	2.695317	11.6261
	21132	21.45	24.57	25.1	23.7	5.485015	2.342011	9.879123	3.753598	15.83351
	26132	22.36	24.69	26	24.4	3.9832	1.995796	8.196286	3.19871	13.13639
T06MG	132	8.02	7.95	7.76	7.9	-0.9788	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
	1190	14.8	20.8	27.4	21.0	51.13333	7.150758	34.05123	11.46069	54.57473
	2248	19.8	24.8	33.3	26.0	56.31481	7.50432	28.89982	12.02736	46.31844
	3267	31.3	33.3	36.5	33.7	7.533333	2.744692	8.144486	4.398984	13.05337
	4332	33.1	36	38.8	36.0	9.894815	3.145602	8.745883	5.041534	14.01724
	5403	33	37.2	40.8	37.0	19.85333	4.455708	12.04245	7.141272	19.30073
	6547	36.8	39.5	41.9	39.4	7.853333	2.80238	7.112639	4.491443	11.3996
	7585	39.2	43.3	46.3	42.9	16.85037	4.10492	9.56115	6.579056	15.32389
	11024	61.8	40.9	50.7	51.1	217.5615	14.74997	28.84609	23.64013	46.23232
	14953	60.4	55.7	51.4	55.8	26.4237	5.140399	9.206685	8.238643	14.75578
	19980	62.2	57	53.6	57.6	25.85333	5.084617	8.827461	8.14924	14.14799
	26132	58.4	63.1	53.4	58.3	30.05333	5.482092	9.403245	8.786282	15.07081

Frezavimo režimas Nr. 2: $h = 1$, $n = 21000$, $u = 5.859$, $u_z = 0.092$, $V = 13.188$.

