

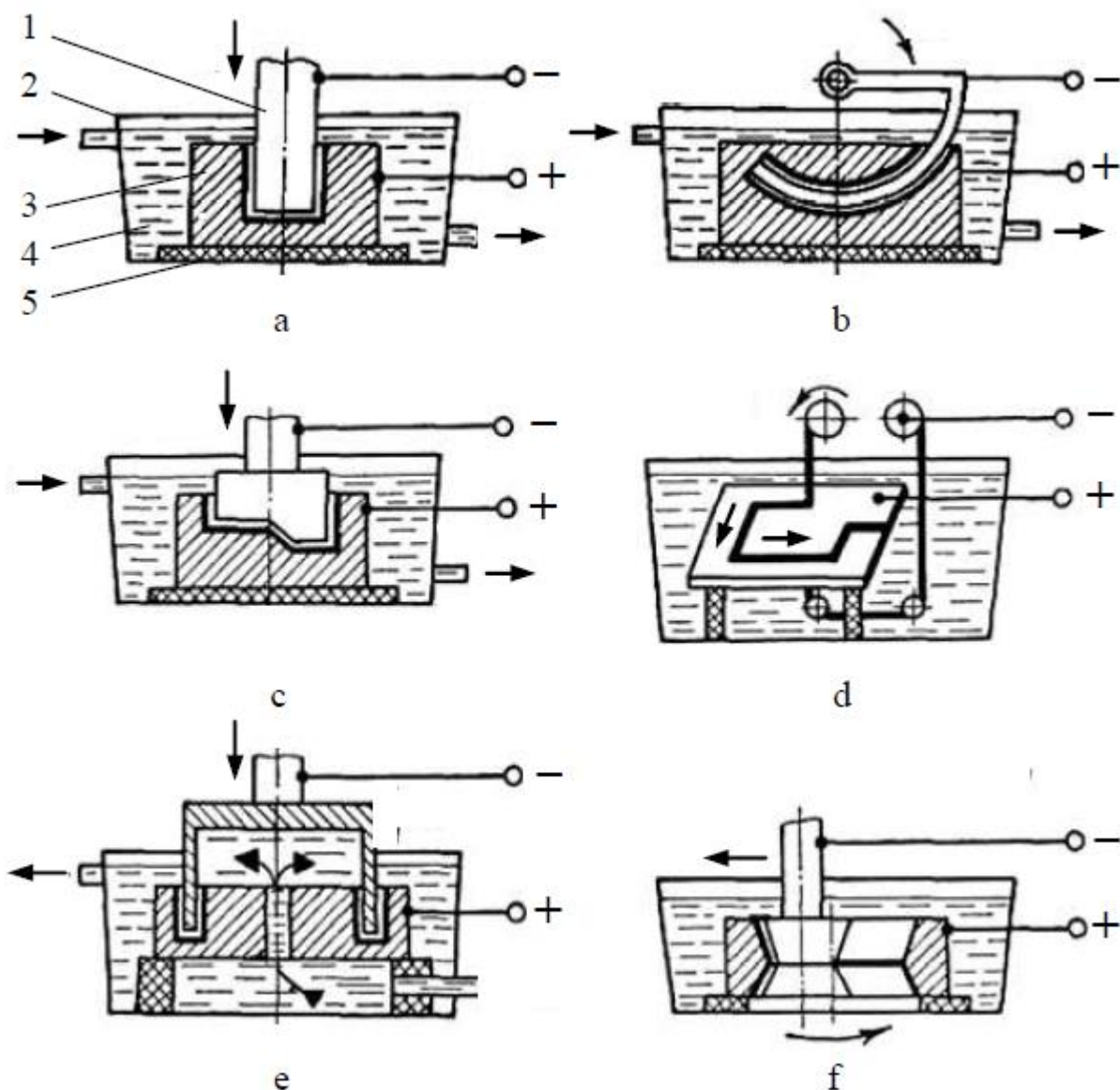
Elektrofiziniai ir elektrocheminiai apdirbimo būdai

5.3. Elektrokibirkštinis apdirbimas

Elektrokibirkštinis apdirbimas (*EKA*) yra vienas iš daugelio procesų, kuriame naudojama termoelektrinė energija tam tikrai ruošinio medžiagos daliai išlydyti arba išgarinti.

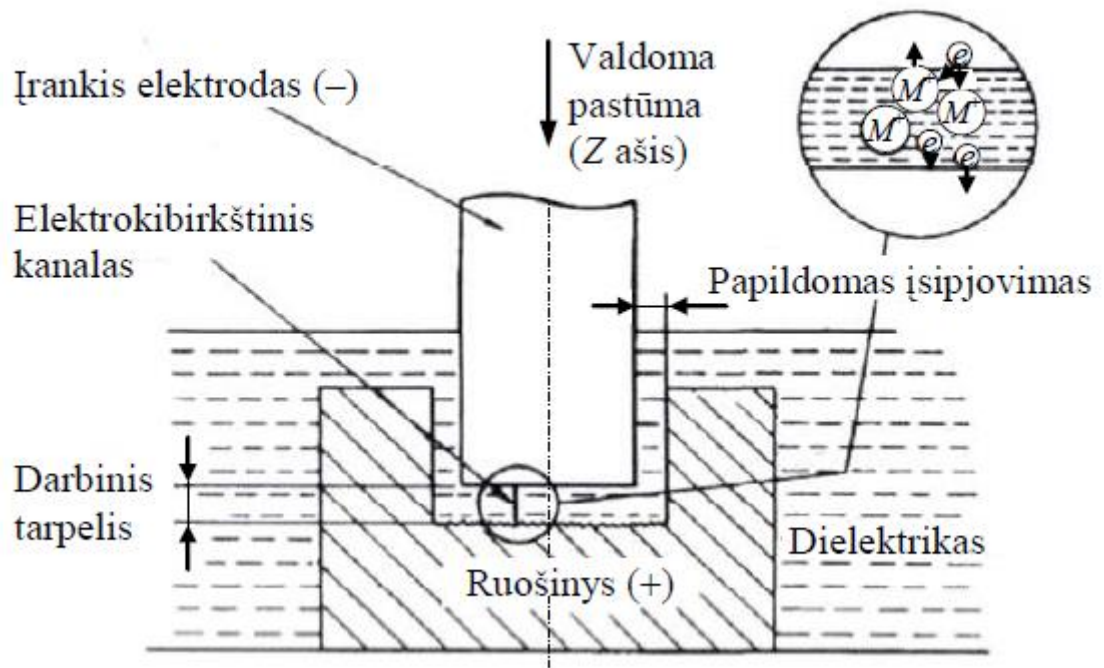
Pagrindiniai *EKA* principai. Elektrokibirkštinio apdirbimo būdu (naudojant valdomą aukštojo dažnio elektrinę iškrovą ruošinio medžiagai išlydyti reikiamoje vietoje) apdirbamos skylės, išoriniai fasoniniai paviršiai ir įdubos (5.15 pav.). Šiuo būdu galima išpjauti ruošinius iš lakšto, naudojant vielinį arba juostinį elektrodą, atlikti plokščiąjį, apvalųjį ir vidinį šlifavimą, pjaustyti ruošinius, ženklinti ir kt. Apdirbant apvalias skyles, elektrodas gali būti sukamas apie savo ašį.

