



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MAŠINŲ GAMYBOS KATEDRA

Raimundas Mikolaitis

**PJOVIMO REŽIMŲ TYRIMAS, PJAUNANT KIETLYDINIUS VIDINE
DEIMANTINIO DISKO BRIAUNA**

**INVESTIGATION OF CUTTING CONDITIONS FOR SAW-OFF PROCESS
OF CARBIDE WORKPIECES BY INNER CUTTING EDGE OF THE
DIAMOND DISC**

Baigiamasis magistro darbas

Pramonės inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 62408T207

Pramonės technologijos specializacija

Mechanikos inžinerijos mokslo kryptis

Vilnius, 2009

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MAŠINŲ GAMYBOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

____Mindaugas Jurevičius____
(Vardas, pavardė)

(Data)

Raimundas Mikolaitis

**PJOVIMO REŽIMŲ TYRIMAS, PJAUNANT KIETLYDINIUS VIDINE
DEIMANTINIO DISKO BRIAUNA**

**INVESTIGATION OF CUTTING CONDITIONS FOR SAW-OFF PROCESS
OF CARBIDE WORKPIECES BY INNER CUTTING EDGE OF THE
DIAMOND DISC**

Baigiamasis magistro darbas

Pramonės inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 62408T207

Pramonės technologijos specializacija

Mechanikos inžinerijos mokslo kryptis

Vadovas doc. dr. Vadim Mokšin

(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Konsultantas lekt. Angelika Petrėtienė

(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2009

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS FAKULTETAS
MAŠINŲ GAMYBOS KATEDRA

Technologijos mokslo sritis

Mechanikos inžinerijos mokslo kryptis

Pramonės inžinerijos studijų kryptis

Pramonės inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 62408T207

Pramonės technologijos specializacija

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

Mindaugas Jurevičius_____
(Vardas, pavardė)

(Data)

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS**

.....Nr.
Vilnius

Studentui (ei) ...Raimundui Mikolaičiui.....
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: Pjovimo režimų tyrimas, pjaunant kietlydinius vidine deimantinio disko briauna

.....
patvirtinta 2008 m. gruodžio 11 d. dekanų potvarkiu Nr. 474me

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2009 m. Gegužės 30 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Ištirti pastūmos ir pjovimo greičio įtaką volframo karbido ir bevolframių kietlydinių paviršiaus kokybei, pjaunant juos vidine deimantinio disko briauna. Kietlydiniai T14K8 ir KHT-16.....

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

.....
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

Vadovas
(Paraša)

.....doc. dr. Vadim Mokšin.....
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

.....
(Parašas)

.....Raimundas Mikolaitis.....
(Vardas, pavardė)

.....2009 gegužės 10.....
(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Mechanikos fakultetas

Mašinų gamybos katedra

ISBN

ISSN

Egz. sk.

Data-....-....

Pramonės inžinerijos studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas **Pjovimo režimų tyrimas, pjaunant kietlydinius vidinę deimantinio disko briauna**

Autorius **Raimundas Mikolaitis**

Vadovas **doc. dr. Vadim Mokšin**

Kalba

☒ X

lietuvių

☐ užsienio

Anotacija

Šiame darbe ištirta pastūmos ir pjovimo greičio dydžio įtaką paviršiaus kokybei, pjaunant volframinis (T14K8) ir nevolframinis (KHT-16) kietlydinius deimantinio disko vidinę briauna. Kietlydinių medžiaga yra labai kieta ir negali būti atpjaunama įprastiniais metodais. Pjovimas buvo atliktas naudojantis deimantinio disko, su pjaunančia vidine briauna, staklėmis, kurių modelis „Almaz-4“. Tyrimo metu buvo naudojamas deimantinis diskas, kurio grūdėtumas 60/40. Atliekant tyrimą, buvo pastebėta, kad didinant pastūmą, didėja ir pjaunamo paviršiaus šiurkštumas. Atitinkamai paviršiaus šiurkštumas didėja mažinant pjovimo greitį. Per didelė pastūma gali lemti pjaunančiosios briaunos užlinkimą arba pačio disko trūkimą. Nustatyta, kad pjaunant kietas ir lenkimui atsparesnes medžiagas – gaunamas didesnis šiurkštumo augimas, nei pjaunant lenkimui mažiau atsparias, trapias medžiagas.

Prasminiai žodžiai: kietlydiniai, vidinė briauna, pjovimas, deimantinis diskas.

Vilnius Gediminas Technical University

Mechanical faculty

Machine production department

ISBN

ISSN

Copies No.

Date-....-....

Industrial engineering study programme master thesis.

Title: Investigation of cutting conditions for saw-off process of carbide workpieces by inner cutting edge of the diamond disc

Author **Raimundas Mikolaitis**

Academic supervisor **doc. dr. Vadim Mokšin**

Thesis language

☒ X

Lithuanian

☐

Foreign (English)

Annotation

This work reviews the cutting conditions, feed and cutting velocity influence on the surface quality, cutting wolfram (T14K8) and non-wolfram (KHT-16) carbides by internal cutting disk diamond edge. These materials are very hard and can not be easily cut by conventional methods. Cutting was carried out using diamond disks with inner cutting edge machine tools, the model "Almaz-4". The study was used in diamond disc with a grain 60/40. During the investigation, it was obtained that increasing the feed rate, increases the surface roughness too. Accordingly, the surface roughness increases by reducing the cutting speed. Too high feed may affect cutting edge deformation or breaking the disc itself. It is obtained that the cutting and bending hard resistant material - results in higher roughness growth than cutting less resistant to bending, fragile materials.

Keywords: carbides, inner edge, diamond cutting disc.

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	8
LENTELIŲ SĄRAŠAS	9
IVADAS.....	10
1. TYRIMO OBJEKTAS IR PROBLEMOS APTARIMAS.....	11
2. TECHNOLOGINIŲ PJOVIMO PROCESŲ, NAUDOJAMŲ MEDŽIAGŲ IR KOKYBĖS MATAVIMO BŪDŲ APŽVALGA	12
2.1. Pjovimo būdai kietoms medžiagoms pjauti	12
2.2. Pjovimas deimantiniais įrankiais	13
2.2.1 Diskais su vidine ir išorine deimantine pjovimo briauna.....	13
2.2.2. Deimantine pjovimo juosta	15
2.2.3. Deimantine pjovimo viela.....	16
2.2.4. Deimantiniu daugiapjūkliu.....	17
2.3. Koncentruotos energijos metodas	17
2.3.1. Kriogeninis pjaustymas.....	18
2.3.2. Pjovimo vandens srove technologija.....	19
2.4. Kietlydiniai ir jų savybės	22
2.5. Technologinės deimantų savybės.....	25
2.6. Matavimo metodai	27
2.6.1 Kiekybinis metodas.....	27
2.6.2. Kokybinis metodas.....	29
2.7. Uždavinio formulavimas.....	32
3. PJOVIMO REŽIMŲ TYRIMO EKSPERIMENTINĖ DALIS	33
3.1. Tyrimų stendas.....	33
3.2. Pjovimo disko įtvirtinimo metodika	35
3.3. Pjovimo technologija ir metodika	38
3.4. Tyrimo rezultatai.....	41

IŠVADOS	48
LITERATŪRA.....	49
PRIEDAI.....	50

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

2.1 pav. Medžiagų kietumas.....	12
2.2 pav. Pjovimas disku su vidine ir išorine deimantine pjovimo briauna.....	13
2.3 pav. Pjovimo briaunų formos.....	14
2.4 pav. Pjovimas deimantine juosta.....	15
2.5 pav. Pjovimas deimantine viela.....	16
2.6 pav. Pjovimo pjūklų rinkiniu schema.....	17
2.7 pav. Didelio slėgio skystojo azoto čiurkšlė.....	18
2.8 pav. Pjovimas vandens-abrazyvo čiurkšle.....	20
2.9 pav. Paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo darbinės pastūmos.....	21
2.10 pav. Vandens-abrazyvo čiurkšle atpjauto paviršiaus kokybė.....	21
2.11 pav. Kietlydinių nudilimo kontūras.....	24
2.12 pav. Kietlydinių nuovargio kreivės.....	25
2.13 pav. Sintetinių deimantų grūdėliai.....	26
2.14 pav. Matavimo šviesos skerspjūvio būdu schema.....	27
2.15 pav. Statistiniai parametrai, nustatyti naudojant atraminio santykio kreivę.....	28
2.16 pav. Profilografo schema.....	30
2.17 pav. Profilografas.....	30
2.18 pav. Pjovimo išeigos pjaustant skirtingais įrankiais.....	32
3.1 pav. Staklių „Almaz-4“ bendras vaizdas.....	33
3.2 pav. Staklių „Almaz-4“ kinematinė schema.....	34
3.3 pav. Disko tvirtinimas.....	36
3.4 pav. Įrenginys, skirtas deimantiniam diskui centruoti.....	37
3.5 pav. Pjovimo zonos vaizdas.....	38
3.6 pav. Pjovimo schema.....	40
3.7 pav. Pastūmos įtaka T14K8 kietlydinio paviršiaus šiurkštumui.....	42
3.8 pav. Pastūmos įtaka KHT-16 kietlydinio paviršiaus šiurkštumui.....	42
3.9 pav. Disko pjaunančiosios briaunos įlinkimas	43
3.10 pav. Pjovimo metu veikiančios jėgos.....	44
3.11 pav. Pjovimo greičio įtaka T14K8 kietlydinio paviršiaus šiurkštumui.....	45
3.12 pav. Pjovimo greičio įtaka KHT-16 kietlydinio paviršiaus šiurkštumui.....	46
3.13 pav. Disko apsisūlimas pjaunant volframinį kietlydinį.....	47

LENTELIŲ SĄRAŠAS

2.1 lentelė. Diskų su išorine ir vidine pjovimo briauna charakteristikos.....	14
3.1 lentelė. Pjovimo parametrai, didinant darbinę pastūmą.....	41
3.2 lentelė. Pjovimo parametrai, didinant pjovimo greitį.....	45

IVADAS

Kietlydiniai yra gerai žinomi dėl jų didelio kietumo, atsparumo dilimui net ir aukštose temperatūrose. Dėl šių savybių jie plačiai naudojami kaip medžiagos ašmeniniams metalų pjovimo įrankiams. Volframo ir bevolframiai kietlydiniai gaminami dažniausiai keičiamųjų plokštelių pavidalo, atitinkamas medžiagas supresuojant ir sukepinant formose miltelinės metalurgijos metodais. Tokiu būdu gaunamos tam tikrų geometrinių formų (dažniausiai nesudėtingų) ir matmenų plokštelės, kurių darbo briaunos toliau gali būti tik šlifuojamos ir išbaigiamos abrazyviniais įrankiais. Gauti sudėtingesnių formų kietlydinių gaminius yra sudėtinga, nes apdirbti šias medžiagas tradiciniais metodais sunku dėl jų didelio kietumo [2].

Be netradicinių apdirbimo metodų (pavyzdžiui, vandens čiurkšle) kietlydiniai gali būti apdirbami tradiciniais apdirbimo metodais, tačiau tik įrankiais su kietesne pjovimo dalies medžiaga. Tokių medžiagų yra nedaug, viena iš jų yra deimantas. Vienas iš našiausių būdų pjaustant ypač kietas medžiagas, tokias kaip pavienius safyro, silicio karbido, kubinio boro nitrido kristalus ir kitas, yra pjovimas diskais su vidine deimantine pjovimo briauna. Tokio disko storis yra labai mažas (0,25 mm), pjūvis yra siauras, todėl drožlėmis virsta mažesnis brangios medžiagos tūris, lyginant su kitais pjovimo būdais. Šis būdas galėtų būti taikomas ir kietlydiniams apdirbti, tačiau mokslinėje literatūroje nerandama informacijos apie tokių medžiagų pjovimą deimantiniais įrankiais, ir būtent vidine disko briauna. Todėl šiame darbe buvo atliktas tyrimas, siekiant nustatyti darbinės pastūmos ir pjovimo greičio įtaką volframo ir bevolframinių kietlydinių paviršiaus kokybei, kai šios medžiagos pjaunamos vidine deimantinio disko briauna.

1. TYRIMO OBJEKTAS IR PROBLEMOS APTARIMAS

Šiais laikais, kuriami ir gaminami naujausiomis technologijomis pagrįsti įvairūs nauji produktai, aukšto tikslumo pjovimo ir apdirbimo prietaisai, elektroninė įranga ir detalės. Elektronikos pramonėje naudojami kristalai puslaidininkių gamybai, lazerių kūrimo pramonėje – atitinkamų savybių kristalai. Kuriant pjovimo įrangą, taip pat reikalingos įvairių formų kietlydinio plokštelės. Šių produktų gamybos kelyje naudojamos brangios, itin kietos medžiagos. Tad, neišvengiamai susiduriama su tokių medžiagų apdirbimo problema. Jas apdirbant yra svarbi kuo mažesnė pjovimo išėiga, svarbi gauto paviršiaus kokybė.

Kietlydiniai ir kitos kietos medžiagos gali būti apdirbamos tradiciniais apdirbimo metodais, tačiau tik įrankiais su kietesne pjovimo dalies medžiaga. Tokių medžiagų yra nedaug, viena iš jų yra deimantas. Vienas iš našiausių būdų pjaustant ypač kietas medžiagas, tokias kaip pavienius safyro, silicio karbido, kubinio boro nitrido kristalus ir kitas, yra pjovimas diskais su vidine deimantine pjovimo briauna.

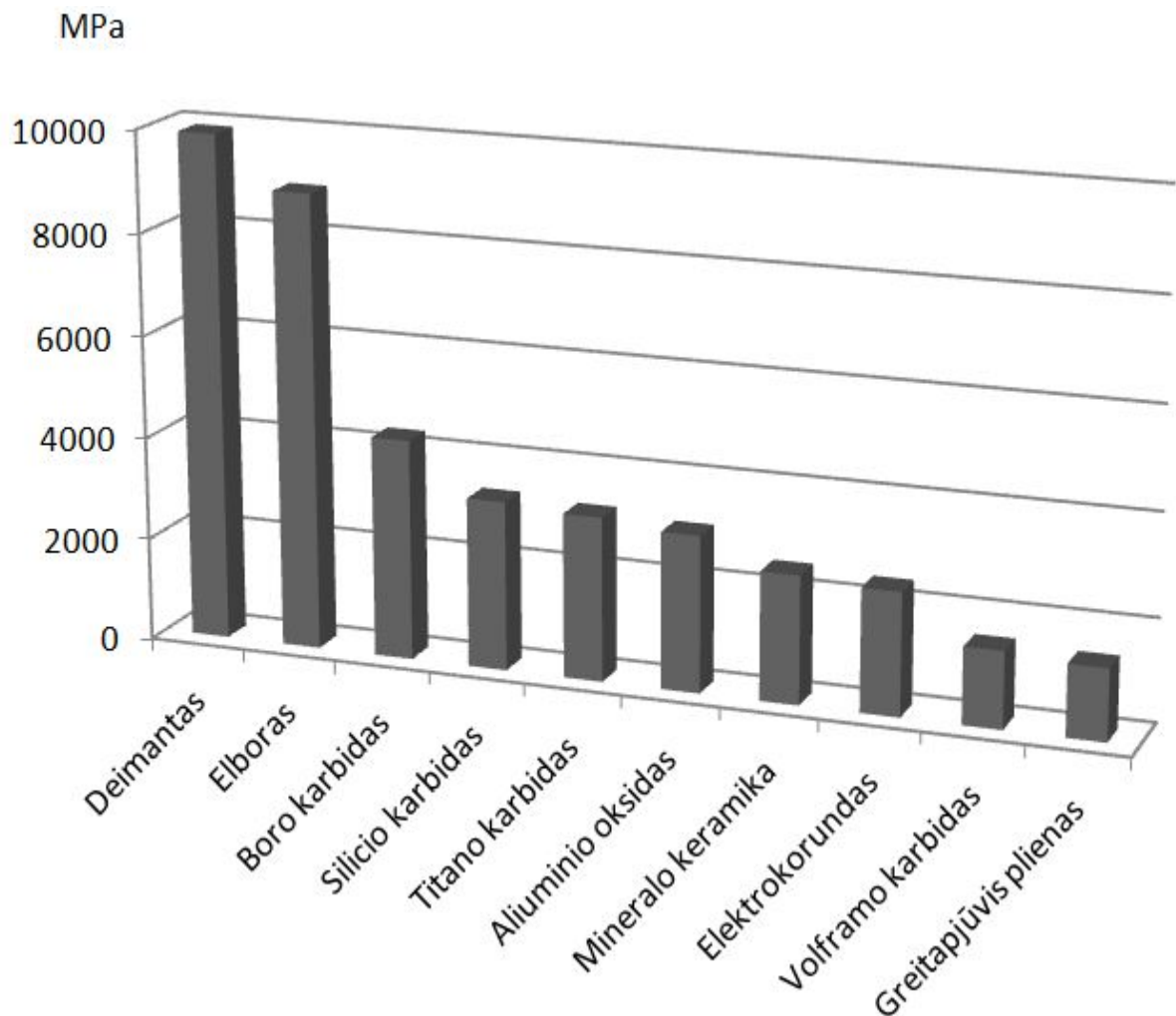
Temos aktualumas: norint pjausti kietlydinius vidine deimantinio disko briauna, šiuo metu susiduriama su prieinamos informacijos apie šį pjovimo būdą, trūkumu. Apie kitų medžiagų pjovimo būdus, optimalius rekomenduojamus pjovimo režimus, darbo metodiką ir pan. informacijos galime rasti specializuotuose kataloguose. Atitinkamai informaciją reikia rinkti ir apie labai kietų medžiagų pjovimą vidine deimantinio disko briauna. Bandymais galima išsiaiškinti optimalius įvairių medžiagų pjovimo režimus, kitas šio būdo technologines subtilybes. Visą surinktą informaciją reikia susisteminti, padaryti ją prieinamą vartotojams.