Frezos tipas	L, m	Matavimai			vid	s ²	s	v	Δ	δ
TiCN	130	8.23	10.98	9.02	9.4	2.908	1.705286	18.12206	2.733103	29.04467
	1222	8.37	12.03	12.43	10.9	7.539615	2.745836	25.0914	4.400818	40.2146
	2314	13.23	15.04	9.02	12.4	10.32813	3.213741	25.85472	5.150741	41.43798
	3406	20.66	16.07	12.03	16.3	24.39784	4.939417	30.39018	7.916523	48.70708
	4498	24.47	18.96	20.99	21.5	14.37473	3.791402	17.65633	6.076572	28.29822
	5590	21.33	26.11	31.31	26.3	31.76053	5.635648	21.46914	9.032391	34.40911
	6682	22.1	25.64	32.98	26.9	36.00361	6.000301	22.30043	9.616829	35.74144
	7774	20.55	27.87	32.96	27.1	54.14768	7.358511	27.12648	11.79366	43.47628
	11416	22.92	28.9	32.86	28.2	34.77001	5.89661	20.89021	9.450641	33.48125
	15058	26.6	29.28	36.58	30.8	30.2392	5.499018	17.84237	8.81341	28.5964
	19064	27.29	29.19	40.19	32.2	53.69481	7.327675	22.74027	11.74424	36.44639
	22664	31.62	37.38	45.72	38.2	62.21413	7.887594	20.62655	12.64164	33.05868
26130	33.9	38.59	45.56	39.4	42.1348	6.491132	16.49589	10.4035	26.43836	
CrN	130	7.22	14.83	7.22	9.8	33.31828	5.772199	59.16159	9.251244	94.81972
	1222	9.15	14.83	10.22	11.4	16.29153	4.036277	35.40594	6.46904	56.74596
	2314	9.82	12.43	14.53	12.3	6.700133	2.588462	21.11306	4.14859	33.83842
	3406	12.03	10.87	15.24	12.7	4.992837	2.234466	17.57577	3.581233	28.16911
	4498	13.73	14.67	16.45	15.0	1.3168	1.147519	7.675713	1.839157	12.30205
	5590	23.28	15.78	18.1	19.1	27.88237	5.280376	27.71366	8.462987	44.41736
	6682	17.99	19.37	22.99	20.1	6.832237	2.613855	12.99348	4.189289	20.82496
	7774	16.75	20.32	22.97	20.0	12.65735	3.557717	17.77673	5.702039	28.4912
	11416	18.97	20.96	22.98	21.0	4.3468	2.084898	9.942289	3.341517	15.93475
	15058	19.18	21.45	26.2	22.3	14.40357	3.795204	17.03668	6.082665	27.3051
	19064	20.72	22.87	25.55	23.0	6.533481	2.556068	11.09083	4.096672	17.77555
	22664	20.77	27.21	36.75	28.2	80.03961	8.946486	31.67645	14.33875	50.76862
26130	22.59	28.82	35.44	29.0	53.50653	7.314816	25.26707	11.72363	40.49614	
DLC	130	6.41	11.12	7.84	8.5	10.40895	3.22629	38.15085	5.170854	61.14529
	1222	7.84	9.82	11.12	9.6	2.902459	1.703661	17.7588	2.730498	28.46246
	2314	9.67	14.13	20.58	14.8	36.85039	6.070452	41.03505	9.729262	65.76788
	3406	11.76	29.76	22.21	21.2	161.7787	12.71923	59.87396	20.38541	95.96146
	4498	17.65	23.65	28.77	23.4	41.42015	6.435849	27.55465	10.31489	44.16251
	5590	19.57	23.73	29.76	24.4	32.01284	5.657989	23.23291	9.068196	37.23596
	6682	20.61	24.42	29.67	24.9	25.2188	5.021832	20.168	8.048613	32.32375
	7774	17.62	26.16	31.25	25.0	67.9138	8.240983	32.95075	13.20802	52.81097
	11416	18.71	29.1	32.74	26.9	81.88613	9.049096	33.7024	14.50321	54.01566
	15058	20.64	31.52	34.58	28.9	84.94646	9.21664	31.87678	14.77173	51.0897
	19064	22.12	34.18	37.4	31.2	103.4116	10.16915	32.55865	16.29834	52.18253
	22664	24.47	37.75	43.15	35.1	140.8687	11.86881	33.79181	19.02243	54.15896
26130	29.42	36.79	44	36.7	70.12179	8.373876	22.79433	13.42101	36.53302	
T06MG	130	5.62	10.45	7.32	7.8	10.85379	3.294509	42.25536	5.280191	67.72369
	1222	10.62	10.22	12.83	11.2	1.231148	1.109571	9.886289	1.778337	15.845
	2314	15.24	20.75	18.64	18.2	14.33413	3.786045	20.79102	6.067986	33.32227
	3406	33.84	21.74	19.04	24.9	100.5615	10.02803	40.31641	16.07218	64.61609
	4498	35.27	33.99	21.65	30.3	62.21935	7.887924	26.02989	12.64217	41.71874
	5590	35.41	31.37	29.76	32.2	12.04113	3.470034	10.7832	5.561507	17.2825
	6682	38.4	35.42	29.69	34.5	22.74701	4.769383	13.82296	7.644006	22.1544
	7774	40.04	36.69	27.34	34.7	49.63	7.044856	20.30803	11.29096	32.54818
	9231	36.26	29.88	41.11	35.8	43.29353	6.579782	18.40499	10.54558	29.49812
	12873	29.07	38.08	53.85	40.3	191.8403	13.85064	34.34043	22.19876	55.03825
	16515	30.5	39.35	57.45	42.4	226.0781	15.0359	35.43416	24.0984	56.79119
	19064	33.51	39.33	57.91	43.6	186.9807	13.67409	31.37458	21.91579	50.2848
22664	39.89	45.41	52.52	45.9	50.31553	7.093344	15.44045	11.36868	24.74679	
26130	41.83	44.51	53.21	46.5	39.92513	6.318633	13.58359	10.12703	21.77075	

Frezavimo režimas Nr. 3: $h = 1$, $n = 24000$, $u = 6.696$, $u_z = 0.092$, $V = 15.072$.