Elektrinė iškrova (impulsinis kibirkštinis išlydis) vyksta dielektriniame skystyje tarp įrankio elektrodo (katodo) ir elektriškai laidžios ruošinio medžiagos (anodo), kai tarp jų praleidžiama impulsinė elektros srovė. *EKA* metu į dielektrinį skystį (parafiną, vaitspiritą, mineralinę alyvą) panardintą įrankį nuo ruošinio skiria mažas tarpelis (0,01–0,5 mm). Iškrovai tarp elektrodų dielektriniame skystyje suformuoti naudojama įtampa viršija tarpelio pramušimo įtampą (priklauso nuo tarpelio dydžio ir dielektrinio skysčio izoliacinių savybių). Tarp elektrodų įkaitusios dujos jonizuojasi ir virsta plazma (8000–12000 °C temperatūroje jonizuotos dujos), susidedančia iš metalo atomų M (išgarintų tiek iš ruošinio, tiek iš įrankio elektrodo) teigiamų jonų M^+ ir elektronų e (5.16 pav.). Staigiai išgarinant suformuojamas didelio slėgio burbuliukas, kuris dielektrike didėja radialine kryptimi. Tarp elektrodų susidaro laidumo kanalas. Juo elektros energija išsikrauna impulsinės kibirkšties pavidalu. Apdirbimo metu masyvus elektros srautas sukelia metalo dalelių eroziją. Aukštoje temperatūroje išsilydo nuimamo metalo tūris, dalis jo išgaruoja. Apdirbamame paviršiuje susidaro įduba. Po iškrovos tarpelyje esantis dielektrikas išlaiko savo izoliacines savybes ir dar kartą jonizuojasi. Nepertraukiamai generuojant kibirkštį, toliau šalinamas metalas, kol atstumas tarp elektrodų yra toks, kad esant tam tikrai įtampai, dar galima elektrinė iškrova. Kad vyktų apdirbimo procesas, reikia išlaikyti pastovų atstumą tarp elektrodų (suartinti). Tai automatiškai atlieka speciali sekimo sistema. Iškrova nutrūksta nutraukus elektros srovę. Iš apdirbamo ruošinio pašalintas metalas sukietėja ir sudaro rutulio formos daleles (0,01–0,005 mm) dielektriko suspensijos pavidalu. Dalelių nuosėdos susikaupia tarpelyje ir iš jo pašalinamos iškrovos metu. Šios nuosėdos dielektriko suspensijoje lieka tol, kol dielektrinis skystis iš rezervuaro išsiurbiamas į kitą rezervuarą, kuriame nusodinami erozijos produktai. Paskui dielektrinis skystis per filtrą grąžinamas atgal į darbo zoną.



5.15 pav. Elektrokibirkštinio apdirbimo schemas: *a* – skylių formavimas; *b* – skylės su kreiva ašimi formavimas; *c* – šampo fasoninės ertmės apdirbimas; *d* – ruošinio išpjovimas iš lakšto; *e* – skylės suformavimas (trepanavimas); *f* – filjerės vidinio paviršiaus šlifavimas; 1 – įrankis elektrodas (–); 2 – rezervuaras; 3 – ruošinys (□); 4 – dielektrinis skystis; 5 – izoliatorius

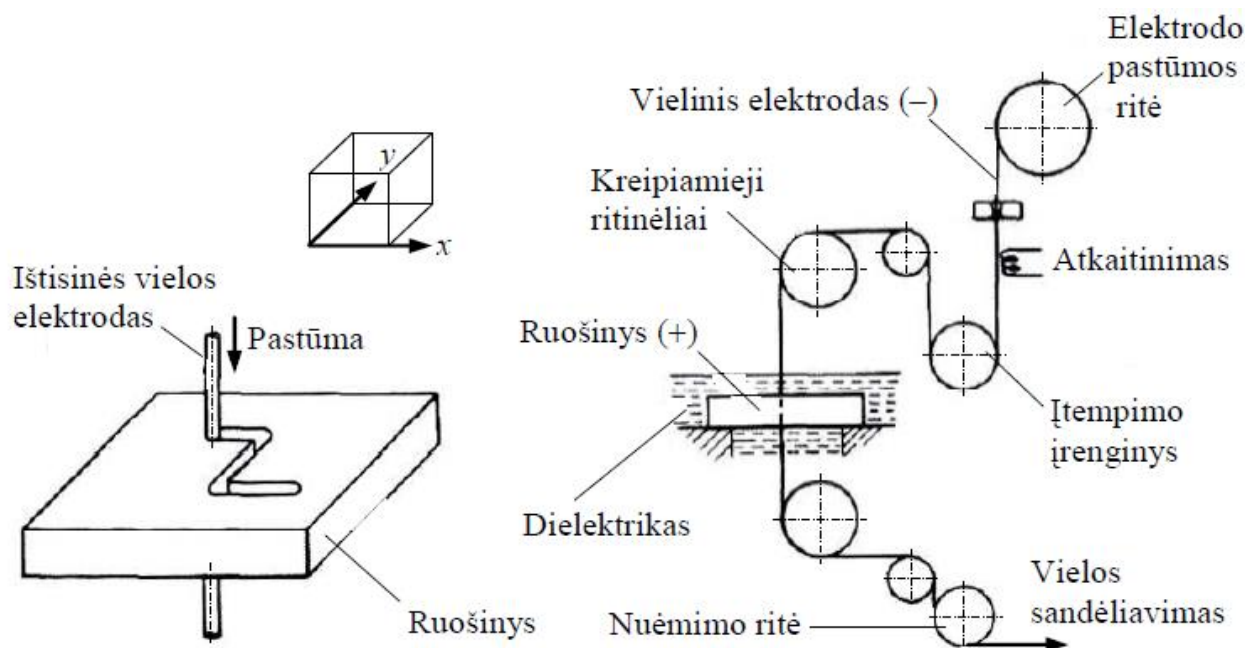
Ruošinio mechaninės charakteristikos (kietis ir tįsumas), nuo kurių priklauso medžiagos apdirbamumas, *EKA* procesui įtakos neturi, kadangi metalas šalinamas jį išgarinant. Nuo įrankio ir ruošinio nuimamas nevienodas medžiagos kiekis. Jis priklauso nuo poliškumo, šiluminio laidumo, medžiagų lydymosi temperatūros, iškrovos trukmės ir intensyvumo. Tinkamai parinkus šiuos parametrus, ruošinio eroziją galima suintensyvinti, o įrankio sulėtinti.



5.16 pav. Elektrokibirkštinio apdirbimo principas

Sudėtingiems fasoniniams paviršiams sudaryti naudojamas vielinis elektrodas (5.17 pav.). Juo sudaromos traukimo arba štapavimo puansonų ir matricų išėmos. Vielinis elektrodas (0,25 mm skersmens) tiekiamas iš ritės, ant kurios suvyniota tiek vielos, kad būtų galima dirbti 24 valandas 0,1–8,0 m/min greičiu. Norint suformuoti labai tikslias išėmas, viela kalibruojama. Kalibruojant vielos skersmuo sumažinamas iki 0,015 mm. Po to viela atkaitinama ir nukreipiama į įrenginį, kuris stabilizuoja jos įtempimą 5–10 N jėga. EKA metu kaip dielektrikas naudojamas jonizuotas vanduo.

Elektrodas gali būti pasviręs $1,5^\circ$ kampu statmens į apdirbamą paviršių atžvilgiu, kad tarp elektrodo ir apdirbamo puansono (ar matricos) fasoninio profilio paviršiaus būtų tarpelis. Kreipiamųjų pastūmos x ir y ašių kryptimis programiškai valdomos kaip ir įprastinėse programinėse staklėse.