Darbo tikslas: atlikti kietų volframo ir bevolframių kietlydinių T14K8 ir KHT-16 pjovimą vidine deimantinio disko briauna, keičiant pastūmą ir pjovimo greitį. Kaip išėjimo parametą priimti apdirbto paviršiaus vidutinį aritmetinį profilio nuokrypį. Atsižvelgiant į gautus rezultatus, nustatyti optimalius pjovimo režimus pjaustant labai kietas medžiagas. Taip pat, apie itin kietų medžiagų pjovimą ir būtent šį pjovimo būdą viešai pateikiama labai mažai informacijos. Dėl šios priežasties svarbu surinkti kuo daugiau galimos informacijos.

2. TECHNOLOGINIŲ PJOVIMO PROCESŲ, NAUDOJAMŲ MEDŽIAGŲ IR KOKYBĖS MATAVIMO BŪDŲ APŽVALGA

2.1. Pjovimo būdai kietoms medžiagoms pjauti

Labai kietos medžiagos (2.1 pav.) dėl savo savybių gali būti pjaunamos tik specifiniais būdais. Tam galima pasinaudoti dar kietesnėmis medžiagomis ir jų abrazyvo dalelių pjaunančiosiomis savybėmis. Norint atpjauti ypač kietas medžiagas, reikia ruošinyje suformuoti patį pjūvį. Pjūvis gali būti suformuojamas tik tuo atveju, kai veikianti išorinė pjaunančioji jėga bus didesnė už pjaunamos medžiagos vidinės struktūros grūdelių traukos ryšio jėgą. Tai būtų galima padaryti įrankiais su deimantinėmis pjaunančiosiomis briaunomis [14]. Taip pat kitas kietų medžiagų pjovimo būdas – pasinaudoti koncentruotos energijos pjovimo galimybėmis.



2.1 pav. Medžiagų kietumas

2.2. Pjovimas deimantiniais įrankiais

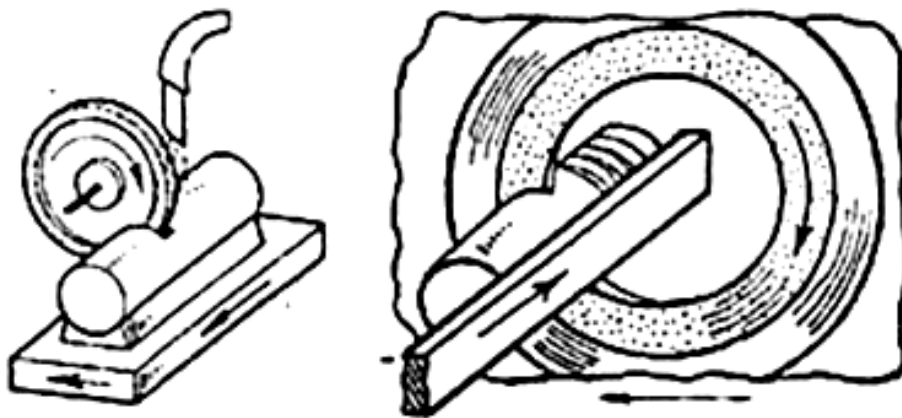
Kietlydiniai, pasižymintys dideliu kietumu ir trapumu, yra sunkiai apdirbami paprastais mechaniniais būdais, pvz.: tekimas, frezavimas, gręžimas, šampavimas ir t. t. Praktiškai vienintelis metodas, taikomas mechaniniam apdirbimui, yra apdirbimas taikant laisvus ir surištus abrazyvus [11].

Prie kietų medžiagų pjovimo būdų deimantiniais pjovimo įrankiais priskiriami šie variantai:

- Pjovimo diskais su vidine pjaunančiąja briauna.
- Pjovimas su išorine pjaunančiąja briauna.
- Pjovimas deimantine juosta.
- Pjovimas ištisine deimantine viela.
- Pjovimas deimantiniais pjūklais.

2.2.1 Diskais su vidine ir išorine deimantine pjovimo briauna

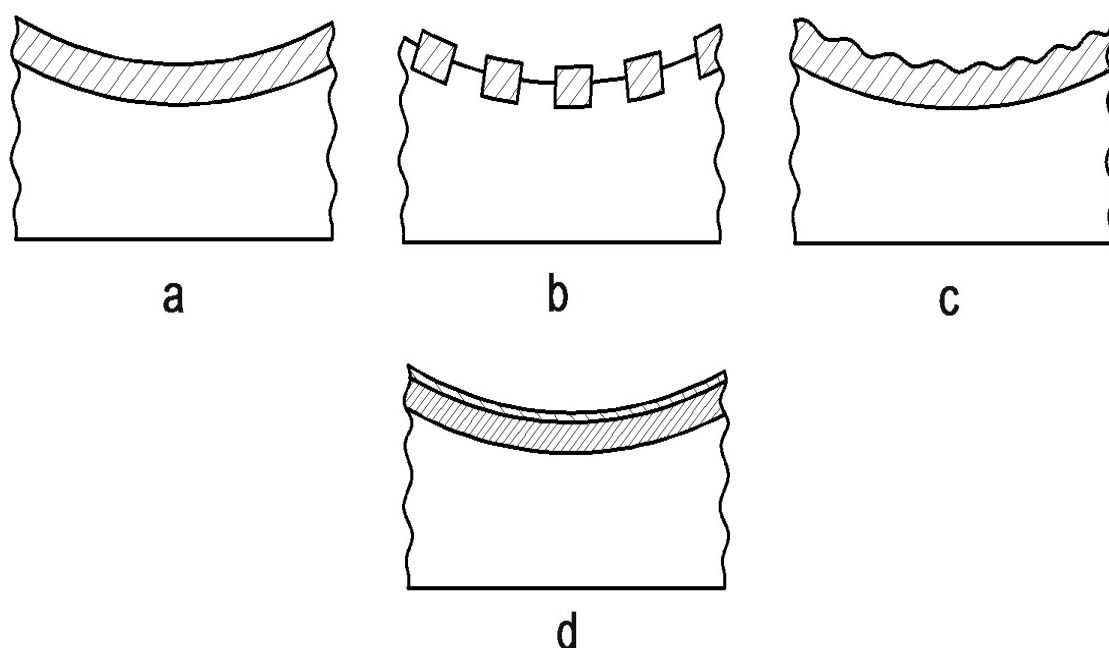
Efektyviausiu pjovimo būdu laikomas pjaunant vidine deimantine disko briauna (2.2 pav.), kuriuo pasiekiamas aukščiausias pjovimo kokybės bei pasižymi maža pjovimo išeiga. Tai aktualu, nes pjaunamos kietos medžiagos dažniausiai būna brangios.



2.2 pav. Pjovimas disku su vidine ir išorine deimantine pjovimo briauna

Prieš pjaunant ruošinius reikia nustatyti jų pagrindines kristalografines plokštumas, tam kad ruošinys būtų tiksliau įstatytas prieš pjovimą.

Pjovimo įrankis yra metaliniai diskai su vidine arba išorine pjovimo briauna, su grūdintais dirbtiniais arba gamtiniais deimantais. Pjovimo briaunų formos pavaizduotos 2.3 pav.



2.3 pav. Pjovimo briaunų formos: a) vientisas; b) nevientisas; c) banguotas; d) dvisluoksnis

Dažniausiai naudojami diskai (d tipo), kurių priekinė pjovimo briauna susideda iš optimalaus deimantų grūdėtumo ($\sim 100 \mu\text{m}$), o šonų grūdėtumas 2–3 kartus mažesnis, o tai leidžia sumažinti apdirbamo paviršiaus šiurkštumą [14]. Ant pjaunančiosios diskų briaunos gali būti vientisas arba nevientisas deimantų sluoksnis. Nevientisas deimantų sluoksnis pagerina aušinimo skysčio patekimą ant pjovimo vietos ir lengviau pašalina drožles. Panašias pjovimo savybes į vientisos pjovimo briaunos diskus suteikia ir pjovimo diskai su banguotu pjovimo briaunos paviršiumi.

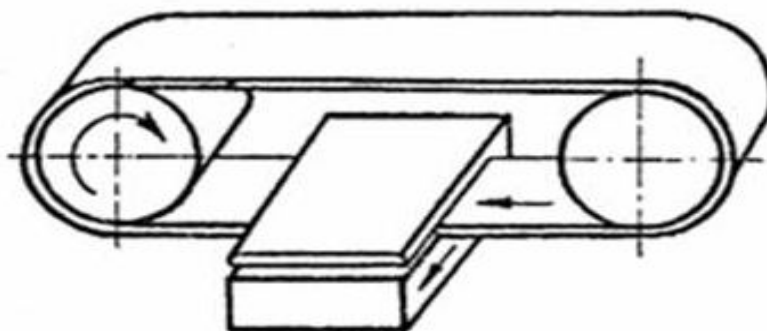
Deimantinių diskų su išorine ir vidine pjovimo briauna charakteristikų palyginimas pateiktas 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Diskų su išorine ir vidine pjovimo briauna charakteristikos

Palyginamosios charakteristikos	Ruošinio pjovimas disku su išorine pjovimo briauna	Ruošinio pjovimas disku su vidine pjovimo briauna
Deimanto markė	Sintetinis ACB(AC6), ACK(AC15)	Sintetinis ir natūralus ACB, ACH
Grūdėtumas	50/40-125/100	60/40;60/40
Disko pagrindas	Termiškai apdirbtas plienas	Aukštos kokybės nerūdijantis plienas
Disko skersmuo	50–400 mm	Iki 690 mm
Disko storis	1/200 skersmens	(50–120) mkm
Pjaunamojo sluoksnio suformavimo būdas	Karštas deimanto presavimas į metalinę matricą	Elektrocheminis metalo padengimas su deimanto milteliais

2.2.2. Deimantine pjovimo juosta

Juostiniams pjūklams (2.4 pav.) keliama dideli reikalavimai. Medžiagos tamprumo modulis yra 150 Mpa. Aukštos fizikinės-cheminės medžiagos savybės turi sutapti su tiksliais geometriniais juostos parametrais. Juostos pjaunančiosios dalies grūdėtumas neturi viršyti 0,05 % pločio, šoninis kreivumas – ne daugiau nei 0,1mm vienam pjūklo metrui.

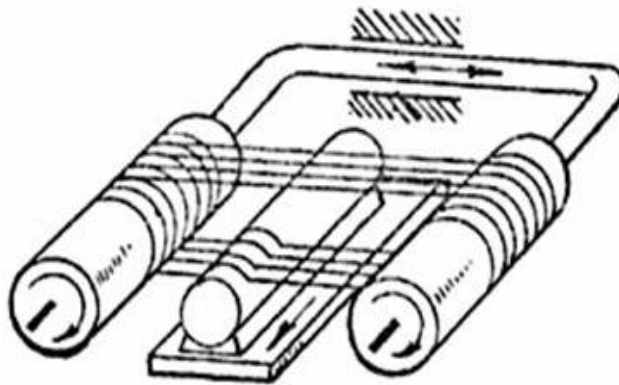


2.4 pav. Pjovimas deimantine juosta

Didesnis efektyvumas pasiekiamas teisingai parenkant juostos storį ir plotį atsižvelgiant į pjaunamos medžiagos plotą. Dažniausiai naudojamos pjovimo juostos, kurių storis yra 0,1-0,3 mm, o plotis 20-70 mm. Juostos pjovimo briauna būna vientisa arba ne vientisa, iš sintetinių ir natūralių deimantų. Deimantų grūdėtumas būna nuo 60/40 iki 125/100. Pjaunant ypatingai tvirtas medžiagas, deimantinis sluoksnis gaunamas miltelinės metalurgijos būdu. Tikslių juostinių pjūklų pagalba galima pjauti ruošinius iki 300 mm diametro. Pjovimo tikslumas (ne lygiagretumas) sudaro $\pm 5 \mu\text{m}$, $\pm 20 \mu\text{m}$, $\pm 35 \mu\text{m}$ atitinkamai diametrams 100, 200, 300 mm, o paviršiaus šiurkštumas Ra neviršija 1 μm [11].

2.2.3. Deimantine pjovimo viela

Pjovimo viela būna 0,08-0,15 mm storio. Pjovimas gali būti vykdomas net su keliomis vielomis, kaip pavaizduota 2.5 pav. Pjovimo proceso metu ant ruošinio paduodama abrazyvinė suspensija, kuri vykdo pjovimą. Didesnį našumą duoda ta viela, ant kurios galvaniniu būdu yra užneštas abrazyvinis sluoksnis, kurio grūdėtumas yra 1-20 μm . Šis būdas leidžia vienu metu atpjauti didelį kiekį plokštelių. Vienas iš pagrindinių šio pjovimo būdo pranašumų yra atpjautos plokštelės minimaliai pažeidžiama kristalinė struktūra, dėl mažų termodinaminių įtampų, atsirandančių proceso metu. Apdirbant trapias medžiagas spaudimas yra 0,15-2,00 N.

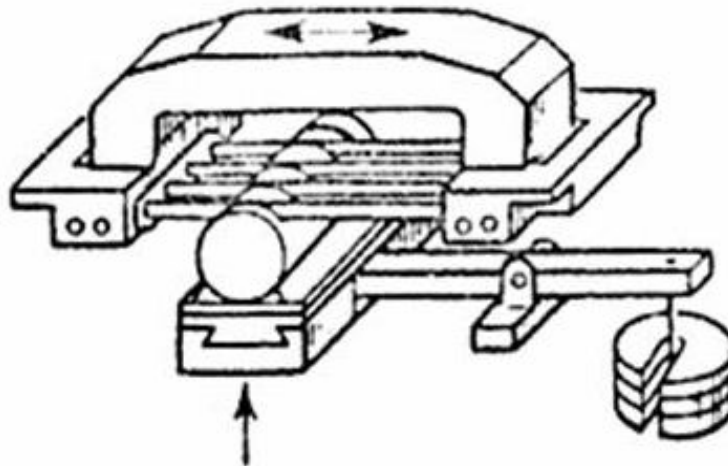


2.5 pav. Pjovimas deimantine viela

Pagrindinis šio pjovimo būdo trūkumas yra mažas vielos patvarumas. Šis būdas yra brangesnis, lyginant su pjovimu diskais vidine deimantine briauna. Šis būdas dažniausiai naudojamas laboratorijose, kur nereikalingas aukštas efektyvumas.

2.2.4. Deimantiniu daugiapjūkliu

Šis būdas yra panašus į juostinį pjovimo būdą. Pjūklai pagaminti iš plieninės juostos (2.6 pav.), o ašmenys suformuoti iš deimantinio sluoksnio galvaniniu būdu. Dažniausiai naudojami deimantiniai milteliai: A, ACB, ACP, kurių grūdėtumas 50/40 arba mikro milteliai AM, ACM su grūdėtumu 60/40, 40/28.