Frezos tipas	L, m	Matavimai			vid	s ²	s	v	Δ	δ
TiCN	130	7.98	7.45	9.52	8.3	0.347126	0.589174	7.084256	0.944283	11.35411
	1011	14.28	10.8	10.52	11.9	6.566459	2.56251	21.59419	4.106998	34.60953
	1892	16.08	10.39	11.51	12.7	16.29013	4.036104	31.88076	6.468762	51.09606
	2774	17.01	16.04	12.54	15.2	5.352015	2.313442	15.22335	3.70781	24.39884
	3655	18.57	23.42	13.51	18.5	31.51133	5.613496	30.34322	8.996886	48.63182
	4536	26.02	21.92	16.2	21.4	29.76533	5.455761	25.51806	8.744082	40.89842
	5418	27.54	24.67	18.71	23.6	23.37253	4.834515	20.45057	7.748395	32.77663
	6299	30.56	28.58	19.01	26.1	42.26153	6.500887	24.95542	10.41913	39.99666
	7180	32.11	26.61	20.05	26.3	46.22726	6.799063	25.89462	10.89702	41.50193
	12180	28.15	27.62	24.08	26.6	4.502681	2.121952	7.972269	3.400905	12.77735
	17180	36.14	31.12	26.7	31.3	29.3872	5.420996	17.30842	8.688363	27.74062
	22180	59.9	36.05	25.73	40.6	466.6853	21.6029	53.26159	34.6235	85.36365
26130	60.05	39.84	25.49	41.8	424.7209	20.60876	49.31112	33.03016	79.03213	
CrN	130	6.23	7.07	7.35	6.9	-0.46572	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
	1011	9.18	7.92	8.94	8.7	-0.14987	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
	1892	8.98	8.44	9.58	9.0	-0.57387	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
	2774	12.08	10.19	9.05	10.4	2.396133	1.547945	14.82706	2.480929	23.76369
	3655	17.49	13.7	9.72	13.6	18.96561	4.354953	31.93561	6.979789	51.18398
	4536	13.27	18.43	11.61	14.4	18.97117	4.355591	30.17034	6.980811	48.35473
	5418	15.08	14.94	15.75	15.3	-0.78739	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
	6299	18.9	16.56	11.86	15.8	14.49961	3.807836	24.14097	6.102911	38.69132
	7180	18.63	15.82	12.33	15.6	11.8225	3.438387	22.05036	5.510786	35.34066
	12180	19.7	15.15	13.07	16.0	16.3757	4.04669	25.33404	6.485729	40.60348
	17180	25.07	21.4	15.3	20.6	29.05453	5.390226	26.17885	8.639046	41.95748
	22180	28.77	23.26	17.23	23.1	42.76384	6.539406	28.32547	10.48087	45.39792
26130	31.63	26.27	18.43	25.4	54.35384	7.372505	28.97618	11.81609	46.44083	
DLC	130	6.65	9.15	9.52	8.4	3.097	1.75983	20.85106	2.820522	33.4185
	1011	6.78	8.27	9.05	8.0	0.971393	0.985593	12.26879	1.579633	19.66348
	1892	12.35	14.84	11.26	12.8	4.119393	2.029629	15.83585	3.252935	25.38051
	2774	14.42	11.72	10.79	12.3	4.570333	2.137834	17.36664	3.426358	27.83394
	3655	23.99	21.91	13.2	19.7	36.37153	6.030882	30.61361	9.665841	49.06518
	4536	17.88	27.54	15.5	20.3	64.91117	8.056747	39.67538	12.91274	63.5887
	5418	22.18	19.53	19.4	20.4	3.295333	1.815305	8.911661	2.909434	14.28294
	6299	24.4	21.13	19.59	21.7	8.080015	2.842537	13.09522	4.555803	20.98803
	7180	24.04	22.54	19.28	22.0	6.080593	2.465886	11.2324	3.952135	18.00244
	12180	27.2	24.59	19.59	23.8	17.12939	4.138767	17.39465	6.633303	27.87883
	17180	39.31	34.35	24.55	32.7	67.15206	8.194636	25.03198	13.13374	40.11936
	22180	45.44	37.46	25.85	36.3	120.9735	10.9988	30.34151	17.62804	48.62907
26130	44.79	39.95	29.35	38.0	73.49813	8.573105	22.54301	13.74032	36.13022	
T06MG	130	9.56	8.53	8.32	8.8	-0.27487	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
	1011	11.93	11.19	11.51	11.5	-0.72527	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
	1892	11.93	11.61	11.26	11.6	-0.85247	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
	2774	14.55	12.4	11.15	12.7	3.313333	1.820256	14.33273	2.917369	22.97141
	3655	18.76	17.09	14.47	16.8	4.81557	2.194441	13.08291	3.517084	20.9683
	4536	22.11	17.37	13.62	17.7	24.1058	4.909766	27.73879	7.869001	44.45763
	5418	20.37	16.39	16.24	17.7	8.616348	2.935362	16.61525	4.704576	26.62967
	6299	21.78	30.33	24.26	25.5	36.74459	6.061732	23.81196	9.715285	38.16401
	7180	31.05	25.87	22.72	26.5	24.61901	4.961755	18.69069	7.952326	29.95602
	12180	31.56	26.57	23.28	27.1	23.84495	4.883129	17.99458	7.82631	28.84035
	17180	39.9	33.63	25.02	32.9	69.7472	8.351479	25.42307	13.38512	40.74618
	22180	47.91	39.81	29.62	39.1	106.9078	10.33962	26.43504	16.57157	42.36807
26130	43.59	39.54	35.04	39.4	22.97	4.792703	12.16731	7.681381	19.50084	