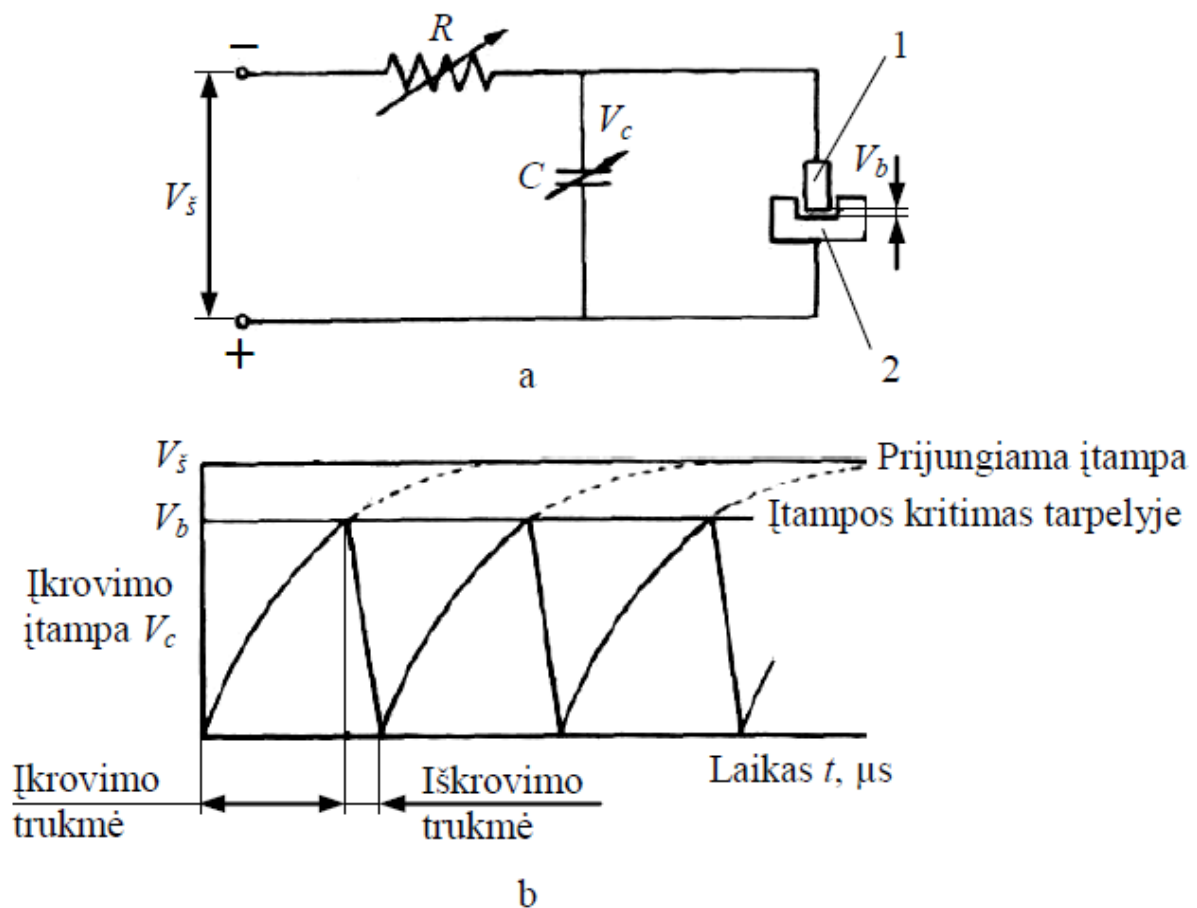
5.17 pav. Vielinio elektrodo perstūmimo schema

Kibirkštį generuojančios grandinės. Elektroerozinio apdirbimo metu nuo ruošinio nuimant metalą, elektrokibirkštinėse staklėse būtina generuoti kibirkštį optimalioms apdirbimo sąlygoms sudaryti. Šie reikalavimai patenkinami prijungiant atitinkamą įtampą, leidžiančią pradėti ir palaikyti iškrovo procesą. Būtina sistema šios iškrovo intensyvumui, trukmei ir ciklams valdyti. Paprastai tai apima 2–1600 μ s laiko intervalą.

Dažniausiai naudojamos kibirkštį generuojančios grandinės: Relaksacinė (RC) grandinė. Varžos ir talpos (RC) grandinė yra viena iš dažniausiai naudojamų grandinių (5.18 pav.). Ji yra paprasta, patikima ir garantuoja gerą apdirbto paviršiaus kokybę. *Trūkumai:* iškrovo vyksta esant aukštai įtampai, todėl gerokai sunkėja jos valdymas, nuimama mažai metalo, intensyviai dyla elektrodas.

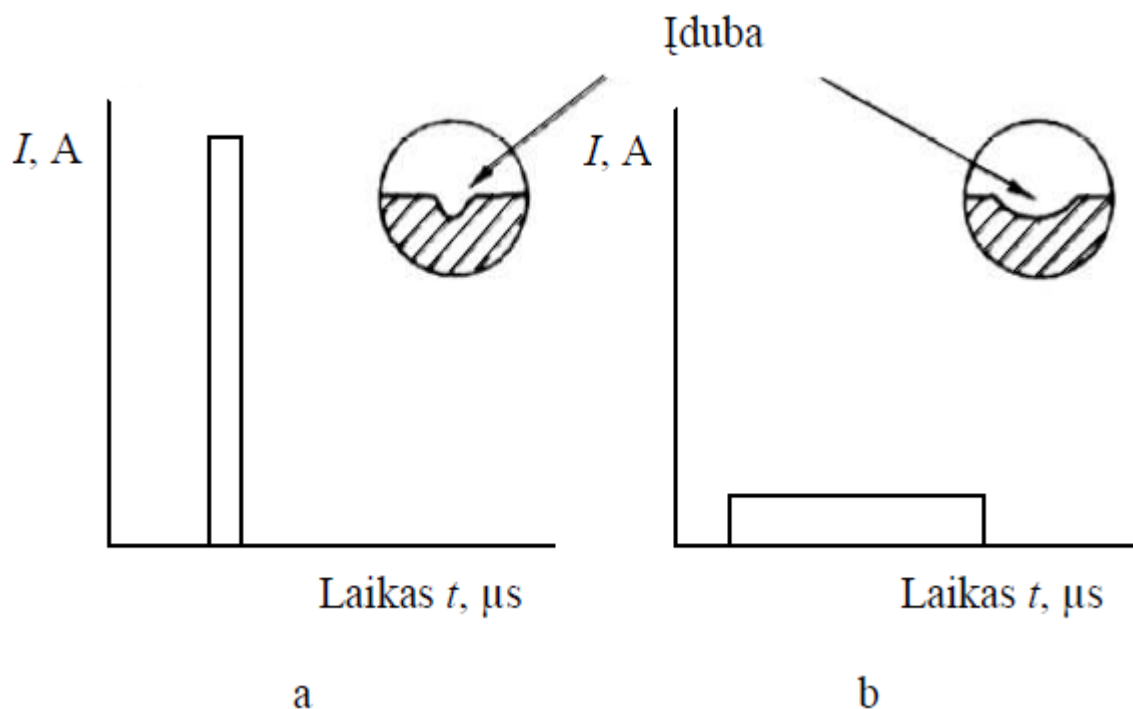
Pradedant operaciją, kondensatorius yra iškrautas. Jis per reostatą įsikrauna iš nuolatinės srovės šaltinio ir tarp elektrodo ir detalės sudaroma reikiama pramušimo įtampa. Kai kondensatoriaus V_c pasiekia įtampos V_b kritimo lygį darbiniam tarpelyje, praleidžiant srovę per tarpelį kondensatorius išsikrauna ir metalo dalelė atskiriama nuo ruošinio. Kibirkštis nėra nusistovėjusi, nes kondensatorius išsikrauna greičiau nei gali įsikrauti. Ciklas nuosekliai kartojasi, kol baigiama operacija.