2.6 pav. Pjovimo pjūklų rinkiniu schema

Principinis skirtumas šio būdo nuo juostinio yra tas, kad pjovimo įrankis juda horizontalioj padėtyje, o juostinėje ratu. Maksimalus įrankio judėjimo greitis apytiksliai 1 m/s. Šio pjovimo pagrindinis trūkumas – sunku sureguliuoti visų pjūklų vienodą įtempimą. Taip pat sunku sureguliuoti vienodus tarpus tarp pjūklų. Pjovimo metu nutrūkus vienam pjūklui pridaroma daug nuostolių. Vieno pjūklo darbinis laikas yra 40-60 val. [11].

Paminėti trūkumai trukdo platesniam šio pjovimo būdo pritaikymui pramonėje.

2.3. Koncentruotos energijos metodas

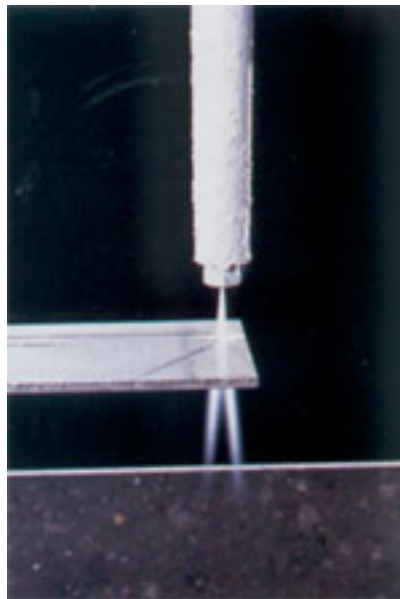
Norint atpjauti ypatingai kietas medžiagas, reikia ruošinyje suformuoti patį pjūvį. Pjūvis gali būti suformuojamas tik tuo atveju, kai veikianti išorinė pjaunančioji jėga bus didesnė už pjaunamos medžiagos vidinės struktūros grūdelių traukos ryšio jėgą. Šiam tikslui, naudojami koncentruotos energijos pjovimo būdai:

- Kriogeninis pjovimas.
- Pjovimas vandens čiurkšle.

2.3.1. Kriogeninis pjaustymas

Inžinieriai neseniai sukūrė naujovišką medžiagų pjaustymo technologiją, kurioje panaudotas viršgarsiniu greičiu lekiantis skystojo azoto srautas (2.7 pav.). Vadinamasis „Nitrojet“ pjauna beveik viską - plieno armatūrą, betono blokus, audeklo rietimus, skerdieną - ir niekuomet neatšimpa.

Nitrojet technologiją dešimtojo dešimtmečio pradžioje sukūrė Aidaho Nacionalinės inžinerijos laboratorijos INEL (JAV) mokslininkai, ieškoję būdų supjaustyti statines, kuriose buvo laikomi galintys sprogti teršalai [9]. Ronas Warnecke, kompanijos TRUtech, užsiimančios branduolinių ginklų nukenksminimu ir utilizavimu, prezidentas nugirdo apie tai, kai ieškojo ekologiškai saugaus būdo supjaustyti plutonio apdorojimo įrangą. Vėliau TRUtech įsigijo licenziją naujai technologijai ir INEL prototipą pavertė komerciniu gaminiu. Vėliau Warnecke įkūrė naują kompaniją NitroCision, kuri šį gaminį diegė.



2.7 pav. Didelio slėgio skystojo azoto čiurkšlė

Peršaldyto azoto srautas, purškiantis iš specialios čiurkšlės, pritvirtintos prie rankoje laikomo arba roboto valdomo strypo, puikiai tinka medžiagų skaldymui, nes tankios suskystintos dujos lengvai įsiterpia į kietajame kūne esančius plyšius bei įtrūkimus ir po to greitai plečiasi, skeldamas tą kūną iš vidaus. Proceso efektyvumas priklauso nuo slėgio (nuo 500 iki 5000 atmosferų), temperatūros (nuo - 200 iki 0 °C) ir atstumo iki pjaunamojo objekto. Naudojant mažesnę slėgį, srautu dangas nuo pačių jautriausių paviršių galima pašalinti geriau negu bet kuriuo kitu valymo būdu.

Be to, kriogeninė čiurkšlė nepalieka jokių atliekų ir nieko neteršia, nes labai šalti "ašmenys" sušilę paprasčiausiai išnyksta ore. Valant ar pjaunant atsiradę pavojingi likučiai gali būti susiurbiami pačioje pjovimo vietoje.

Naudodami Nitrojet sistemą NASA technikai Kenedžio kosmodrome stengiasi nuimti daugkartinio naudojimo erdvėlaivio raketų vidines nuo perkaitimo saugančias dangas. JAV Jūrų laivynas šią sistemą pradėjo naudoti šalinti nuo laivų korpusų, antenų ir kitos įrangos atitarnavusioms antikorozinėms dangoms. Be to, naująją pjaustymo technologiją ėmė naudoti lėktuvų gamintojai Boeing bei Northrop Grumman, puslaidininkinių prietaisų gamintojai Semitool ir Rogers, dažus gaminančios firmos Sherwin-Williams ir Merimac Industries bei sufasuotą mėsą pardavinėjančios Hormel ir ConAgra firmos.

Dabar žemo slėgio Nitrojet sistema kainuoja nuo 200 iki 300 tūkstančių dolerių, o visiškai sukomplektuota - 450 000 dolerių. Tai gerokai didesnė už tradicinės vandens čiurkšlės naudojančios sistemos kainą, bet naujosios technologijos šalininkai sako, kad ji to verta.

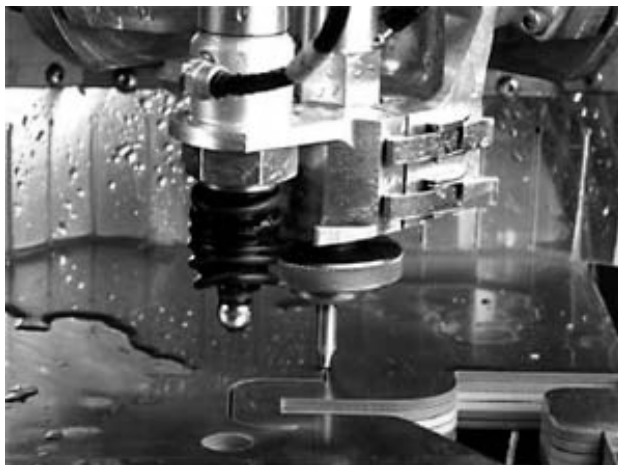
2.3.2. Pjovimo vandens srove technologija

Šis pjovimo metodas yra labai efektyvus mažinant gamybos kaštus, kartu ir universaliausias bei sparčiausiai besivystantis. Pjovimas vandens srove naudojamas daugelyje pramonės šakų visame pasaulyje. Pjaunant neišsiskiria jokių kenksmingų dujų ar skysčių, aplinka neteršiama kenksmingomis medžiagomis ar kvapais. Pjovimo srityje nelieka terminio poveikio ar padidėjusios mechaninės įtampos zonos. Tai iš tiesų universalus ir efektyvus šaltojo pjovimo procesas.

Pjovimas vandens srove (2.8 pav.) gali būti naudojamas ten, kur kiti pjovimo metodai yra bejėgiai. Šis metodas įrodė, jog yra unikalus tiek pjaunant plonas detales iš akmens, stiklo ar metalo, tiek greitai gręžiant skylės titane ar maistui konservuoti skirtose tarose.

Dažniausiai pasitaikanti pjovimo vandens srove klaida yra per žemas galingumas, spaudimas, per mažas abrazyvo kiekis. Reikia daryti priešingai - pjauti kuo greičiau [10]. Kuo didesnis pjovimo greitis, tuo mažesni pjovimo kaštai.

Siekiant pjauti didžiausiu įmanomu greičiu, reikia naudoti maksimalią jėgą. Abrazyvo kaina sudaro 2/3 mašinos aptarnavimo kainos, į kurią įeina energija, vanduo, oras, galvutės atsarginės dalys, keičiamos dalys, filtrai. Klaidinga manyti, kad sumažinus abrazyvo kiekį

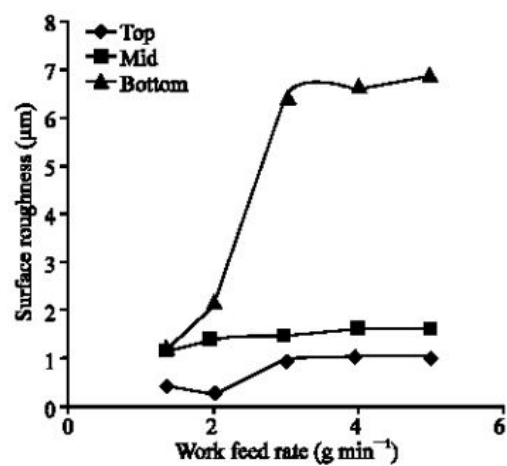


2.8 pav. Pjovimas vandens-abrazyvo čiurkšle

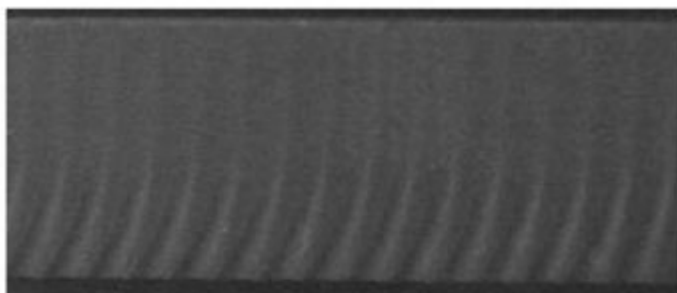
sumažėja pjovimo kaštai. Suskaičiavę visas išlaidas matysime, kad pigiausia pjauti didžiausiu galimu greičiu, nepriklausomai nuo medžiagos storio.

Renkantis siurblio galingumą labai svarbu įvertinti atliekamų darbų apimtį. Jei pjovimo darbai nebus labai intensyvūs, bus pjaunami tik pavieniai gaminiai, galingo siurblio įsigijimas nebūtų ekonomiškai pagrįstas. Jei planuojami intensyvūs darbai, siurblys turėtų būti kuo galingesnis.

A. A. Khan ir M. E. B. Awang, pjovusiems kietlydinius vandens ir abrazyvo čiurkšle, dėl pjovimo specifikos nepavyko gauti tolygaus pjūvio šiurkštumo. Didžiausias paviršiaus glotnumas (2.9 pav.) gautas pjūvio viršuje, mažiausias – apačioje [1]. Taip nutiko todėl, kad pjaunant vandens-abrazyvo čiurkšle, abrazyvo grūdelių greitis, kartu ir kinetinė energija buvo didžiausia prie pjovimo antgalio, t.y. viršutiniame pjaunamo ruošinio sluoksnyje. Toliau, abrazyvo dalelės, judėdamos gilyn į ruošinį, praranda greitį, kartu ir savo kinetinę energiją. Pjūvio vaizdą, prie skirtingų pjovimo greičių, matome 2.10 pav.:



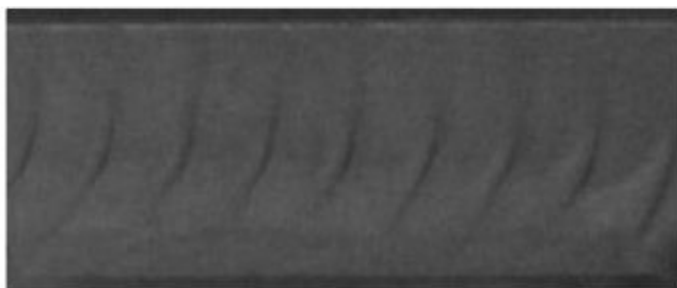
2.9 pav. Paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo darbinės pastūmos



Pastūma: 2 g min⁻¹



Pastūma: 3 g min⁻¹



Pastūma: 4 g min⁻¹

2.10 pav. Vandens-abrazyvo čiurkšle atpjauto paviršiaus kokybė

2.4. Kietlydiniai ir jų savybės

Kietlydiniai - metalų karbidų ar karbonitridų ir rišančiosios medžiagos (matricos) mišinys. Jie yra labai kieti (85...92 HRA) ir atsparūs dilimui lydiniai, kurie neminkštėja įkaitę iki 800...1000°C temperatūros. Dėl šių savybių kietlydiniai naudojami įvairiose srityse: kalnakasybos ir rūdos perdirbimo įrengimuose, matavimo prietaisuose, guolių gamyboje. Tačiau, pagrindinė jų pritaikymo sritis yra įvairių konstrukcinių medžiagų apdirbimo įrankiai. Kietlydinių savybėms didelės įtakos turi jų mikrostruktūra, kuri priklauso nuo daugelio veiksnių: cheminės sudėties, karbidų dalelių dydžio, formos ir pasiskirstymo; karbidų ištirpimo laipsnio; anglies kiekio; sudėties ir struktūros nevienodumo dėl difuzijos ir segregacijos, gamybos būdo.

Pagal gamybos būdą, kietlydiniai skirstomi į liejamuosius ir metalo-keraminius (miltelinius). Liejamieji - lydomi iš volframo, chromo karbidų su kobalto ar nikelio milteliais ir daugiausiai naudojami įrankių ir stipriai dylantiems mašinų dalių paviršiams apvirinti.

Metalo-keraminius kietlydinius galima suskirstyti į volframinčius ir bevolframinčius. Volframiniai kietlydiniai gaunami vandenilio aplinkoje 1400 - 1500°C temperatūroje sukepinant supresuotus, dažniausiai volframo, titano bei tantalio karbidų miltelius su rišančiąja medžiaga -kobalto milteliais. Tokioje temperatūroje kobaltas lydosi ir stipriai suriša karbidus, sudarydamas tankią medžiagą (porėtumas nedidesnis kaip 2 %). Kiti karbidai (niobio, cirkonio, hafnio, chromo, vanadžio, molibdeno) naudojami rečiau. Kita rišančioji medžiaga - geležis arba nikelis, taip pat naudojama rečiau, nes juose ištirpsta daug volframo karbido (nikelyje iki 25%, geležyje iki 5%), todėl padidėja trapumas. Kobalte ištirpsta tik 1% volframo karbido. Šių kietlydinių savybės labai priklauso nuo karbidų ir kobalto santykio medžiagoje. Daugėjant kobalto, didėja kietlydinio atsparumas lenkimui, smūginei ir ciklinei apkrovai, bet mažėja kietumas bei atsparumas dilimui, ir temperatūra, kurioje pasireiškia adhezija.

Volframo karbido ir kobalto (WC/Co) kietlydiniai. Kuo smulkesni karbido grūdėliai ir kuo mažiau sudėtyje kobalto, tuo kietlydiniai kietesni ir atsparesni dilimui, bet mažesnis jų stiprumas ir atsparumas smūgiams. Pjovimo įrankiams naudojamo kietlydinio sudėtyje yra maždaug 2-15 % kobalto [15]. Kietlydiniai su didesniu kobalto kiekiu yra tasesni, todėl labiau tinka rupiajam apdirbimui bei pjovimui su smūgiais. Jų atsparumas dilimui mažesnis, bet didesnis eksploatacinis stiprumas. Iš smulkiagrūdžių kietlydinių gaminami įrankiai labai sunkiomis sąlygomis apdirbti nerūdijančius, atsparius kaitrai bei didelio stiprumo plienus, taip

pat titano, nikelio, molibdeno lydinius. Kai karbidai yra labai smulkiagrūdžiai - gaminami smulkūs vientisiniai įrankiai. Optimalias kietlydinio savybes užtikrina kiek įmanoma mažesnis porėtumas, reguliarus grūdelių dydis ir artimas teoriniam anglies kiekis karbidų fazėje. Siekiant gauti smulkesnę struktūrą, kai kurie volframo karbidų kietlydiniai modifikuojami 0,5-3 % tantalio, niobio, chromo, vanadžio, titano, hafnio ar kitais karbidais [4].

Volframo ir titano karbidų (WC/TiC/Co) kietlydiniai. Volframo karbidas tirpsta titano karbide, todėl jei pastarojo medžiagoje yra pakankamai, struktūrą dažniausiai sudaro viena karbidinė fazė - kietasis tirpalas (Ti,W)C [15]. Pagrindinė titano karbido paskirtis - didinti kietlydinio šiluminį patvarumą nes jis daug atsparesnis aukštatemperatūrei difuzijai nei volframo karbidas, kuris difunduoja į apdirbamą medžiagą ir su ja sukimba, dėl to įrankio pjovimo briauna išplėsoma. Lyginant su volframo karbidų kietlydiniais, šiluminis patvarumas padidėja nuo 800°C iki 900...1000°C. Taip pat, jie yra kietesni ir atsparesni dilimui, tačiau mažesnio stiprumo ir didesnio trapumo, todėl mažiau atsparūs smūgiams. Kuo mažiau sudėtyje titano karbido, tuo kietlydiniai tasesni ir stipresni, bet mažesnio šiluminio patvarumo.