Priedas Nr. 6

Nufrezuotų paviršių šiurkštumas R_z , μm .

Frezavimo režimas Nr. 1: $h = 1$, $n = 18000$, $u = 5$, $u_z = 0.092$, $V = 11.304$.

Frezos tipas	L , m	Matavimai					Vid.	s^2	s	v	Δ	δ
TiCN	132	27.40	24.00	16.80	17.20	34.10	23.9	41.320	6.428	26.896	7.980	33.390
	26132	28.50	21.70	22.80	31.00	24.20	25.6	11.514	3.393	13.234	4.213	16.430
CrN	132	19.80	34.40	15.20	16.00	23.80	21.8	47.790	6.913	31.653	8.582	39.296
	26132	28.90	21.70	23.90	24.30	22.30	24.2	5.410	2.326	9.603	2.887	11.922
DLC	132	19.30	22.20	28.70	20.90	21.90	22.6	9.328	3.054	13.514	3.792	16.777
	26132	32.60	23.60	24.80	23.20	14.80	23.8	30.968	5.565	23.382	6.909	29.028
T06MG	132	25.50	25.90	26.80	25.20	34.20	27.5	10.446	3.232	11.744	4.012	14.580
	26132	94.50	115.00	36.80	88.10	130.00	92.9	1006.526	31.726	34.158	39.386	42.406

Frezavimo režimas Nr. 2: $h = 1$, $n = 21000$, $u = 5.859$, $u_z = 0.092$, $V = 13.188$.

Frezos tipas	L , m	Matavimai					Vid.	s^2	s	v	Δ	δ
TiCN	130	24.50	22.20	26.40	31.00	24.00	25.6	8.026	2.833	11.058	3.517	13.728
	26130	29.10	24.50	34.00	39.50	42.30	33.9	41.666	6.455	19.052	8.014	23.653
CrN	130	30.00	30.10	29.90	12.30	24.50	25.4	46.182	6.796	26.797	8.437	33.268
	26130	21.70	22.90	39.20	25.10	17.20	25.2	54.510	7.383	29.275	9.166	36.343
DLC	130	26.20	24.50	20.70	23.80	23.80	23.8	2.172	1.474	6.192	1.830	7.688
	26130	48.70	16.50	18.30	43.10	28.50	31.0	166.498	12.903	41.597	16.019	51.641
T06MG	130	22.00	28.20	31.40	33.40	32.00	29.4	15.592	3.949	13.431	4.902	16.674
	26130	36.50	66.60	36.40	74.90	39.10	50.7	274.828	16.578	32.698	20.581	40.594

Frezavimo režimas Nr. 3: $h = 1$, $n = 24000$, $u = 6.696$, $u_z = 0.092$, $V = 15.072$.