Kuo didesnė V_b vertė nuolatinės srovės šaltinio $V_{\text{š}}$ atžvilgiu, tuo didesnė iškrovo energija (iškrovo energija, o kartu ir nuimamo metalo kiekis didėja didinant kondensatoriaus talpą). Optimali V_b vertė, nuimant didesnius metalo kiekius, sudaro apie 73 % $V_{\text{š}}$. Maitinimo įtampa siekia 200–400 V. Didinant varžą, ilgėja iškrovo trukmė ir erozijos ciklas.



5.18 pav. EKA schema: a – relaksacinė (RC) grandinė; b – priklausomybė tarp įkrovimo įtampos ir laiko: 1 – įrankis elektrodas (–); 2 – ruošinys, C – kondensatorius; R – varža; V_s – nuolatinės srovės šaltinio įtampa; V_c – kondensatoriaus įkrovimo įtampa; V_b – įtampos kritimas tarpelyje

Tranzistorinė impulsų generavimo grandinė. Atskirų parametrų tarpusavio priklausomybė, ribotas elektrodo medžiagų asortimentas ir jų intensyvus dilimas yra didžiausi RC grandinių trūkumai. Pradėjus naudoti puslaidininkius, buvo galima patobulinti impulsų generatorius, patogiau tapo valdyti iškrovos dažnį ir energiją. Be to, šių įrenginių maitinimo įtampa sumažėjo iki 60–80V, todėl gaunamos žemesnės iškrovos charakteristikos (5.19 pav.), o kartu iškrovos metu suformuojama seklesnė ir platesnė įduba. Tranzistoriniai impulsų generatoriai įgalina nuimti didelius metalo kiekius ir sumažinti elektrodo dilimo intensyvumą.



5.19 pav. Srovės charakteristikos tarpelyje ir tos pačios galios iškrovų palyginimas: *a* – relaksacinėje grandinėje; *b* – tranzistorinėje grandinėje

Išjungimo laiko pakanka dielektriniam skysčiui dejonizuoti ir teršalams pašalinti iš jo. Iškvos energijos pastovumas leidžia gerokai padidinti apdirbimo efektyvumą. Didesniems metalo kiekiam nuimti ir paviršiui geriau apdirbti daugelis staklių turi dviejų tipų elektros impulsų generavimo grandines – relaksacines ir impulsines.

Įrankis elektrodas. Kiekviena elektrai laidži medžiaga gali būti panaudota kaip įrankis elektrodas. Jis turi būti standus, pasižymėti nedidele santykinė elektrine varža, aukšta lydymosi temperatūra (nuo jos priklauso elektrodo atsparumas dilimui) ir kt. Praktikoje atsižvelgiama į kainą, dilimo intensyvumą (įrankio dilimo intensyvumą numatyti sunku), pagaminimo galimybes, prieinamumą (galimybę gauti), galimybę nuimti reikiamą metalo kiekį, apdirbto paviršiaus kokybę, pakeitimo išlaidas ir kt.

Įrankiai elektrodai gali būti gaminami iš įvairių elektrai laidžių medžiagų: žalvario, vario, grafito, volframo, molibdeno, aliuminio, plieno ir kt.

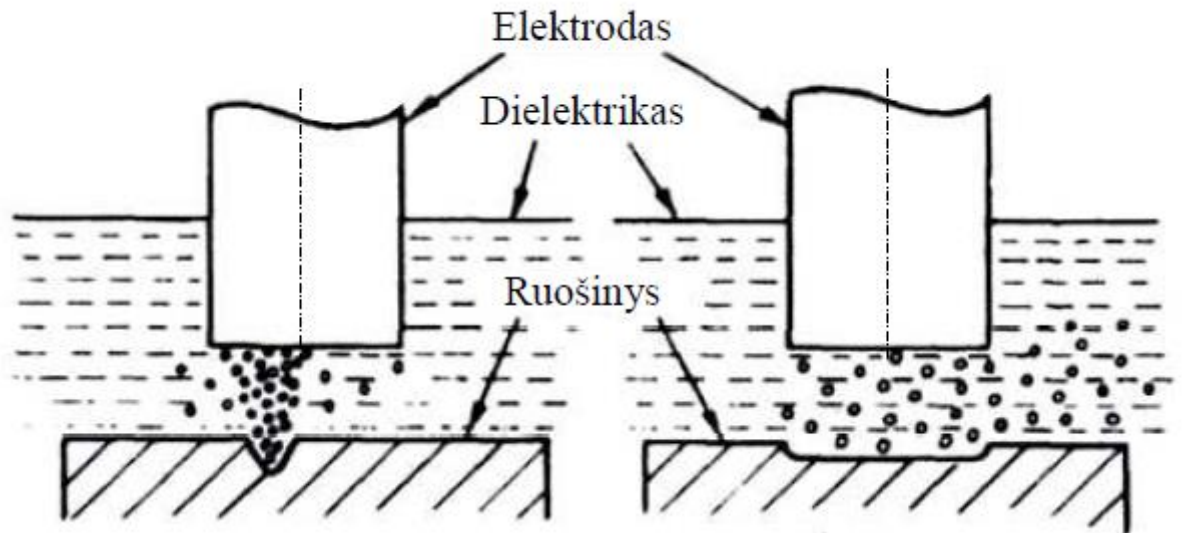
Dielektrinis skystis. Dielektrinis skystis sudaro būtinas sąlygas iškvos atsirasti, aušina elektrodus ir erozijos produktus, iš tarpelio pašalina nepageidaujamus komponentus, sumažina šonines elektrines iškvos tarp įrankio ir ruošinio, dėl to tiksliau apdirbama. Skystis turi būti nebrangus, nelabai klampus (gerai tekėti), užsiliepsnoti tik aukštoje temperatūroje (žema skysčio virimo temperatūra riboja nupjaunamo metalo kiekį), būti netoksiškas, nesukelti korozijos, pasižymėti pakankamu dielektriniu atsparumu ir kt.

Dažniausiai naudojami šie dielektriniai skysčiai: hidrokarbonatai, etileno glikolio vandens mišiniai, dejonizuotas vanduo. Iš šių skysčių dažniausiai naudojami hidrokarbonatai, kurie klasifikuojami pagal klampą (5.1 lentelė). Baigiamosiose operacijose geram tekėjimui mažame darbiname tarpelyje užtikrinti naudojami mažesnės klampos skysčiai. Paruošiamosiose operacijose, kai nuimama daugiau metalo, darbinis tarpelis yra didesnis, todėl naudojami klampesni skysčiai.