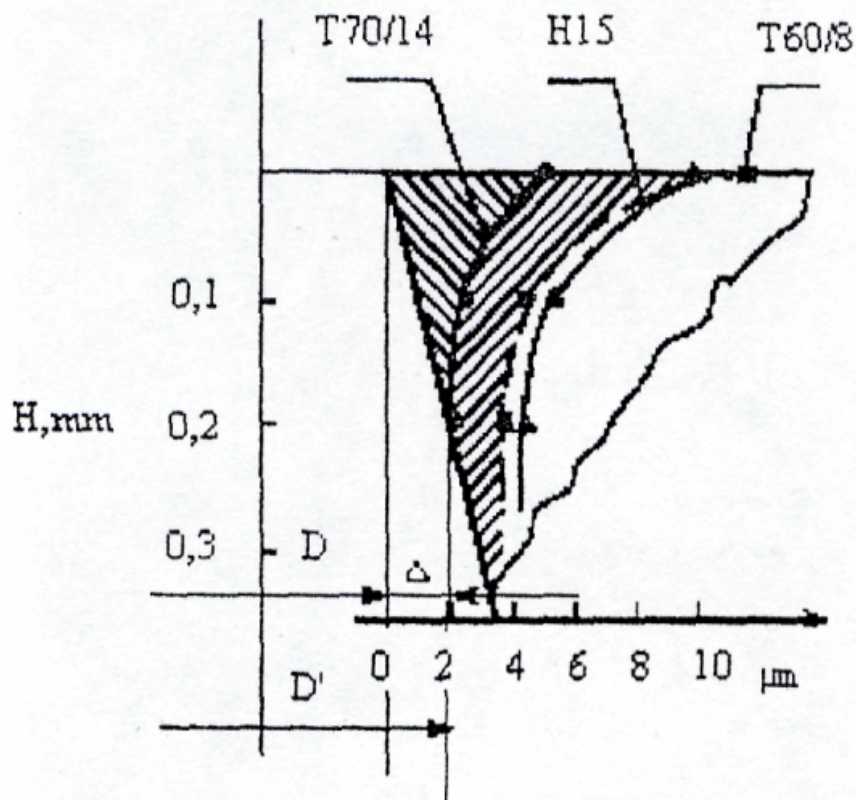
Volframo, titano ir tantalio karbidų (WC/TiC/TaC/Co) kietlydiniai pagal mechanines savybes yra tarpiniai tarp WC ir WC/TiC grupių kietlydinių. Jie stipresni ir tasesni už volframo ir titano karbidų kietlydinius, bet mažesnis jų atsparumas dilimui ir šiluminis patvarumas.

Volframiniai kietlydiniai yra stipriausi ir atspariausi smūgiams, tačiau volframas brangus ir jo trūksta. Todėl gaminami ir bevolframiniai kietlydiniai. Jų pagrindą sudaro titano karbidai ir karbonitridai, o rišamoji medžiaga - molibdenas ir nikelis. Kai rišamosios medžiagos yra iki 20 %, kietlydiniai būna kieti, didelio šiluminio patvarumo, nesukibantys su apdirbama medžiaga [3,17]. Tačiau jie žymiai trapesni ir ne tokie atsparūs smūgiams. Taip yra dėl to, kad kietos būsenos titano karbidas gerai tirpsta nikelyje, ir rišamosios fazės tūsumas yra nedidelis. Iš tokių kietlydinių gaminami įrankiai plienui ir ketui pjauti dideliu greičiu, nuimant nestoras drožles. Kai rišamosios medžiagos daug (30-70 %), kietlydiniai atsparūs oksidacijai, terminiams įtempimams, turi gerą atsparumą valkšnumui net 1000-1200°C temperatūroje. Todėl iš jų gaminami įrankiai, kurie turi būti atsparūs abrazyviniam dilimui aukštoje temperatūroje.

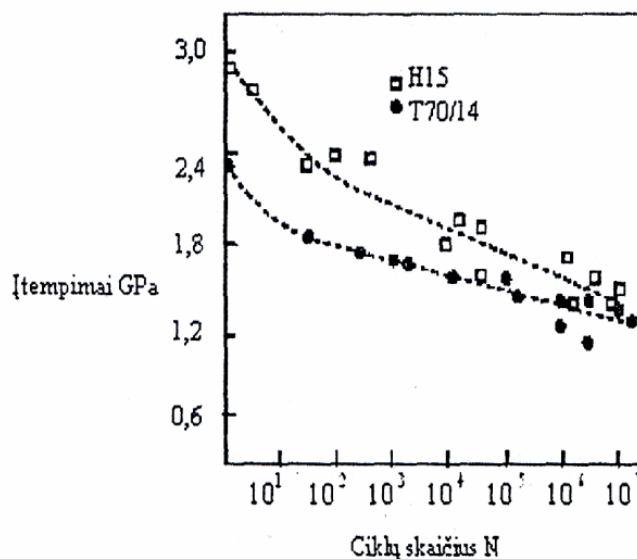
Kietlydinių savybės gali būti gerinamos įvairiais būdais. Kietlydinio plokštelių patvarumas ir ilgaamžiškumas 2-4 kartus padidinamas, padengus jas 5-10 mikrometrų storio aliuminio oksido ar titano junginių - karbido, nitrido, karbonitrido bei borido - dangomis. Dengiama

termodifuziniu, vakuuminiu - plazminiu būdais arba įsotinant iš dujinių fazių. Vienas iš galimų būdų, padidinti kietlydinių kietumą ir atsparumą plyšių susidarymui, yra jų apdorojimas plazma. Atlikus mikrobandomus ir metalografinę analizę, nustatyta, kad po tokio apdorojimo, kietlydinių savybės pagerėja dėl karbido grūdelių susmulkėjimo, rišančiosios medžiagos dispersinio sukietėjimo ir suirimo energijos išsibarstymo [16].

Volframinių ir bevolframinių kietlydinių savybės galima palyginti pagal straipsnyje [7] pateiktus eksperimentų rezultatus (2.11 ir 2.12 pav.). Eksperimentas buvo atliekamas su tokiais kietlydiniais: H15 - volframo karbido kietlydinis, turintis 15 % kobalto; T70/14 - 70 % titano karbido turintis kietlydinis, su rišančiąja medžiaga - austenitinės sandaros geležies ir 15 % nikelio lydinio; T60/8 - 60 % titano karbido turintis kietlydinis, su rišančiąja medžiaga - martensitinės sandaros geležies ir 8 % nikelio lydinio.



2.11 pav. Kietlydinių nudilimo kontūras



2.12 pav. Kietlydinių nuovargio kreivės

Kaip matyti iš 11 pav., bevolframiai titano karbido kietlydiniai dilimui atsparesni už volframo karbido kietlydinius. Volframo karbido kietlydinio atsparumas nuovargiui (2.12 pav.), esant mažam ciklų skaičiui, didesnis, tačiau, didėjant ciklų skaičiui, mažėja sparčiau ir prie didelio ($N = 10^7$) ciklų skaičiaus šios abiejų grupių kietlydinių charakteristikos suvienodėja.

2.5. Technologinės deimantų savybės

Deimantai (2.13 pav.) savo abrazyvinėmis savybėmis žymiai pranoksta visas šiuo metu žinomas kietas medžiagas. Tokį pranašumą daugiausiai lemia trys deimantų fizikinės - techninės savybės:

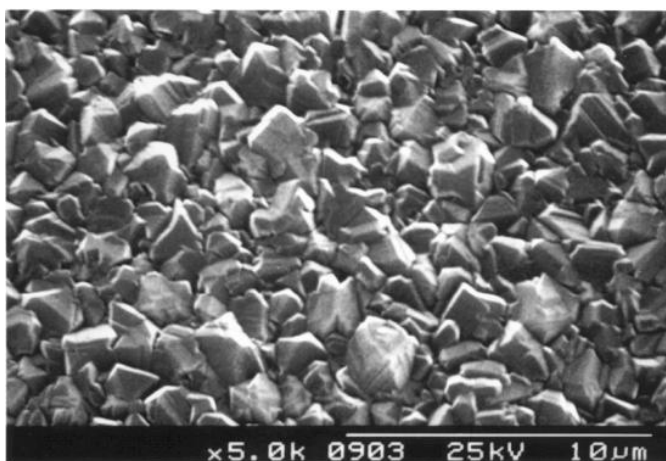
- ypatingas kristalų kietumas;
- dideli paviršiniai įtempimai;
- didelis šilumos laidumas.

Pagal kokybinę Moso kietumo skalę deimantas priskiriamas aukščiausiai dešimtajai klasei [14]. Vertinant kiekybiniais metodais, išmatuotas deimantų mikrokietumas siekia iki

100 GPa. Tokiam kietumui, iš šiuo metu naudojamų abrazyvinių medžiagų, prilygsta, o kai kuriais atvejais ir viršija, tiksliai kubinio boro nitrido kietumas. Tačiau kitos fizinės - mechaninės deimantų savybės daug geresnės.

Mechaninio apdirbimo metu, įrankio darbinės dalies ir ruošinio kontakto zonoje dėl trinties išsiskiria didelis šilumos kiekis, kurio medžiagos šiluminiu laidumu, intensyviai dirbant, nuvesti nebespėjama. Dėl perkaitinimo įrankių darbinė dalis intensyviai dyla ar netgi pažeidžiama, todėl pjovimo proceso metu į kontakto zoną paduodamas aušinimo skystis, turintis didelę šiluminę talpą. Deimantai, turintys labai gerą šilumos laidumą, užtikrina greitą šilumos nuvedimą iš darbo zonos. Pavyzdžiui, lyginant su kietlydiniais, jų šilumos laidumas yra daug didesnis, o santykinė šilumos talpa - 3 kartus didesnė. Didelis šilumos laidumas užtikrina ramų pjovimo režimą, nes lokaliniai terminiai įtempimai nežymūs.

Deimanto kristalų paviršiniai įtempimai yra nepaprastai dideli. Kristalo rombododekaedro riboje šių įtempimų reikšmė siekia 10 000 N/m (kitų kietų kūnų ši reikšmė neviršija 400 N/m). Tokie, dideli paviršiniai įtempimai susilpnina apdirbamų ruošinių paviršiaus molekulių lauką, ir taip palengvinamas įrankio įsiskverbimas į medžiagą.



2.13 pav. Sintetinių deimantų grūdėliai

Dėl didelio deimantų kietumo ir atsparumo dilimui, galima dirbti dideliu greičiu, beveik neprarandant deimantų grūdelių. Geros deimantų technologinės savybės, apdorojant medžiagas, buvo pastebėtos seniai. Beveik prieš du tūkstančius metų Plinijus Vyresnysis savo veikale „Gamtos istorijos“ rašė apie jų pritaikymą raižant akmenį. Indijoje, Egipte, Graikijoje, Italijoje deimantais buvo pjaustomi ir graviruojami įvairūs brangakmeniai bei metalai.

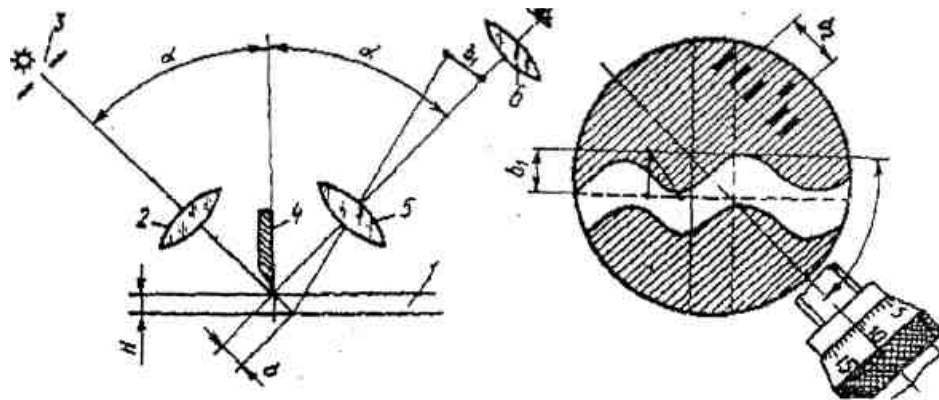
Ypatingai plačiai deimantiniai pjovimo įrankiai pradėti naudoti, įdiegiant pramonėje kietlydinius ir kitas sunkiai apdirbamas medžiagas. Techninių deimantų poreikis žymiai pradėjo didėti nuo praėjusio šimtmečio 30 -ųjų metų. Šiuo metu deimantiniai įrankiai paplitę daugelyje pramonės sričių, o kai kuriose technologijose yra praktiškai nepamainomi. Prie tokių galima būtų priskirti puslaidininkių pjaustymą į plonas plokšteles, optinio ir techninio stiklo pjovimą ir kt.

2.6. Matavimo metodai

2.6.1 Kiekybinis metodas

Matuojant kiekybiniu metodu, dažniausiai gaunamas padidintas profilio vaizdas, pagal kurį nustatomi reikiami parametrai [5,17]. Šiuo metodu paviršiai gali būti tiriami dviem būdais: liečiant ir neličiant. Liesdami paviršių matuoja profilografai ir profilometrai. Kai matuojama neličiant, naudojamos įvairios fizikinės reiškinys, tačiau labiausiai paplitę optiniai prietaisai, matuojantys šviesos skerspjūvio ir šviesos interferencijos būdu.

Šviesos skerspjūvio būdas. Šiuo būdu veikia dvigubieji mikroskopai. Jie sudaryti iš projektuojančio mikroskopo, apšviečiančio matuojamąjį paviršių, ir matavimo mikroskopo, kuris projektuoja atsispindėjusį nuo paviršiaus siaurą spindulių pluoštą į ekraną. Spindulių pluoštas, ateinantis nuo šviesos šaltinio per maždaug 0,1 mm pločio plyšį 3 (2.14 pav.) ir objektyvą 2, nukreipiamas į tiriamąjį paviršių kampų α . Atsispindėję nuo paviršiaus, spinduliai išsikreivina proporcingai paviršiaus šiurkštumui. Gautas atvaizdas objektyvu 5 suprojektuojamas į okuliaro 6 fokuso plokštumą.



2.14 pav. Matavimo šviesos skerspjūvio būdu schema

Nelygumo, kurio gylis H , šviesos skerspjūvis yra:

$$b = \frac{H}{\sin \alpha}. \quad (1)$$

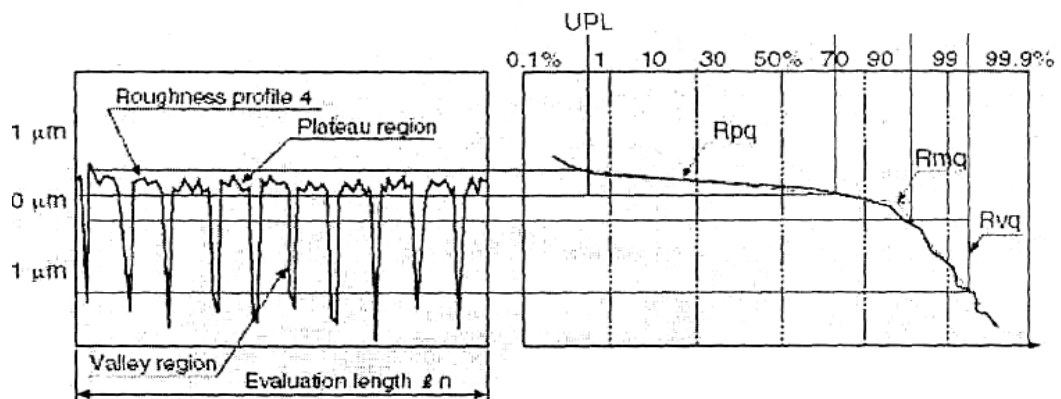
Šviesos skerspjūvio dydis, okuliaro plokštumoje, b_1 priklauso nuo mikroskopo objektyvo didinimo V :

$$b_1 = bV. \quad (2)$$

Dydis b_1 matuojamas okuliario mikrometru, kurio padalos pasuktos kampu $\beta - 45^\circ$ ir taip įvertinamas dydis b_2 . Jeigu spindulių pluoštas krenta kampu $\alpha - 45^\circ$,

$$\text{tai: } b_2 = \frac{b_1}{\sin \beta} = \frac{HV}{\sin \alpha \sin \beta}; \quad (3)$$

R_{pq} - medžiagos santykio lygis, atitinkantis plokščių viršūnių ir įdubų regresijos linijų susikirtimą.