Frezos tipas	L , m	Matavimai					Vid.	s^2	s	v	Δ	δ
TiCN	130	34.30	35.80	20.50	18.00	23.50	26.4	51.910	7.205	27.270	8.945	33.855
	26130	45.90	44.50	34.70	53.50	60.40	47.8	200.758	14.169	29.642	17.590	36.800
CrN	130	22.60	29.60	16.30	35.60	30.30	26.9	44.078	6.639	24.699	8.242	30.663
	26130	21.30	24.80	24.50	21.30	23.80	23.1	5.409	2.326	10.051	2.887	12.478
DLC	130	28.00	38.50	23.50	29.90	19.40	27.9	40.594	6.371	22.869	7.910	28.391
	26130	27.10	40.80	91.50	44.30	21.20	45.0	622.850	24.957	55.485	30.983	68.882
T06MG	130	25.70	21.50	35.70	33.60	35.60	30.4	32.334	5.686	18.693	7.059	23.206
	26130	22.50	74.10	37.50	52.50	37.50	44.8	605.460	24.606	54.900	30.548	68.156

Priedas Nr. 7

Pjovimo režimų skaičiavimai

Pjovimo kelias L_c buvo apskaičiuojamas pagal formulę:

$$L_c = L_f \frac{R \times \varphi}{u_z \times z} \quad (1)$$

Čia: L_f – faktinis pjovimo kelias, m;
 R – įrankio spindulys, mm;
 φ – kinematinis kampas, rad.
 u_z – pastūma vienam pjovikliui, mm
 z – pjoviklių skaičius, vnt.

Pastūma, vienam pjovikliui, buvo apskaičiuota pagal formulę:

$$u_z = \frac{1000 \times u}{nz} \quad (2)$$

Čia: u – pastūmos greitis, m/min;
 n – pjovimo įrankio apsisukimų dažnis, min^{-1} ;
 z – pjoviklių skaičius, vnt.

Frezuojant režimu Nr. 1:

$$u_z = \frac{1000 \times 5}{18000 \times 3} = \frac{5000}{54000} = 0.093 \text{ mm};$$

Frezuojant režimu Nr. 2:

$$u_z = \frac{1000 \times 5.859}{21000 \times 3} = \frac{5859}{63000} = 0.093 \text{ mm};$$

Frezuojant režimu Nr. 3:

$$u_z = \frac{1000 \times 6.696}{24000 \times 3} = \frac{6696}{72000} = 0.093 \text{ mm};$$

Pastūmos greitį galima apskaičiuoti pagal formulę:

$$u = \frac{u_z z n}{1000} \quad (3)$$

Čia: u – pastūmos greitis, m/min;
 u_z – pastūma vienam pjovikliui, mm;
 z – pjoviklių skaičius, vnt;
 n – pjovimo įrankio apsisukimų dažnis, min^{-1} .

Frezuojant režimu Nr. 1:

$$u = \frac{0.093 \times 3 \times 18000}{1000} = \frac{5022}{1000} = 5.0 \text{ m};$$

Frezuojant režimu Nr. 2:

$$u = \frac{0.093 \times 3 \times 21000}{1000} = \frac{5859}{1000} = 5.859 \text{ m};$$

Frezuojant režimu Nr. 3:

$$u = \frac{0.093 \times 3 \times 24000}{1000} = \frac{6696}{1000} = 6.696 \text{ m};$$

Pjovimo greitis buvo apskaičiuotas pagal formulę:

$$v = \frac{\pi D n}{60 \times 1000} \quad (4)$$

Čia: v – pjovimo greitis, m/s;
 D – įrankio skersmuo, mm;
 n – įrankio apsisukimų dažnis, min^{-1} .

Frezuojant režimu Nr. 1:

$$v = \frac{3.14 \times 12 \times 18000}{60 \times 1000} = \frac{678240}{60000} = 11.3 \text{ m};$$

Frezuojant režimu Nr. 2:

$$v = \frac{3.14 \times 12 \times 21000}{60 \times 1000} = \frac{791280}{60000} = 13,188 \text{ m};$$

Frezuojant režimu Nr. 3:

$$v = \frac{3.14 \times 12 \times 24000}{60 \times 1000} = \frac{904320}{60000} = 15.072 \text{ m};$$

Kontaktinio lanko ilgis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$l = \sqrt{hD} \quad (5)$$

Čia: l – kontaktinio lanko ilgis, mm;
 h – nupjaunamo sluoksniu storis, mm.
 D – įrankio skersmuo, mm.

$$l = \sqrt{1 \times 12} = 3.464 \text{ mm};$$