5.1 lentelė. Hidrokarbonatiniai dielektrikai

Dielektrinis skystis	Užsiliepsnojimo temperatūra, °C	Savybės ir panaudojimas
Vaitspiritas	40	Mažos klampos dielektrikas. Naudojamas nedidelės apimties darbams, kai nupjaunami nedideli metalo kiekiai ir yra maži tarpeliai, esant mažiems nuokrypams, aštrioms briaunoms, pvz., šampavimo įrankių gamybai ir kt.
Parafinas	50	Gerų savybių dielektrikas, nebrangus. Naudojamas vidutinės apimties darbams, pvz., plastmasių liejimo formų, šampavimo įrankių, puansonų gamybai ir kt.
Skysta alyva	130	Naudojama didelės galios elektrokibirkštinėse staklėse, esant sudėtingesniai filtravimui; didelės apimties darbams, paruošiamajam apdirbimui, pvz., tūrinių šampų gamybai

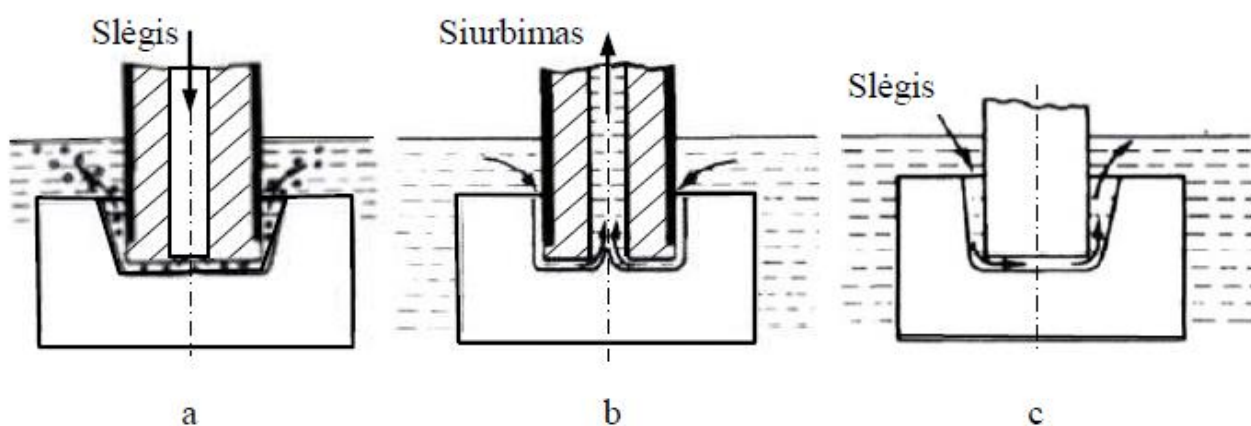
Cirkuliacinės sistemos. Elektrokibirkštinėse staklėse labai svarbu užtikrinti gerą skysčio cirkuliaciją ir filtravimą. Apdirbimo pradžioje naujas dielektrikas būna švarus, todėl pasižymi geresnėmis izoliacinėmis savybėmis nei turintis nuosėdų. Prasidėjus elektros iškrovai, susidariusios nuosėdos pablogina skysčio dielektrines savybes tarpelyje tarp įrankio ir ruošinio. Jei šių nuosėdų per daug, susidaro „tiltas“, kuris trukdo elektros lankui susidaryti tarpelyje tarp įrankio ir ruošinio. Todėl, norint sudaryti optimalias darbo sąlygas, turi būti kontroliuojamas tarpelio užterštumo laipsnis (5.20 pav.).



5.20 pav. Darbinio tarpelio užteršimas nuosėdomis

Nuosėdoms iš tarpelio pašalinti naudojami būdai:

- Išpurškiamoji srovė (5.21 pav., *a*). Apdirbamos ertmės šoniniai paviršiai įgauna kūgio formą dėl šoninės iškrovos, kuri atsiranda kylant nuosėdų dalelėms šalia įrankio šoninio paviršiaus.
- Įsiurbiamoji srovė (5.21 pav., *b*). Apdirbamos detalės šoniniuose paviršiuose nesusidaro kūgis, nes šalia elektrodo neatsiranda nuosėdų. Šiuo būdu paviršiai apdirbami efektyviau.
- Šoninė srovė (5.21 pav., *c*).



5.21 pav. Nuosėdų iš tarpelio pašalinimas: *a* – išpurškiamąja srove; *b* – įsiurbiamąja srove; *c* – šonine srove

Paviršiaus struktūra. Kadangi iškrovos temperatūra yra aukšta (8000–12000 °C), ji gali paveikti (sukietinti, suminkštinti) kai kurių apdirbamų detalių paviršinius sluoksnius. Terminiškai

paveikto sluoksnio storis priklauso nuo apdirbamos medžiagos ir iškrovos charakteristikų. Baigiamosiose operacijose termiškai paveikto sluoksnio storis neviršija 0,002 mm, o paruošiamojo apdirbimo operacijose gali būti iki 0,2 mm.

Elektrokibirkštinio apdirbimo ypatumai:

- *Nuimamo metalo tūris.* Dažniausiai nuimama 1 mm³/s metalo. Jei paruošiamosiose arba baigiamosiose operacijose apdirbami nevienodi paviršių plotai ir naudojamos skirtingos galios, nuimamo metalo tūris gali kisti nuo 0,01 iki 150 mm³/s (naudojant skirtingus ruošinius ir skirtingus elektrodus).
- *Apdirbimo užlaida.* Nuimama 0,005–0,2 mm užlaida šonui. Minimalus suapvalinimo spindulys lygus užlaidos dydžiui.
- *Kūgiškumas.* Gaunamas 0,05–0,5 mm kūgiškumas 100 mm ilgyje.
- *Ruošinio tikslumas.* Apdirbtos detalės matmenų nuokrypiai siekia $\pm(0,05-0,15)$ mm. Tobulinant proceso valdymą, galima pasiekti $\pm(0,005-0,01)$ mm nuokrypius.
- *Paviršiaus kokybė.* Apdirbto paviršiaus šiurkštumas $Ra = 1-2$ μm . Galima pasiekti $Ra=0,25-1,1$ μm .

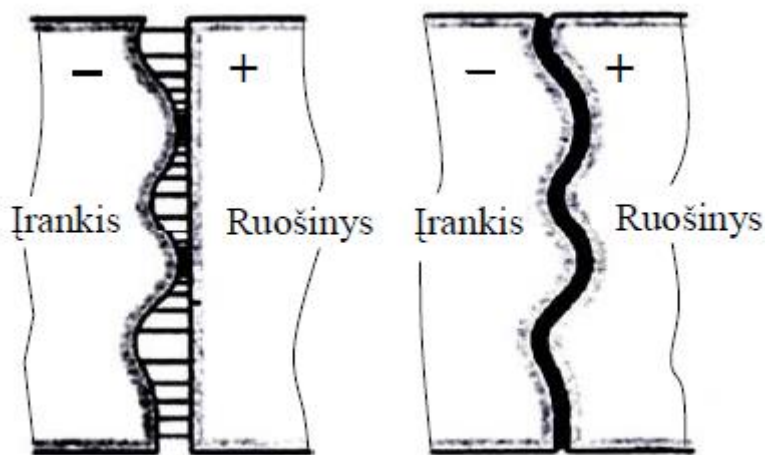
Elektrokibirkštiniu būdu apdirbamos įvairios elektrai laidžios medžiagos, bet tikslingiausia šiuo būdu apdirbti kietlydinius, tantalą, volframą, molibdeną, sunkiai pjaunamus metalus ir jų lydinius. EKA būdas plačiai naudojamas šampams, presformoms, filjerėms, vidaus degimo variklių detalėms, pjovimo įrankiams gaminti ir kt.

Taikant atvirkščią poliškumą (ruošinys yra katodas, įrankis – anodas), didelės trukmės (lankinis išlydis) impulsais intensyviau ardomas katodas. Šis elektroerozinis apdirbimo būdas vadinamas elektroimpulsiniu apdirbimu. Iškrovai gauti naudojamas nuolatinės srovės impulsinis generatorius.

5.4. Elektrocheminis apdirbimas

Elektrocheminio apdirbimo (ECA) technologija pagrįsta anodo (ruošinio) tirpimu praleidžiant nuolatinę elektros srovę elektrolitu (vykstant elektrolizei). Proceso metu ruošinys tirpsta todėl, kad jo paviršiuje vyksta cheminės reakcijos ir paviršinis metalo sluoksnis virsta cheminiais junginiais. Pašalinamam nuo anodo metalo sluoksniui (dalelėms) neleidžiama nusėsti ant katodo (įrankio) ir jis nuplaunamas elektrolito srove.