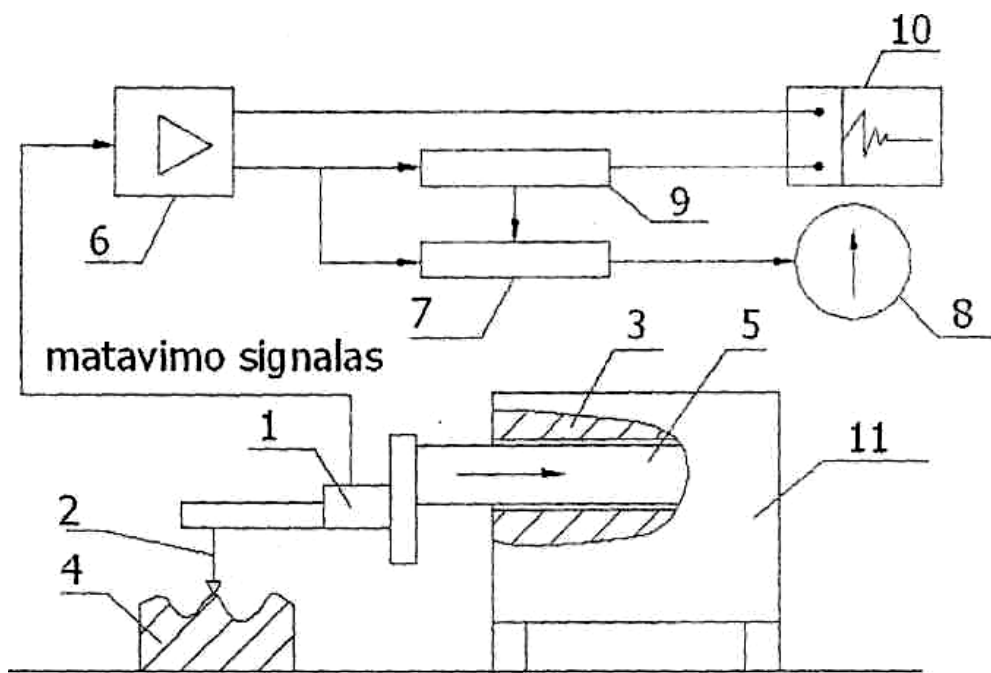
2.15 pav. Statistiniai parametrai, nustatyti naudojant atraminio santykio kreivę

2.6.2. Kokybinis metodas

Matuojant šiuo būdu, apie paviršiaus šiurkštumą sprendžiama ne nustatant konkrečius parametrus, o lyginant jį su šiurkštumo pavyzdžiais. Šiurkštumo pavyzdžiai - tai plieninės arba ketinės skirtingo šiurkštumo plokštelės, apdirbtos skirtingais būdais ir yra skirtingo šiurkštumo [5]. Tekintos, frezuotos, drožtos, plėstos plokštelės būna negrūdintos. Šlifuotos, poliruotos, trintos -grūdintos. Pavyzdžiai dažniausiai normuojami pagal parametą R_a , kurio vertė užrašoma nedarbiniame paviršiuje. Leistinos nuokrypos nuo nominalios vertės - nedaugiau 15 %. Kitų tradicinių parametrų reikšmės pateikiamos dokumentacijoje ir yra tikrai informacinio pobūdžio. Plokštelių matmenys priklauso nuo paviršiaus šiurkštumo: 30x20 mm, kai $R_a < 6,3 \mu\text{m}$; kai $R_a > 6,3 \mu\text{m}$, didesnis matmuo turi būti nemažiau 40 mm [16]. Pavyzdžiai grupuojami į rinkinius, skirtus tam tikro tipo detalių šiurkštumui įvertinti. Kartais tokiam šiurkštumo įvertinimui naudojamos ir pavyzdinės detalės, kurių paviršius prieš tai išmatuojamas matavimo prietaisais. Palyginimui parenkamas pavyzdys, pagamintas tokiu pat būdu iš tokios pat medžiagos. Lyginama vizualiai arba braukiant nagu statmenai apdirbimo kryptčiai. Tokiu būdu galima nustatyti iki $R_a 1 - 0,1 \mu\text{m}$ šiurkštumą. Pakankamai tiksliai iki $R_a 0,032 \mu\text{m}$ šiurkštumą galima nustatyti palyginamuoju mikroskopu, kuriuo vienu metu stebimi ir lyginami matuojamasis ir pavyzdinis paviršiai, padidinti iki 200 kartų. Šis metodas yra subjektyvus, - jo tikslumas stipriai priklauso nuo matuojančio žmogaus kvalifikacijos.

Profilografai - profilometrai. Šiais prietaisais (2.16 ir 2.17 pav.) šiurkštumas nustatomas pagal jutiklio (adatos), kurios smaigalys remiasi į matuojamąjį paviršių ir juo slenka, svyravimą. Jutiklio svyravimai įvairiais keitikliais (pjezoelektriniais, induktyviaisiais ir kt.) paverčiami elektriniu signalu, kuris sustiprinamas ir perduodamas į registravimo ar skaičiavimo įtaisus. Tokie prietaisai vadinami profilografais. Mikroprocesoriniai įrenginiai gali automatiškai įvertinti matavimo rezultatus, pateikti profilogramas ir skaitines parametrų vertes. Filtrais iš profilogramų pašalinamos tam tikro dažnio harmoninės dedamosios, taip eliminuojant detalės formos paklaidas, banguotumą, pastatymo netikslumus.

Gaminami prietaisai, turintys tokius funkcinius rodiklius: nelygumų profilogramos didinimas iki 100 000 kartų; registruojami nelygumai nuo 0,02 iki 250 μm ; adatų smaigalio suapvalinimo spindulys 0,01 + 0,0025 mm arba 0,02 + 0,002 mm; matavimo jėga ne didesnė kaip 0,1 N; adatos traukimo greitis 0,06; 6 arba 60 mm/min; sistemingoji paklaida siekia iki 2,5 %, matavimo neapibrėžtis 0,6 %.



2.16 pav. Profilografo schema: 1 – matavimo keitiklis; 2 – adata; 3 – kreipiančioji; 4 – detalė; 5 – slankiklis; 6 – stiprintuvas; 7 – skaičiuoklis; 8 – rodomasis įtaisas; 9 – filtras; 10 – registravimo įtaisas; 11 – korpusas



2.17 pav. Profilografas

Jei profilogramos neužrašomos, o pateikiamos tik skaitinės parametro vertės, prietaisas dirba profilometro režimu. Gamyboje plačiai naudojami maži mobilūs profilometrai ir profilometrai – profiioagrafai. Juos galima atnešti prie matuojamojo objekto ir uždėti ant bet kurioje erdvinėje padėtyje esančio paviršiaus. Tokių prietaisų matavimo galimybės ne mažesnės nei stacionariųjų.

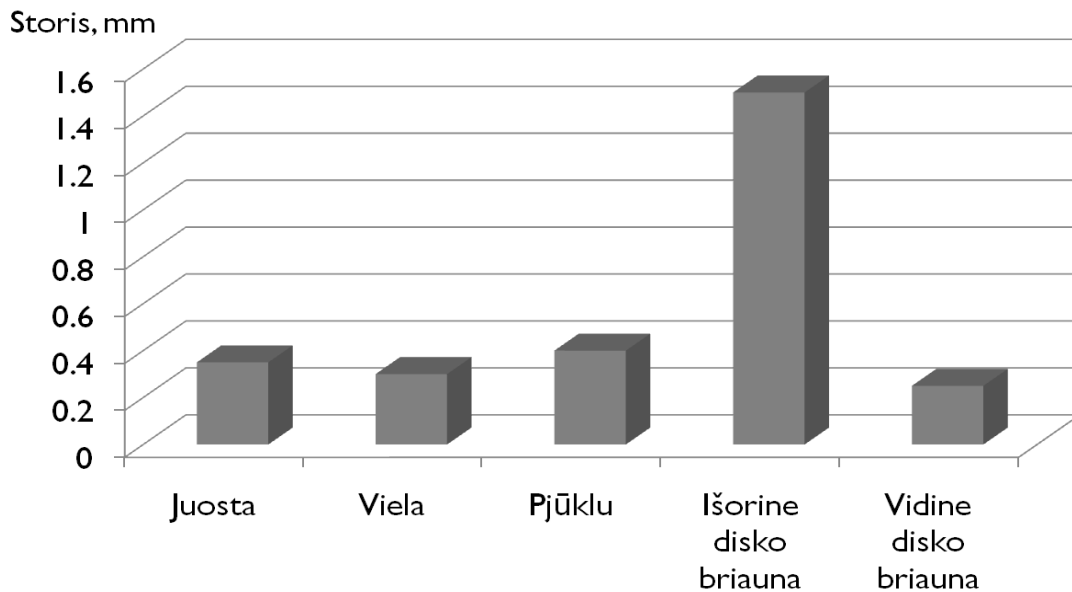
Matuojant kreivų paviršių šiurkštumą (pavyzdžiui, sferos, krumplio), matavimo adatai suteikiamas judesys, kurio trajektorija atitinka nominalųjį profilį. Tai padaroma įvairiais būdais, pavyzdžiui matavimo keitiklis pakabinamas šarnyriškai slankiklio atžvilgiu ir papildoma atrama atremiamas į tokios pat formos paviršių. Jei matuojamas vidinės sferos, cilindro ar kito sukimosi, iš šios formulės, gaunama tokia nelygumų aukščio išraiška:

$$H = \frac{b_2}{V\sqrt{2}}; \quad (4)$$

Tokiais mikroskopais matuojamas iki R_a 0,032 μm šiurkštumas. Santykinė matavimo paklaida, mažėjant šiurkštumui padidėja nuo 2 iki 24 %.

2.7. Uždavinio formulavimas

Vienas iš našiausių būdų pjaustant ypač kietas medžiagas, tokias kaip pavienius safyrai, silicio karbido, kubinio boro nitrido kristalai ir kitas, yra pjovimas diskais su vidine deimantine pjovimo briauna. Tokio disko storis yra labai mažas (nuo 0,20 mm), pjūvis yra siauras, lyginant su kitais pjovimo būdais (2.18 pav.). Dėl šios priežasties pasirinkau tirti šį pjovimo būdą.



2.18 pav. Pjovimo išeigos pjaustant skirtingais įrankiais

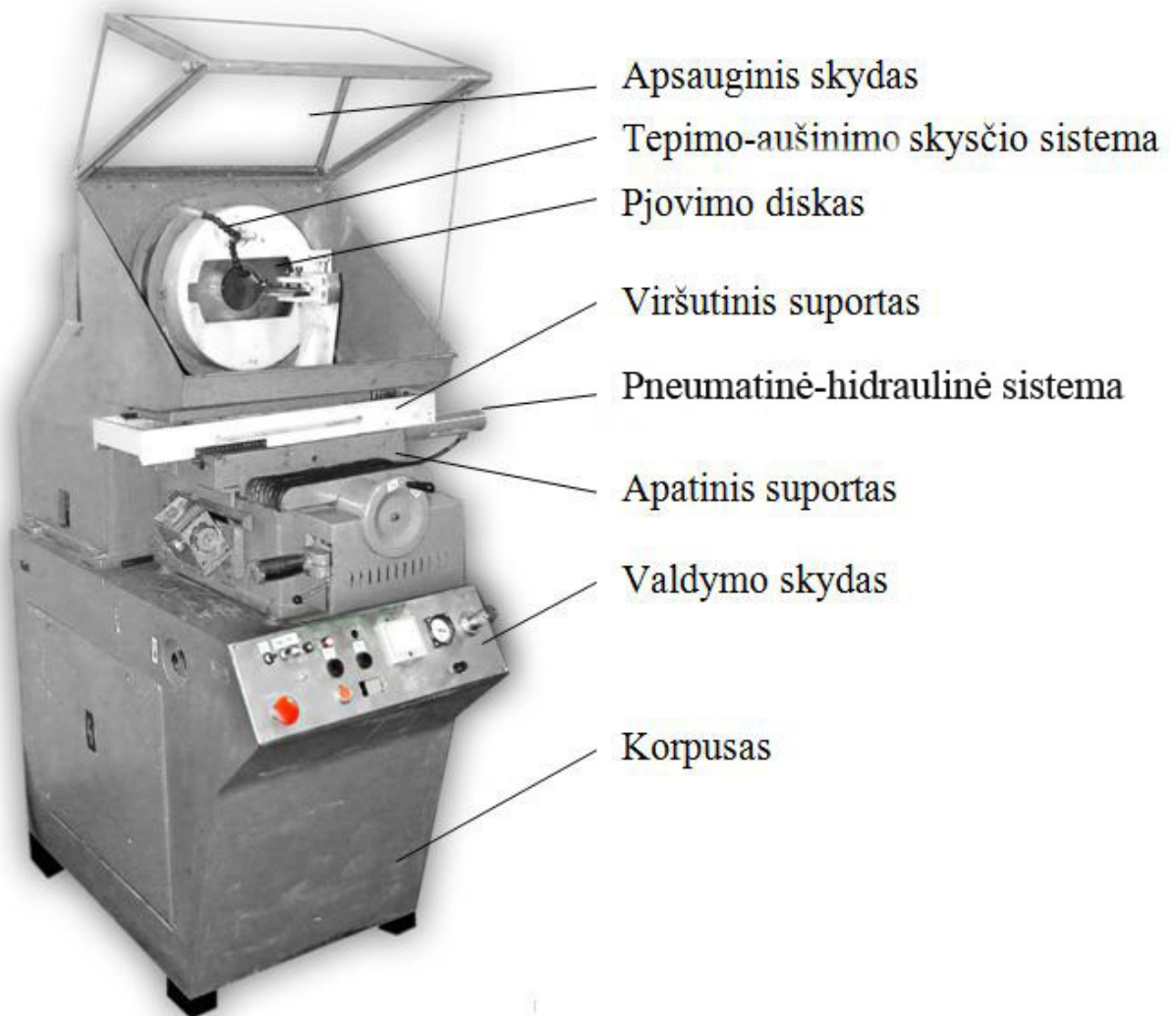
Pasirinkus pjovimo vidine deimantinio disko briauna būdą, susiduriama su šiomis problemomis, kurias reikėtų spręsti:

- pjovimas vidine disko briauna taikomas kristalų, silicio oksido, safyro pjaustymui. Atsižvelgiant į medžiagų savybes, šis būdas galėtų tikti ir kietlydinių pjaustymui.
- mokslinių publikacijų ir kitos informacijos apie šį pjovimo būdą praktiškai nėra.
- technologinių režimų bibliotekos, pjaunant šiuo būdu kietas medžiagas, praktiškai nėra. Dėl šios priežasties reikia atlikti tyrimus, kaupti ir sisteminti pjovimo režimų duomenis.