ECA technologijoje ruošinys apdirbamas tik elektrolizės būdu. Jo apdirbimas priklauso nuo įrankio formos ir judėjimo. Didžiausias srovės tankis (ir didžiausia metalo apdirbimo sparta) pasiekiamas įrankio viršūnėse, kur mažiausias atstumas iki ruošinio (5.22 pav.). Vėliau metalo šalinimo ruošinio paviršiuje sparta suvienodėja.



5.22 pav. Elektrocheminio apdirbimo principas

Privalumai: procesas labai našus (nepriklausomai nuo detalės kiekio ir fizikinių savybių galima pasiekti 10–20 cm³/min metalo šalinimo spartą), elektrocheminiu būdu apdirbtose detalėse nėra vidinių įtempių ar temperatūrinių pažeidimų, gera paviršiaus kokybė, nenusidėvi įrankiai ir kt.

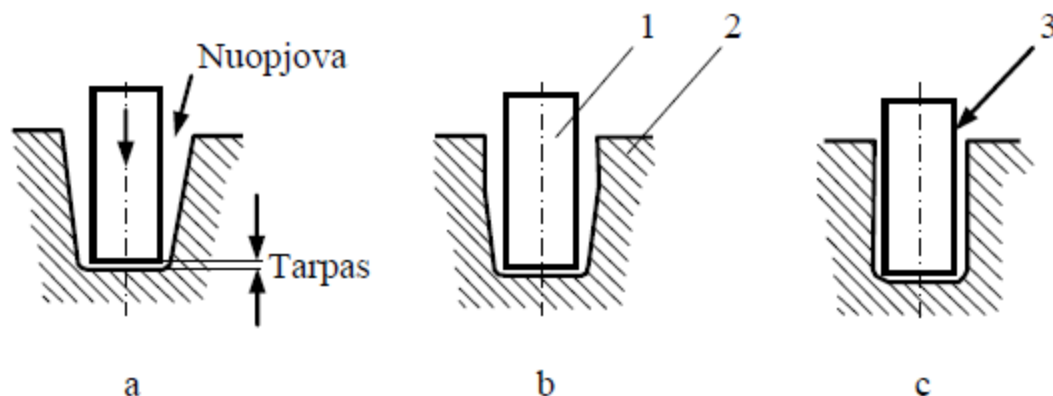
Trūkumai: turi būti stipri ir standi įrenginio konstrukcija, galinti atlaikyti dideles jėgas tarp ruošinio ir įrankio; įrenginio detalės, kontaktuojančios su elektrolitu, turi būti pagamintos iš korozijai atsparių medžiagų (pavyzdžiui, nerūdijančiojo plieno); reikalingas galingas srovės šaltinis ir sudėtinga elektrolito tiekimo, filtravimo, regeneravimo ir panaudoto elektrolito šalinimo sistema.

Srovė gali siekti 10 000 A, o bendra įrenginio galia 200 kW. Atstumas tarp detalės ir įrankio dažniausiai 0,1 mm, įrankio judėjimo greitis 3 mm/min. Elektrolitas tiekiamas 5 m/s greičiu 2 MPa hidrostatiiniu slėgiu. Nuo elektrolito priklauso, kokia vyks cheminė reakcija. Jis perneša išsiskyrusią šiluminę energiją ir reakcijos produktus, aušina įrankį ir ruošinį. Elektrolitas turi būti laidus elektrai, nebrangus, lengvai paruošiamas, netoksiškas ir kuo mažiau agresyvus. Dažniausiai naudojamas 10 % *NaCl* tirpalas, kiek rečiau – mažiau agresyvus, tačiau ne toks laidus natrio nitrato (*NaNO₃*) tirpalas. Elektrolito varža priklauso nuo temperatūros ir koncentracijos, todėl, gaminant tikslias detales, būtina išlaikyti pastovią temperatūrą (jai kintant, keičiasi tarpas tarp įrankio ir detalės).

ECA naudojamas grūdintam plienui ir kitiems metalams apdirbti, neapvalioms skylėms gręžti, nelygiems paviršiams liejimo formose formuoti ir kitoms metalo apdirbimo operacijoms, kurias sunku atlikti įprastiniais būdais. *ECA* būdu gaminamos liejimo formos, šlifuojami ir poliruojami paviršiai.

Įrankio forma. *ECA* įrankio forma neatitinka tikslaus savo atvaizdo detalėje, o kartais ji gali net labai skirtis (5.23 pav.). Daugiausia metalo pašalinama įrankio priekyje, kur atstumas iki paviršiaus yra mažiausias. Įrankio šoninis paviršius taip pat dalyvauja apdirbimo procese. Nors ruošinio viršuje srovė mažiausia, metalas vis tiek pašalinamas ir gaunama kūgio forma. Padengus įrankio šonus oksido sluoksniu ir kartu panaudojus specialų elektrolitą, šonuose sumažėja srovės

tankis ir kūginė nuopjova (5.23 pav., *b*). Didžiausias tikslumas gaunamas visiškai izoliuojant įrankį plonu silicio karbido arba silicio nitrido sluoksniu (5.23 pav., *c*). Įrankio šonus padengus izoliacine medžiaga, beveik visa srovė praleidžiama įrankio judėjimo kryptimi. Maža dalis srovės teka į detalės šonus įrankio apačioje, todėl skylė būna didesnio skersmens nei įrankis.

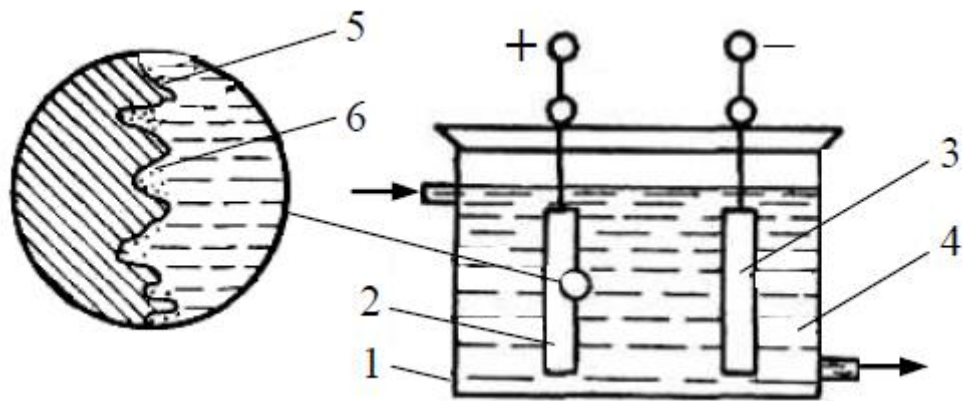


5.23 pav. ECA suformuotos kiaurymės formos priklausomybė nuo įrankio paruošimo: *a* – nepadengtas elektrodas, *b* – oksiduotas elektrodo paviršius, *c* – plonu silicio karbido arba silicio nitrido sluoksniu padengtas elektrodas; 1 – cilindro formos įrankis; 2 – apdirbamas ruošinys; 3 – izoliacinis sluoksnis

Įrankiai gaminami iš vario, žalvario, bronzos arba nerūdijančiojo plieno. Jeigu detalės prototipas jau yra sukurtas, įrankį galima gaminti ECA būdu. Pagaminto įrankio patvarumas ir ilgaikiškumas priklauso nuo technologinio proceso valdymo.

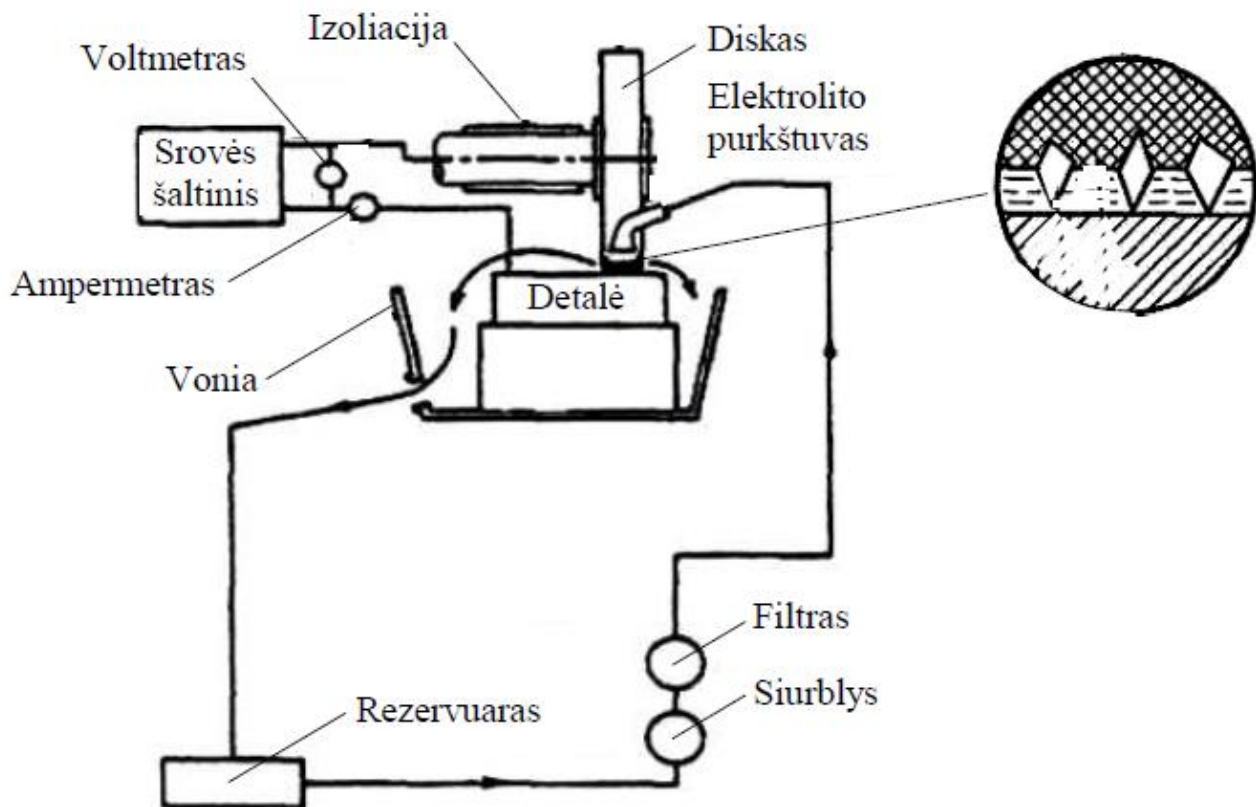
Kiti elektrocheminio apdirbimo būdai:

- Elektrocheminis poliravimas (5.24 pav.). Poliruojama elektrolito vonioje. Elektrolitas gali būti rūgščių arba šarmų tirpalai. Apdirbamasis ruošinys yra anodas, katodas yra metalinė (švininė, varinė, plieninė) plokštelė. Norint intensyviau poliruoti, elektrolitas pašildomas iki 40–80 °C temperatūros. Praleidžiant elektros srovę, pradeda tirpti anodas (ruošinys). Labiausiai ardomi anodo paviršiuje esantys mikronelygumai, nes čia yra didžiausias elektros srovės tankis. Įdubos menkai tirpsta, nes jose susikaupia anodinio tirpimo medžiagos (druskos, oksidai), kurios yra prasti elektros srovės laidininkai. Elektrolizė sumažina nelygumus, nepaveikdama kitų detalės paviršių. Apdirbamas paviršius įgauna metalinį blizgesį. Elektrocheminiu būdu poliruojama prieš dengiant galvaninėmis dangomis, išbaigiami pjovimo įrankių darbiniai paviršiai, gaminamos plonos juostos ir folija, valomi ir dekoratyviai užbaigiami detalių paviršiai.



5.24 pav. Elektrocheminio poliravimo schema: 1 – vonia; 2 – apdirbamas ruošinys; 3 – plokščias elektrodas; 4 – elektrolitas; 5 – ruošinio paviršiaus šiurkštumas; 6 – anodinio tirpimo medžiagos

- Elektrolitinis šlifavimas. Naudojamas sunkiai apdirbamoms medžiagoms apdirbti, nestandžių detalių baigiamajam apdirbimui (nes nedidelės pjovimo jėgos) ir yra našesnis už įprastinį šlifavimą. Apdirbant šiuo būdu plonasienes detales, išsiskiria mažiau šilumos ir pasiekiamas didesnis tikslumas. Elektrolitiniam šlifavimui naudojamas įprastinis abrazyvinis diskas, kurio riškis (dažniausiai bakelitinis su grafito užpildu) yra laidus elektros srovei. Elektrolitas tiekiamas į tarpą tarp apdirbamos detalės (anodo) ir abrazyvinio disko (katodo) abrazyvo grūdelių (5.25 pav.). Vyksta elektrolizės procesas. Abrazyvinės dalelės ardo detalės paviršinį sluoksnį ir pašalina ruošinio anodinio tirpimo medžiagas vykstant įrankio ir ruošinio judesiems. *ECA* paspartina metalo šalinimą ir prailgina abrazyvinio disko eksploatacijos trukmę. Elektrolitinio šlifavimo metu apie 85–90 % užlaidos pašalinama anodinio tirpinimo būdu ir 10–15 % – mechaniškai. Naudojant šį apdirbimo būdą, sutaupoma iki 90 % abrazyvinio disko ir apie 50 % sumažėja darbo išlaidos. Titaną ir legiruotąjį plieną reikia šlifuoti aliuminio oksido abrazyviniu disku. Taip nušlifuotame paviršiuje nėra terminių pažeidimų ir gaunamas mažesnis kaip 0,2 μm paviršiaus šiurkštumas.



5.25 pav. Elektrolitinio šlifavimo įrenginys

- Elektrocheminis veidrodinių paviršių šlifavimas. Ši technologija skiriasi nuo elektrolitinio šlifavimo tuo, kad vietoj elektrolito naudojamas įprastas aušinimo skystis, elektrolizė vyksta tarp vario katodo ir teigiamai įelektrinto abrazyvinio disko (šlifuojant elektrolitiniu būdu, diskas yra katodas, detalė – anodas, o elektrolizė vyksta tarp disko ir detalės). Šiuo būdu apdirbamos silicio, silicio nitrido, cirkonio, silicio karbido, volframo karbido ir kitos nemetalinės detalės. Paviršių šlifuoja labai mažos 0,3–2,0 μm skersmens dalelės, todėl veidrodinio paviršiaus kokybė pasiekama be poliravimo (paviršiaus šiurkštumas $Ra=2\text{--}10\ \mu\text{m}$). Šiuo būdu šlifuojami lęšiai, veidrodžiai, silicio plokštelės mikroschemų gamybai ir kt.
- Elektrocheminis gręžimas fasoniniu vamzdžiu. Naudojamas ilgoms, mažo skersmens apvalioms arba specialios formos skylėms gręžti kietlydiniuose ir aukštos lydymosi temperatūros metalų (nikelio, kobalto, molibdeno, titano ir kt.) lydiniuose naudojant rūgštinį elektrolitą. Dažniausiai tuo pat metu gręžiama daug skylių. Elektrolitas tiekiamas atsišvelgiant į apdirbamą medžiagą. Dažniausiai naudojamas 10–20 % sieros rūgšties arba 15–30 % azoto rūgšties tirpalas. Elektrolitas tiekiamas pro rūgščiai atsparų (dažnai pagamintą iš titano) vamzdį – katodą. Katodas elektriškai izoliuojamas, išskyrus patį jo galą, kur vyksta elektrolizė. Elektrodoi sujungiami po du ar tris plastikinėmis kreipiamosiomis, kuriomis galima truputį keisti skylių gręžimo kryptį. Taip išgręžiama dešimtys ar šimtai lygiagrečių

skylių, kurių skersmuo 0,5–6 mm, gylio ir skersmens santykis 200:1, pastūma 2–4 mm/min. Rūgštiniu elektrolitu nuplautas metalas ištirpsta arba pavirsta suspensija.