3. PJOVIMO REŽIMŲ TYRIMO EKSPERIMENTINĖ DALIS

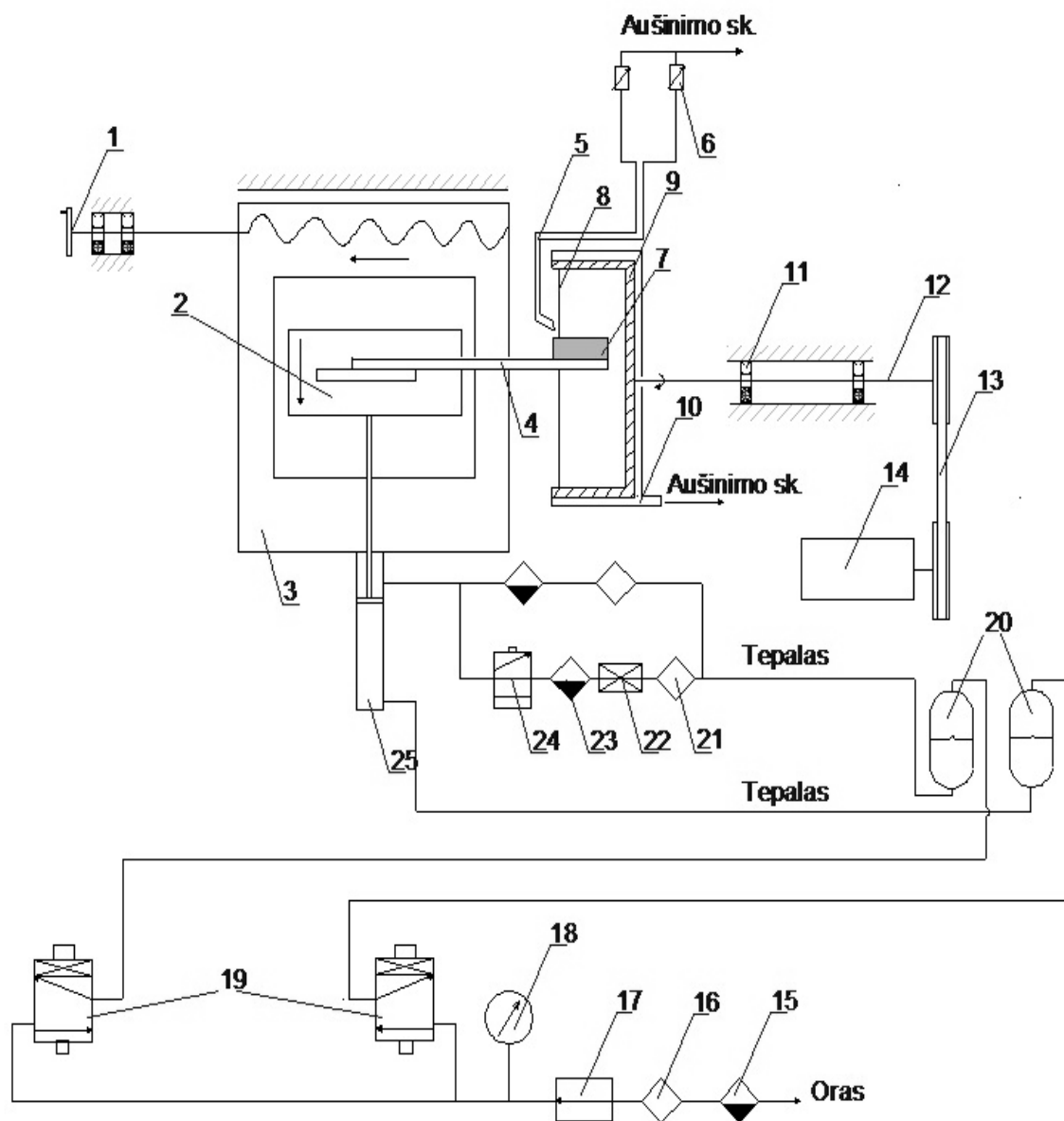
3.1. Tyrimų stendas

Tiriamąjį darbo metu reikiamas operacijas atlikau deimantinio pjovimo staklėmis „Almaz-4“ (3.1 pav.).



3.1 pav. Staklių „Almaz-4“ bendras vaizdas

Šių staklių su vidine deimantinio disko pjaunančiąja briauna, kinematinė schema pateikta 3.2 pav.



3.2 pav. Staklių „Almaz-4“ kinematinė schema: 1 – eigos reguliatorius; 2 – viršutinis suportas; 3 – apsauginis korpusas ir apatinis suportas; 4 – laikiklis; 5 – vamzdelis aušinimo skysčiui tiekti; 6 – aušinimo skystis; 7 – ruošinys; 8 – deimantinis diskas; 9 – sukimosi būgnas; 10 – anga aušinimo skysčiui išbėgti; 11 – radialiniai atraminiai guoliai; 12 – sukimosi ašis; 13 – diržinė pavara; 14 – variklis; 15 – filtras; 16 – tepalo skirstytuvas; 17 – slėgio reguliatorius; 18 – manometras; 19 – elektromagnetinis eigos vožtuvas; 20 – tepalo bakeliai; 21 – atbulinis vožtuvas; 22 – greičio reguliatorius; 23 – filtras; 24 – elektromagnetinis vožtuvas; 25 – hidrocilindras

Suklys 12 turi savarankišką jungtį su nuolatinės srovės varikliu per diržinę pavarą 14. Suklio velenas yra įtvirtintas labai tiksliai radialiniais atraminiais guoliais, kurie reguliuojami atitinkamais varžtais.

Ant suklio galo tvirtinamas sukimosi būgnas 9, prie kurio atitinkamai tvirtinamas deimantinis diskas 8. Ruošinys 7 tvirtinamas laikiklyje 4 ir pjaunant aušinamas tepimo-aušinimo skysčiu, tiekiamu vamzdeliu 5.

Viršutinis 2 ir apatinis 3 suportai atlieka išilginę ir skersinę ruošinio 7 pastūmą su hidrocilindru 25, kuris turi reguliatorių 22 ir eigos ragulatorių 19. Derinant įrenginį, keičiant daviklių padėtį, reguliuojama pastūmos kryptis 19.

Hidrocilindras 25 veikia pneumatinėje-hidraulinėje sistemoje, susidedančioje iš filtrų 15 ir 23, tepalo skirstytuvo 16, slėgio regulatoriaus 17, manometro 28, elektromagnetinių vožtuvų 19, tepalo bakelių 20, atbulinių vožtuvų 21, greičio regulatoriaus 22 ir vamzdelių.

Staklės turi du darbo režimus: derinimo ir vienkartinės eigos. Režimai reguliuojami ant valdymo pulto. Priklausomai nuo pasirinkto režimo suveikia skirtingi galiniai išjungikliai.

3.2. Pjovimo disko įtvirtinimo metodika

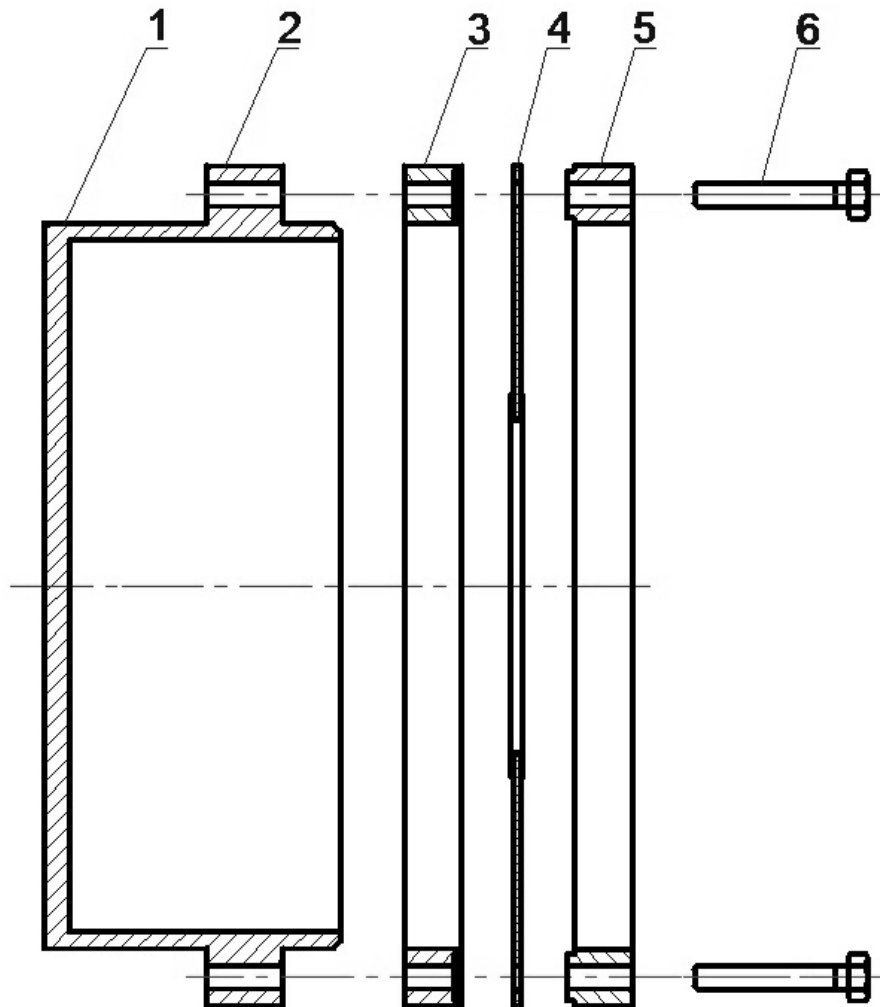
Praktikoje disko įveržimas vykdomas įvairiais būdais (hidraulinis, mechaninis ir kt.).

Deimantinis diskas tvirtinamas prie būgno, įdedant jį tarp žiedų su sferiniais paviršiais. Žiedai sutvirtinami varžtais. Siekiant išvengti disko skilimo tarp būgno ir žiedų dedama tarpinė iš tekstolito.

Priveržtas deimantinis diskas turi daug geometrinių formos trūkumų: nelygi plokštuma (išlenkimas iki 30 mkm), pjaunančios briaunos ašinis mušimas, pjaunamoji briauna elipsės formos ir kt.. Visi šie trūkumai labiau matomi didinant disko skersmenį. Tai turi didelės įtakos pjovimo kokybei.

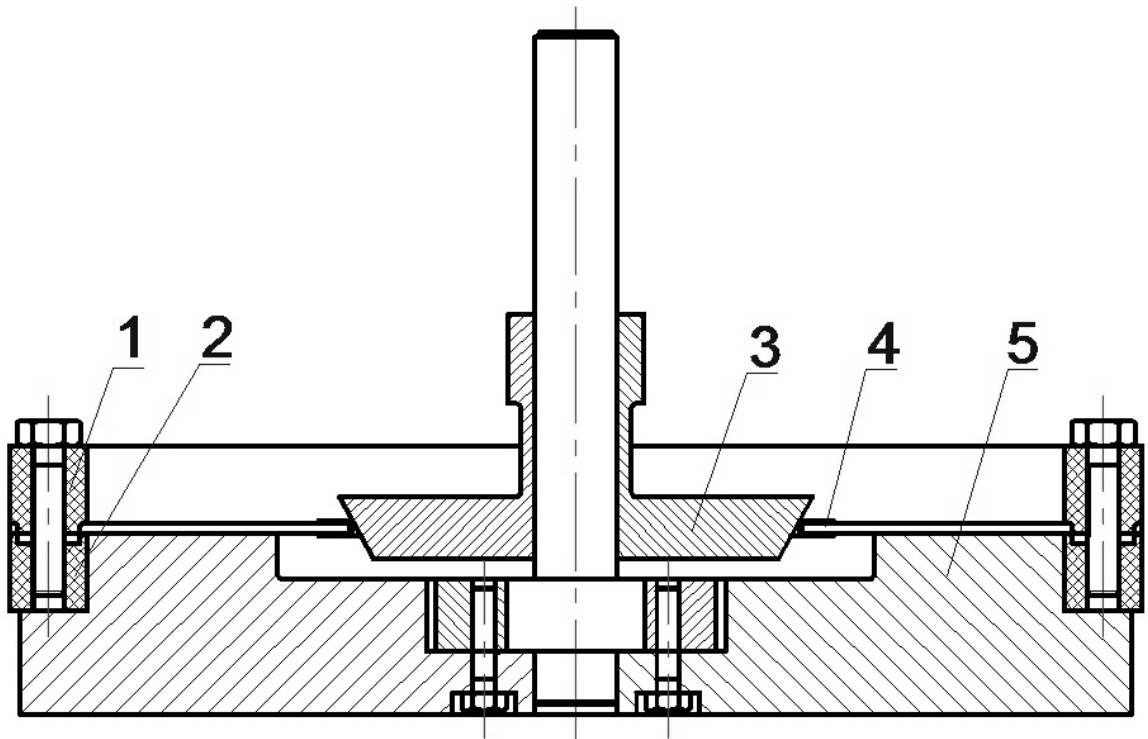
Diskas tvirtinamas varžtais suklio gale, kurio apsisukimo skaičius nuo 3 iki 5 tūkst. aps/min., prie būgno (3.3 pav.) žiedais, turinčiais sferinį iškilimą, kurie ir duoda pirminį disko

įveržimą. Galutinį disko įveržimą prie būgno 1. su varžtais 6, žiedais 5 ir 3 diskas 4 prispaudžiamas prie būgno. Tarp žiedų ir būgno auselių 2 įmontuojamos reguliuojančios tarpinės, kurios neleidžia judėti žiedams ir apsaugo diską nuo trūkimo dėl didelio įveržimo. Tolygus disko įveržimas vykdomas veržiant paeiliui varžtus.



3.3 pav. Disko tvirtinimas: 1 – sukimosi būgnas; 2 – tvirtinimo auselės; 3 ir 5 – žiedai;
4 – pjovimo diskas; 6 – tvirtinimo varžtai

Deimantinio disko centravimo metodika. Didelę įtaką atpjautos medžiagos kokybei turi tikslus disko centravimas (3.4 pav.), nes kreivai įveržus diską, pjaustant atsiranda mušimas, kuris turi neigiamos įtakos medžiagos paviršiaus kokybei.



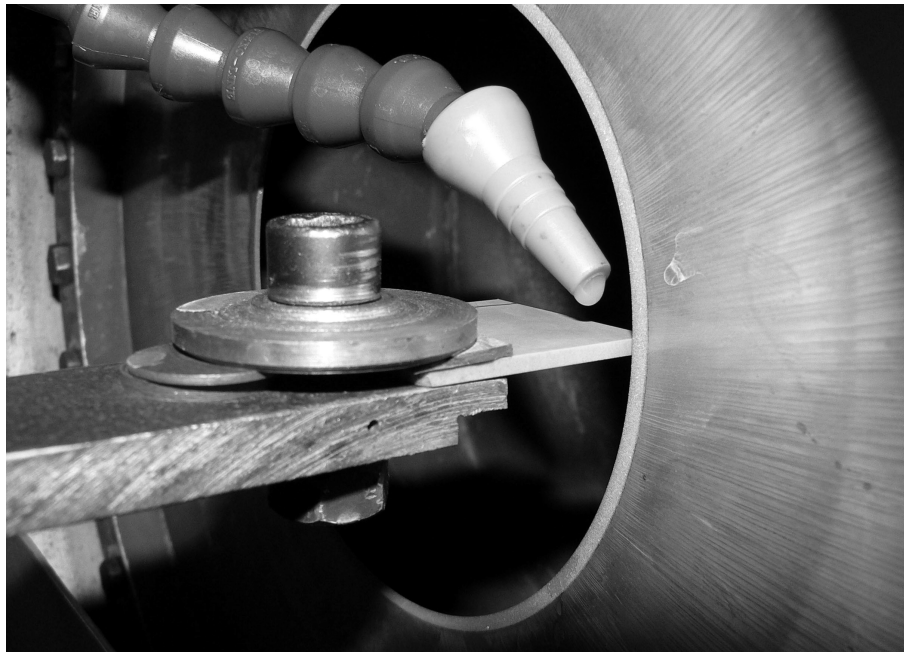
3.4 pav. Įrenginys, skirtas deimantiniam diskui su vidine pjaunančiąja briauna centruoti: 1, 2 – apatinis ir viršutinis žiedai; 3 – centravimo įvorė; 4 – deimantinis diskas; 5 – pagrindas

Deimantinių diskų centravimas atliekamas specialiu įrenginiu [14]. Tam tikslui nuo būgno nuimami viršutiniai ir apatiniai žiedai ir dedami ant pagrindo 5, prieš tai įdedant tarp jų deimantinį diską 4. Ant centravimo įvorės ir žiedų kraštuose užveržiami varžtai.

3.3. Pjovimo technologija ir metodika

Šiame tyrime pjovimo įrankis - deimantinis diskas su vidine pjovimo briauna, kurio deimantų grūdėtumas 60/40. Deimantinis sluoksnis suformuojamas nusodinant elektrocheminiu būdu ant aukštos kokybės nerūdijančio plieno. Dažniausiai naudojami diskai, kurių priekinė pjovimo briauna susideda iš didesnio deimantų grūdėtumo, o šonų grūdėtumas mažesnis, kas leidžia sumažinti apdirbamo paviršiaus šiurkštumą. Tyrimo metu pjaunamos medžiagos buvo volframinės ir bevolframinės kietlydinio plokštelės T14K8 ir KHT-16. Jos gaunamas krosnyse, apie 1500 °C temperatūroje, sukepinant reikalingas medžiagas pageidaujamose formose. T14K8 kietlydinių kietumas yra apie 91HRA, atsparumas lenkimui apie 1250 MPa. KHT-16 kietumas yra apie 95HRA, atsparumas lenkimui apie 810 MPa.

Pjovimo operacija buvo atliekama pjovimo staklėmis „Almaz-4“. Pjovimo metu, naudojant pneumatinę-hidraulinę mikropastūmos mechanizmą, ruošinys slenka išilgai pjovimo disko paviršiumi ir tuo pačiu yra purškiamas į pjovimo zoną tepimo-aušinimo skystis (3.5 pav.). Tepimo-aušinimo skystis aušina kontakto zoną, stabdo pjaunamo ruošinio vidinės mikrostruktūros pokyčius, galinčius atsirasti dėl didelių temperatūros pokyčių [2]. Taip pat iš pjovimo zonos išplauna susidariusias drožles.



3.5 pav. Pjovimo zonos vaizdas

Disko pagrindas gaminamas iš aukštos kokybės nerūdijančio plieno su molibdeno, vanadžio arba titano priedais.

Deimantinis sluoksnis ant disko formuojamas nusodinant elektrocheminiu būdu deimantinius grūdėlius. Kaip metalas – rišiklis gali būti nikelis, kobaltas, chromas, varis, alavas, geležis.

Paprastai, dengiat diskus, naudojami didelio tvirtumo natūralūs ir sintetiniai deimantai, kurių grūdėtumas 60–80 mkm. Tinkamas grūdėtumo pasirinkimas lemia našumą ir paviršiaus kokybę. Kuo didesnis deimanto grūdėtumas, tuo didesnis paviršiaus šiurkštumas, pvz.: jeigu deimanto grūdėlius padidintume nuo 60/40 iki 125/100, tai šiurkštumas pasikeis apie 1,7 karto.

Disko pagrindo kietumas yra labai svarbus faktorius, kuris turi įtakos ruošinio pjovimo tikslumui ir kokybei. Jo tvirtumas proporcingas disko įveržimui ir jo storiui.

$I=P/F$, čia I – tvirtumas; P – normaliniai įtempimai; F – ašiniai poslinkiai.

Dažniausiai pasitaikančios diskų tvirtumo reikšmės yra 3-5x10 N/m. Stiprus disko įveržimas turi įtakos disko susidėvimui ir pjovimo tikslumui.

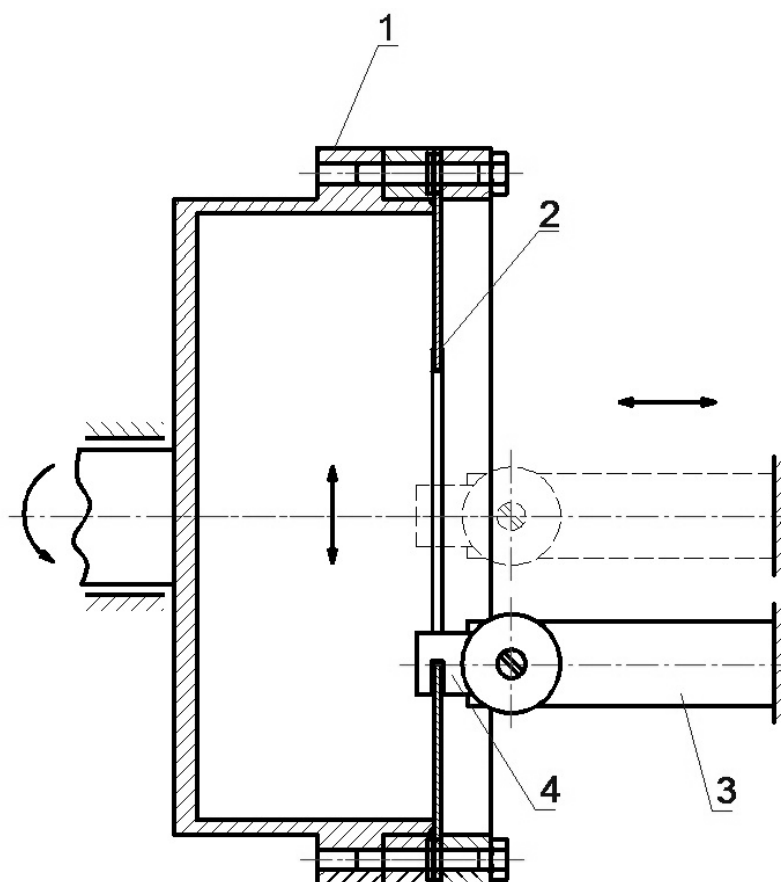
Maksimalus disko greitis ribojamas dėl vibracijos temperatūros pjovimo zonoje.

Pjovimo režimai parenkami pagal ruošinio medžiagą, jo matmenis ir atpjaunamos medžiagos storį. Pjovimo procesui charakteringa medžiagos abrazyvinė schema ir nevientisas kontaktas tarp disko ir ruošinio, tai sukelia netolygų pjovimą (mušimą).

Didinant pjovimo greitį didėja nupjautos medžiagos paviršiaus kokybė ir padidėja apdirbimo tikslumas. Paaiškinama tuo, kad sumažėja pjovimo jėgos, tuo pačiu sumažėja disko deformacijos ir atpjaunamos medžiagos nelygiagretumas, bet padidėjus špindelio apsisukimams daugiau nei 5000 aps/min atsiranda staklių vibracija ir padidėja temperatūra pjovimo zonoje, o tai turi neigiamos įtakos apdirbimo kokybei. Pjaunant su didele pastūma sumažėja pjovimo kokybė ir galimas disko įlinkimas arba jo trūkimas.

Aušinimo skystis pašalina drožles iš pjovimo zonos, taip pat aušina diską ir ruošinį. Kaip aušinimo skystis naudojamas vanduo su emulsiniais priedais. Geriausias aušinimo būdas pilant vandenį iš viršaus ant pjovimo briaunos. Aušinimo skysčio išeiga 2,5–4 l/min.

Tinkamas deimantinio disko įtvirtinimas ir pjovimo režimų parinkimas leidžia gauti atpjaunamos medžiagos paviršių be įskilimų ir subraižymų.



3.6 pav. Pjovimo schema: 1 – sukimosi būgnas; 2 – deimantinis pjovimo diskas; 3 – laikiklis; 4 – ruošinys

Pjovimas su disko deimantine vidine briauna vyksta šiuo būdu (3.6 pav.): diskas 2 tvirtinamas ant sukimosi būgno radialine kryptimi. Tai suteikia jam didesnę tvirtumą. Ruošinys 4 pritvirtintas laikiklyje 3 ir yra pjaunamas vidine disko briauna, besisukančia apie būgno ašį. Atpjaautos medžiagos krenta į ertmę būgno viduje.

Pjovimo metu atsiranda šilumos kiekiai. Įprastas disko sukimosi greitis pjaustant kietas medžiagas yra 3000–4800 aps/min, todėl diskas nuolat aušinamas aušinimo skysčiu.

3.4. Tyrimo rezultatai

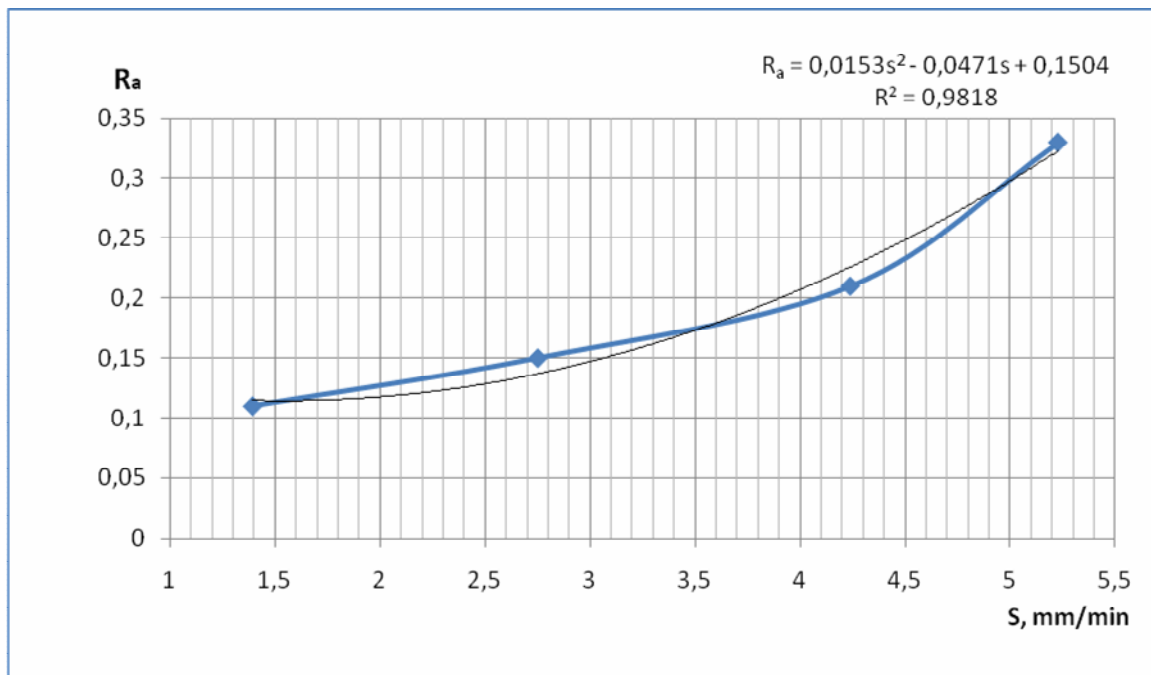
Atliekant bandymą, buvo pjaunamos dviejų rūšių kietlydinio plokštelės T14K8 ir KHT-20. Šie ruošiniai, turintys skirtingą rišamosios medžiagos kiekį, turi ir skirtingą kietumą, atsparumą lenkimui ir trapumą. Bandymus atlikome, pjaudami kietlydinius, naudodami skirtingą darbinės pastūmos greitį S ir skirtingą pjovimo greitį. Siekiant įvertinti atpjautos medžiagos paviršiaus kokybę buvo įvertinamas paviršiaus šiurkštumas, o būtent matuojamas paviršiaus vidutinio aritmetinio profilio nuokrypis R_a . Šis parametras buvo matuojamas profilometru „Talysurf 4“ (firmos „Taylor&Hobson“). Buvo matuojamas 4-ių atpjautų ruošinių šiurkštumas, toliau nustatomas aritmetinis vidurkis R_a kiekvienai pastūmos reikšmei.

Darbinė pastūma. Atliekant darbinės pastūmos įtakos tyrimą apdirbamo paviršiaus kokybei, pjaunant T14K8 ir KHT-16 kietlydinius, pjovimo disko sukimosi greitis buvo pastovus 4100 aps/min, o darbinės pastūmos greitis S buvo didinamas. Atpjovęs keturis kartus kiekvieną ruošinį, gavau šiuos šiurkštumo parametrus, pateiktus 3.1 lentelėje.

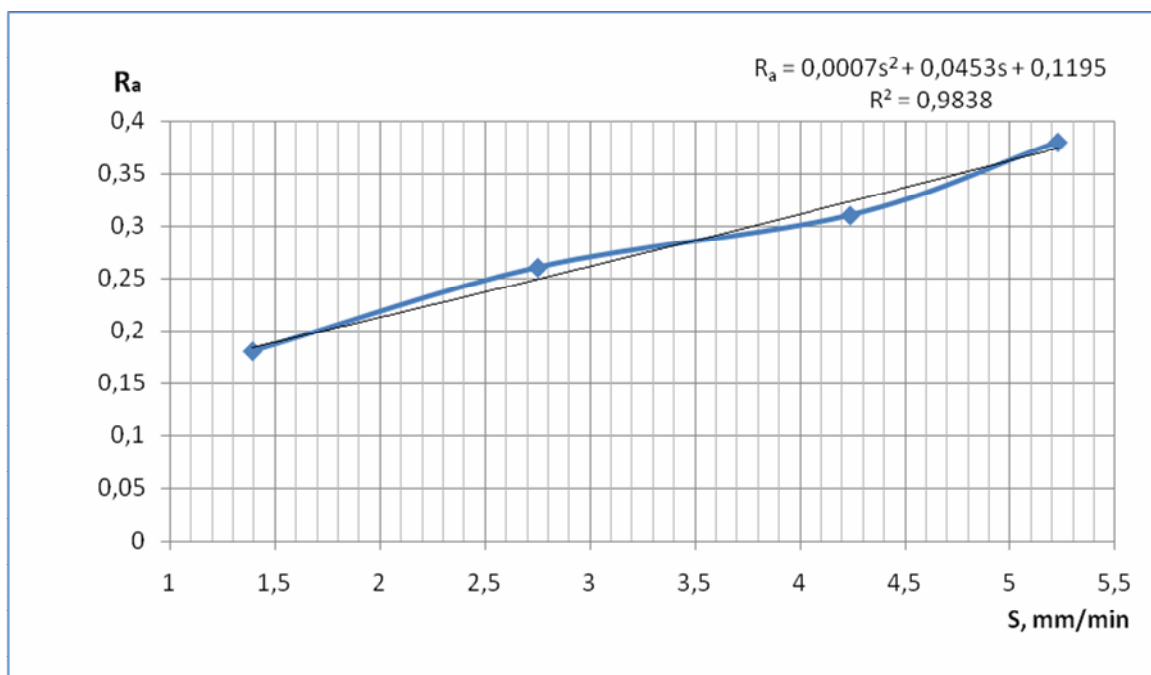
Kaip matome iš 3.7 ir 3.8 pav., paviršiaus šiurkštumas augo didėjant darbinei pastūmai. Tai atsitiko todėl, kad greičiau judant ruošiniui-mažesnis kiekis, ant disko esančių deimantinių grūdelių praėjo pro tą patį pjaunamos medžiagos plotą. Dėl šios priežasties mažiau įvyko šlifuojančių deimantinių abrazyvo grūdelių briaunų kontaktų su apdirbama medžiaga, tai ir lėmė paviršiaus šiurkštumo augimą.

3.1 lentelė. Pjovimo parametrai, didinant darbinę pastūmą

Pjaunama medžiaga: T14K8 (15x15x5)				
Pjūvio nr.	Disko sukimosi greitis, aps/min	Pastūma S, mm/min	Pjovimo greitis v, m/min	Šiurkštumas, (R _a)
1	4100	1,39	1280	0,11
2		2,75		0,15
3		4,24		0,21
4		5,23		0,33
Pjaunama medžiaga: KHT-16 (12,6x12,6x5)				
1	4100	1,39	1280	0,18
2		2,75		0,26
3		4,24		0,31
4		5,23		0,38



3.7 pav. Pastūmos įtaka T14K8 kietlydinio paviršiaus šiurkštumui



3.8 pav. Pastūmos įtaka KHT-16 kietlydinio paviršiaus šiurkštumui

Aproximavus rezultatus buvo nustatytos empirinės formulės – 2-os eilės polinamai, kurie atrodo taip:

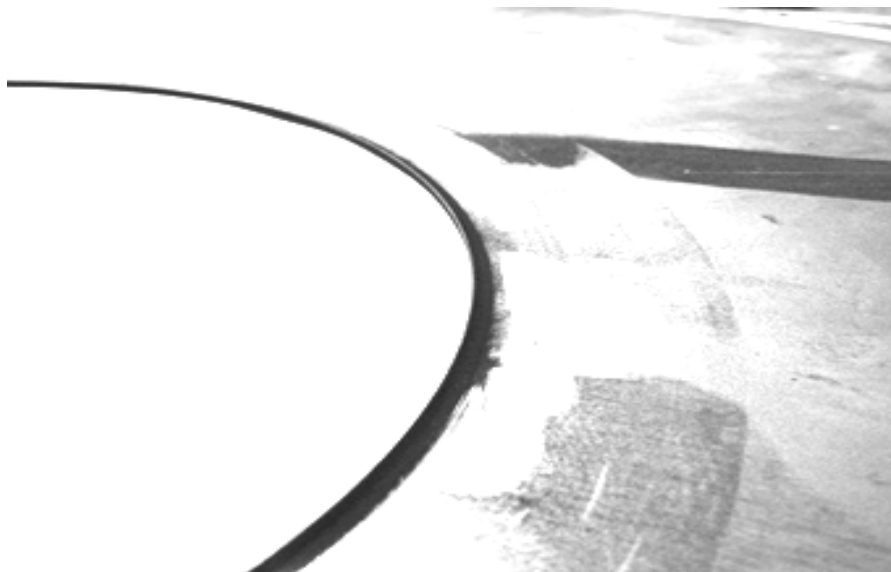
$$R_a = 0,0153s^2 - 0,0471s + 0,1504 \quad (5)$$

$$R_a = 0,0007s^2 + 0,0453s + 0,1195 \quad (6)$$

čia: R_a – vidutinis aritmetinis profilio nuokrypis, μm ; s – disko pastūmos greitis, mm/min.

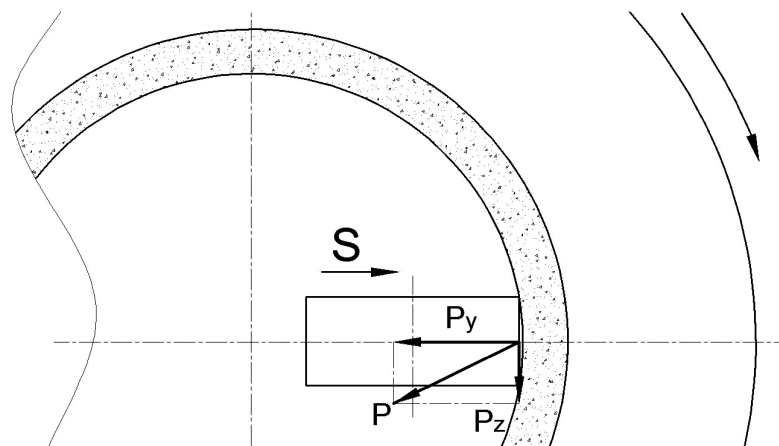
Formulė 1 gauta kietlydiniui T14K8, o formulė 2 – KHT–16. Abi formulės užtikrina aukštą aproksimacijos tikslumą – determinacijos koeficientas yra labai artimas 1 ir sudaro 0,9818 ir 0,9838 atitinkamai.

Pjaunant ruošinį ir esant mažesniai pjovimo disko sukimosi greičiui (mažiau nei 3500 aps/min), diskas nespėjo pjauti. Dėl to atsirado pjaunančiosios briaunos įlinkimas ir diskas buvo nebetinkamas tolimesnei eksploatacijai (3.9 pav.).



3.9 pav. Disko pjaunančiosios briaunos įlinkimas

Taigi, didinant darbinės pastūmos greitį, kartu padidėja ir pjovimo jėgos P_z ir P_y (3.10 pav.). Tai skatina disko deformacijas, didesnę šilumos kiekio išsiskyrimą kontakto zonoje ir mažesnę apdirbimo tikslumą.



3.10 pav. Pjovimo metu veikiančios jėgos

Pjovimo greitis. Tęsdamas bandymus, ruošinį pjoviau vienoda darbine pastūma 2,63 mm/min. Pjovimo greitis buvo didinamas nuo 1,13 iki 1,60 m/min., atsižvelgiant į tai, kad esant daugiau nei 5300 aps/min disko sukimosi greičiui, paviršiaus kokybė ir pjovimo sąlygos pablogėtų dėl staklių vibracijos. Keturis kartus atpjovęs kiekvieną ruošinį, gavau šiuos šiurkštumo parametrus, pateiktus 3.2 lentelėje ir 3.13, 3.14 paveiksluose. Pjaunant T14K8 markės kietlydinio plokšteles ir didėjant pjovimo greičiui nuo 1130 iki 1600 m/min. atpjauto paviršiaus vidutinis aritmetinis profilio nuokrypis R_a sumažėjo nuo 0,39 iki 0,12 μm , tai yra, 3,25 kartus. Pjaunant KHT-16 plokšteles ir didėjant pjovimo greičiui, R_a mažėjo nuo 0,18 iki 0,09 μm , tai yra, 2 kartus.

Kaip matome pateiktuose grafikuose (3.11 ir 3.12 pav.), paviršiaus šiurkštumas mažėjo didėjant pjovimo greičiui. Tai atsitiko todėl, kad pjaunant didesnis kiekis ant disko esančių deimantinių grūdelių praėjo pro tą patį pjaunamos medžiagos plotą. Taip pat pjovimo jėgos dedamosios P_z ir P_y , esant tokioms darbo sąlygoms, buvo mažesnės. Tai lėmė geresnes pjovimo savybes, tikslumą.

Aproksimavus rezultatus buvo nustatytos empirinės formulės – 2-os eilės polinomiali, kurie atrodo taip:

$$R_a = 1\text{E-}06v^2 - 0,0038v + 3,1618 \quad (7)$$

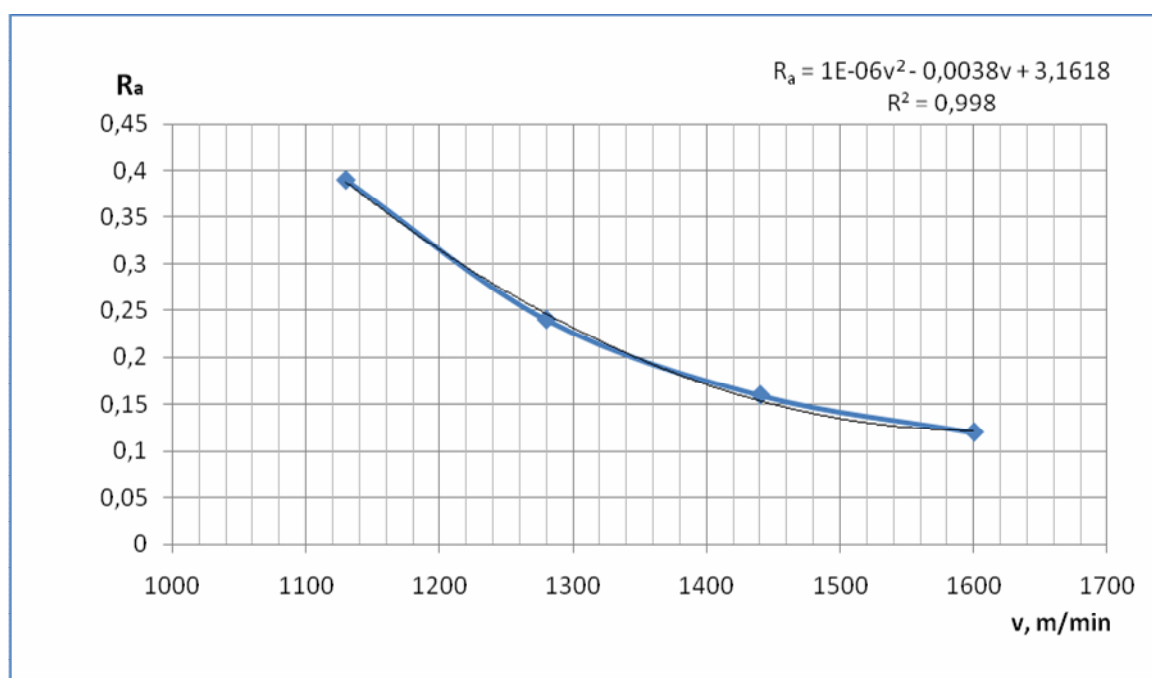
$$R_a = 2\text{E-}07v^2 - 0,0008v + 0,8008 \quad (8)$$

čia: R_a – vidutinis aritmetinis profilio nuokrypis, μm ; v – pjovimo greitis, m/min.

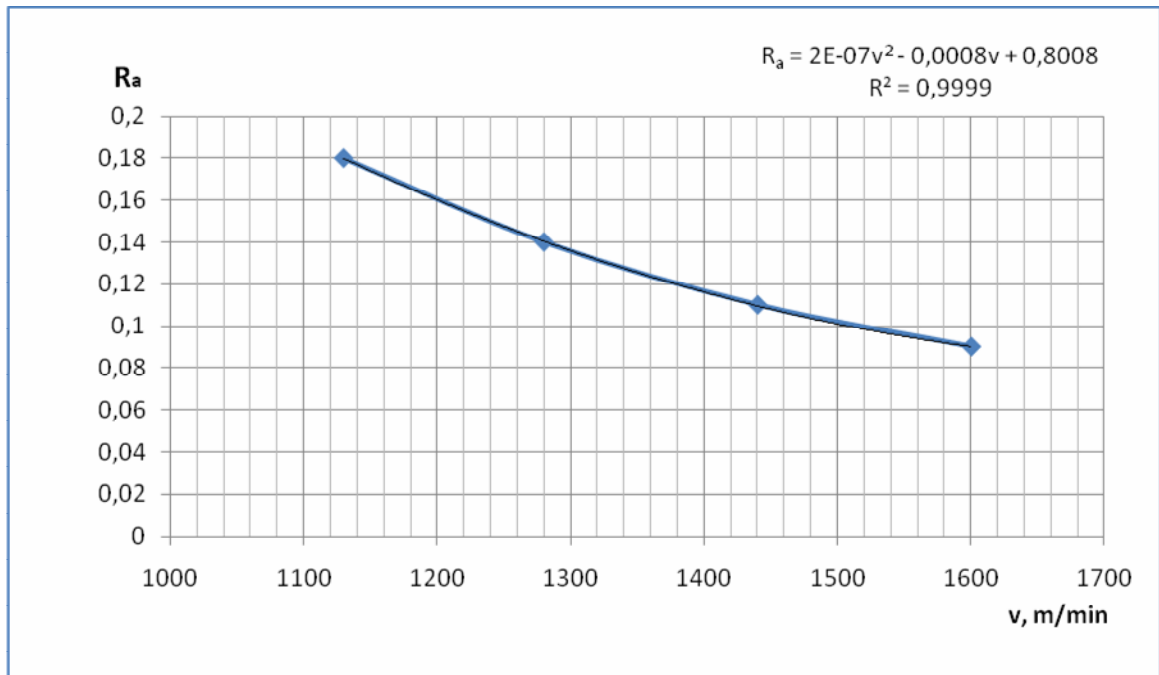
Formulė 1 gauta kietlydiniui T14K8, o formulė 2 – KHT–16. Abi formulės užtikrina aukštą aproksimacijos tikslumą – determinacijos koeficientas yra labai artimas 1 ir sudaro 0,998 ir 0,9999 atitinkamai.

3.2 lentelė. Pjovimo parametrai, didinant pjovimo greitį

Pjaunama medžiaga: T14K8 (15x15x5)				
Pjūvio nr.	Disko sukimosi greitis, aps/min	Pastūma S, mm/min	Pjovimo greitis v, m/min	Šiurkštumas, (R _a)
1	3600	2,63	1130	0,39
2	4100		1280	0,24
3	4600		1440	0,16
4	5100		1600	0,12
Pjaunama medžiaga: KHT-16 (12,6x12,6x5)				
1	3600	2,63	1130	0,18
2	4100		1280	0,14
3	4600		1440	0,11
4	5100		1600	0,09



3.11 pav. Pjovimo greičio įtaka T14K8 kietlydinio paviršiaus šiurkštumui



3.12 pav. Pjovimo greičio įtaka KHT-16 kietlydinio paviršiaus šiurkštumui

Atpjovus keletą volframo kietlydinio ruošinių, šiurkštumas turėjo polinkį didėti sparčiau nei tolygiai. Pjaunant bevolframį kietlydinį, šiurkštumas, didėjant pastūmai arba pjovimo greičiui, augo beveik tolygiai. Bevolframiai kietlydiniai yra gerokai trapesni ir jų atsparumas lenkimui yra beveik dvigubai mažesnis už volframinio kietlydinio. Tokio reiškinių priežastimi gali būti disko šoninio deimantinio sluoksnio užsivėlimas volframo kietlydinio rišamąja medžiaga – kobaltu.

Tai vaizdžiai matyti (3.13 pav.) parodytoje disko briaunoje, po vienodo volframo kietlydinio T14K8 pjovimų skaičiaus. Iš to galime spręsti, kad pjovimas yra efektyvesnis pjaunant kietesnes ir trapesnes medžiagas. Spėjama, kad rezultatai galėtų būti ir geresni pjaunant kietlydinius, turinčius mažiau kobalto (pavyzdžiui, 2 %) savo sudėtyje, tačiau tai jau tolimesnių tyrimų objektas.



3.13 pav. Disko apsivėlimas pjaunant volframinį T14K8 kietlydinį

IŠVADOS

Atlikdamas šį darbą, tyriau itin kietų medžiagų pjovimo galimybes deimantiniais įrankiais. Tyrimo metu atlikau volframinų ir nevolframinų kietlydinių T14K8 ir KHT-16 pjovimą vidine deimantinio disko briauna, pasinaudodamas staklėmis „Almaz-4“. Apžvelgęs pjovimo sąlygas, pjovimo režimų įtaką atpjauto ruošinio paviršiaus kokybei, nustaciau optimalius pjovimo režimus pjaustant labai kietas medžiagas. Atsižvelgdamas į gautus rezultatus, priėjau prie šių išvadų:

- o Didinant darbinę pastūmą – didėja apdirbamo paviršiaus šiurkštumas. Pjaunant volframinus kietlydinius numatytais režimais, vidutinis aritmetinis paviršiaus profilio nuokrypis R_a augo nuo 0,11 iki 0,33 μm . Pjaunant nevolframinus kietlydinius, šiurkštumas R_a augo nuo 0,18 iki 0,38 μm .
- o Didinant pjovimo greitį – kartu didėja pjaunamo paviršiaus kokybė. Pjaunant volframinus kietlydinius numatytais režimais, vidutinis aritmetinis paviršiaus profilio nuokrypis R_a mažėjo nuo 0,39 iki 0,12 μm . Pjaunant nevolframinus kietlydinius, šiurkštumas R_a mažėjo nuo 0,18 iki 0,09 μm .
- o Mažiausias vidutinio aritmetinio paviršiaus profilio nuokrypio R_a pokytis vyko pjaunant bevolframį kietlydinį KHT–16.
- o Pjaunant volframinus kietlydinius, paviršiaus šiurkštumas turėjo polinkį augti labiau nei pjaunant nevolframinus. Netolygus šiurkštumo augimas, pjaunant volframinus kietlydinius, susijęs su pjovimo disko deimantinio sluoksnio užsivėlimu pjaunamo ruošinio rišančiąja medžiaga.
- o Geriausios pjovimo sąlygos yra pjaunant kietesnes ir trapesnes, lenkimui mažiau atsparias medžiagas.

LITERATŪRA

1. Ahsan Ali Khan, Mohd Efendee Bin Awang and Ahmad Azwari Bin Annuar. 2005. Surface Roughness of Carbides Produced by Abrasive Water Jet Machining. Journal of Applied Sciences 5 (10): 1757-1761, 2005 ISSN
2. Christman, T. and Needleman, A. 1989. An experimental and numerical study of deformation in metal-ceramic composites. acta metall. Vol. 37, pp. 3029-3050.
3. Bražiūnas A.J. *Mašinų gamybos technologijos pagrindai*. Kaunas: Technologija, 2004. 512p.
4. Kulikauskas L. *Medžiagotyra: konstrukcines medžiagos*. Vilnius: Žara, 1997. 510p.
5. Vekteris V., Kasparaitis A., Kauslnis S., Kanapenas R., Matavimų teorija ir praktika. Vilnius 2000. 380p.
6. Whitehouse D.J. *Surfaces and Theis Measurment*. Hermes Penton Ltd., 2002. 395p.
7. CHANG-XUE (JACK) FENG, XIANFENG (DAVID) WANG, ZHIGUANG (SAMUEL) YU. *Neural Networks Modeling of Honing Surface Roughness Parameters Defined by ISO J3565*. SME Journal of Manufacturing Systems. Vol. 21, No. 5, 2002.
8. Klaasen H., Kobarsepp J., Sergejev F., Traksma R. Performance of Cemented Carbides in Cyclic Loading Conditions. Materials science. Vol. 12, No. 2.
9. Kriogeninis pjaustymas. http://rtn.elektronika.lt/rtn/0401/zin_elektronika.html.
10. Pjovimo vandens srove technologija. <http://www.asa.lt/cgi-bin/sna.cgi?grp=801>.
11. Оборудование для резки пластин.
http://works.tarefer.ru/82/100535/index.html#_Toc40335845.
12. Оборудование для обработки полупроводниковых материалов.
<http://www.avometr.ru/articles.php?st=3&ar=11>.
13. The exhibition “Diamond-75”.
<http://www.springerlink.com/content/wg26022542354513/>.
14. Полтавский алмазный инструмент.
<http://www.poltavadiamond.com.ua/ru/site/content/>.
15. *Explanation of Surface Charakteristics and Standarts*. ACCKETECU TOKYO SEIM1TSU. <http://www.accretech.jp/products-en/measuring>.
16. ПАЛЕИ М.А., МАРКОВ Н.Н. и др. *Единая система допусков и посадок СЭВ в машиностроении и приборостроении: справочник в 2т. Том 2: Контроль деталей*. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Издательство стандартов, 1989. 208 р.
17. ПАШКЕВИЧ М.Ф., ЖОЛОБОВ А.А., МРОЧЕК Ж.А., КОЖУРО Л.М., ПАШКЕВИЧ В.М.; *Исследования и изобретательство в машиностроении*. Под общ. Ред. М.Ф.ПАШКЕВИЧА. Мн.: Адукацыя і выхаванне, 2005. 287 р.

PRIEDAI