- Kapiliarinis gręžimas (elektrocheminio gręžimo atmaina). Elektrolitas rūgštinis, tačiau gręžimo vamzdeliai pagaminti iš plono stiklo su centre esančia tauriojo metalo, pvz., platinos, viela. Į apdirbimo zoną elektrolitas tiekiamas vamzdeliu, o elektros srovė – viela. Naudojant šią technologiją galima gręžti mažesnio kaip 0,4 mm skersmens skylės, kurių gylio ir skersmens santykis didesnis kaip 10:1. Apdirbant šiuo būdu, elektrolitas turi būti gerai filtruojamas, kad gręžimo atliekos neužkimštų labai siaurų elektrolito tiekimo kanalų. Kapiliarinio gręžimo greitis panašus kaip elektrocheminio gręžimo fasoniniu vamzdžiu.

5.5. Lazerinis apdirbimas

Lazeris (*Laser – Light amplification by simulated emission of radiation*), arba šviesos sustiprinimas stimuliuojant spinduliavimą, yra energijos spinduliavimo šaltinis, kurio spinduliuotė medžiagos paviršių veikia kaip labai koncentruotas energijos srautas. Didelės koncentracijos ir lengvai valdomas kryptingas šiluminės energijos srautas gali veikti medžiagą lokaliai, todėl detalėje nėra liekamųjų deformacijų, gaunama gili ir siaura išlydyto metalo sritis (terminio poveikio sritis taip pat nedidelė). Šis elektromagnetinių bangų srautas yra monochrominis (generuotas siaurame intervale), koherentiškas (vienodos fazės bet kokiame spinduliuotės srauto skerspjūvyje), kryptingas (orientuotas tiksliai viena kryptimi), mažos sklaidos, stabilus, didelio skaičiaus ir gali būti poliarizuotas.

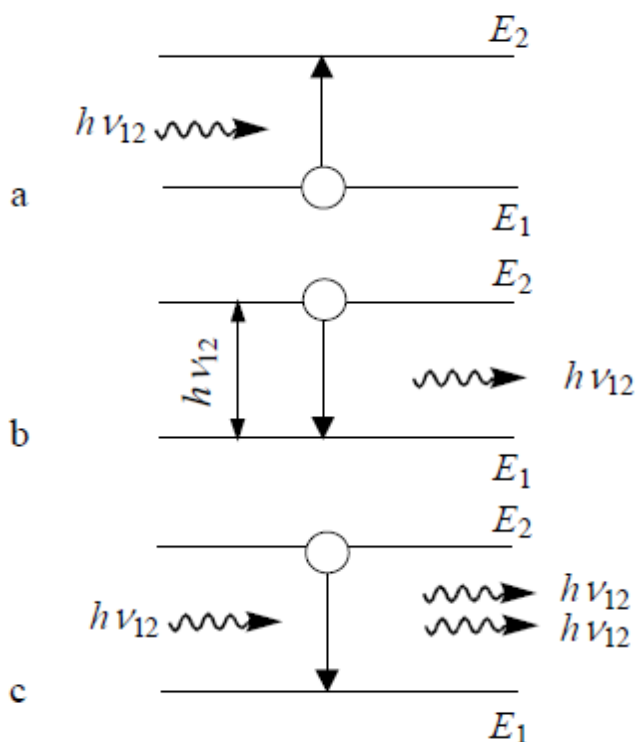
Lazeris sutelkia elektromagnetinę spinduliuotę, kurios bangos ilgis yra infraraudonojoje, regimojoje arba ultravioletinėje spektro dalyje. Esant didelei energijos koncentracijai kaitinimo dėmėje, greitai įkaista, išsilydo ir išgaruoja sunkiai lydūs metalai. Veikiant lazerio spinduliuote, nėra mechaninio sąlyčio su detale, todėl galima apdirbti trapias ir plonasienes medžiagas, nereikia sudaryti vakuumo, nėra rentgeno spinduliuotės. Naudojant optines ir mechanines sistemas, koncentruotą lazerio spinduliuotės srautą galima nukreipti į sunkiai prieinamas detalės vietas, kurių negalima apdirbti kitais metodais. Koncentruotą lazerio spinduliuotę galima išsklaidyti į kelis srautus ir vienu metu atlikti kelias technologines operacijas įvairiose darbo vietose.

Lazerinio apdirbimo metu nuimant didelius metalo kiekius, būtina labai didelė maitinimo galia, todėl tūriniam metalo nupjovimui tradiciniai apdirbimo metodai efektyvesni už lazerinį apdirbimą. Reikia atkreipti dėmesį, kad, nuimant drožlę įprastiniais metodais, energija reikalinga metalo šlyčiai, o pjaunant lazeriu, – metalui išgarinti.

5.5.1. Lazerio veikimo principas

Absorbcija, spontaninis ir sužadintas spinduliavimas. Lazero šviesos generacija vyksta, kai sužadinti atomai arba molekulės pereina į žemesnės energijos arba nesužadintą būseną. Lazero veikimui svarbūs trys pagrindiniai šviesos sąveikos su medžiagos atomais procesai: *absorbcija* (sugertis), *spontaninė* (savaiminė) ir *sužadinta* (priverstinė) spinduliuotė.

Tarkime, kad tūrio vienetu yra N_0 atomų, turinčių tik du energijos lygmenis: pagrindinį, kurio energija E_1 , ir sužadintą, kurio energija $E_2 > E_1$. Atomų pirmame (pagrindiniame) lygmenyje skaičius N_1 , antrame (sužadintame) – N_2 . Atomų skaičiai lygmenyse N_1 ir N_2 dar vadinami lygmenų užpildymo skaičiais. Kadangi atomai turi tik du energijos lygmenis, akivaizdu, kad $N_1 + N_2 = N_0$. Jei tokių atomų sistemą apšviestume vienspalve (monochromatine) šviesa, kurios fotonų dažnis ν_{12} toks, kad jų energija tenkina sąlygą $h\nu_{12} = E_2 - E_1$ (čia h – M. Planko konstanta), tai dalis atomų sugers fotonus ir pereis į sužadintą būseną E_2 (5.26 pav., *a*). Tačiau po trumpo laiko tarpo sužadinti atomai grįžta į nesužadintą būseną: *savaimine išspinduliuodami fotoną* (5.26 pav., *b*), kurio energija $h\nu_{12} = E_2 - E_1$ (spontaninė spinduliuotė) arba *priverstinai* (5.26 pav., *c*), paveikti kito fotono (sužadinta spinduliuotė).



5.26 pav. Kvantinių šuolių tipai: *a* – priverstinės sugerties; *b* – spontaninis; *c* – sužadintas

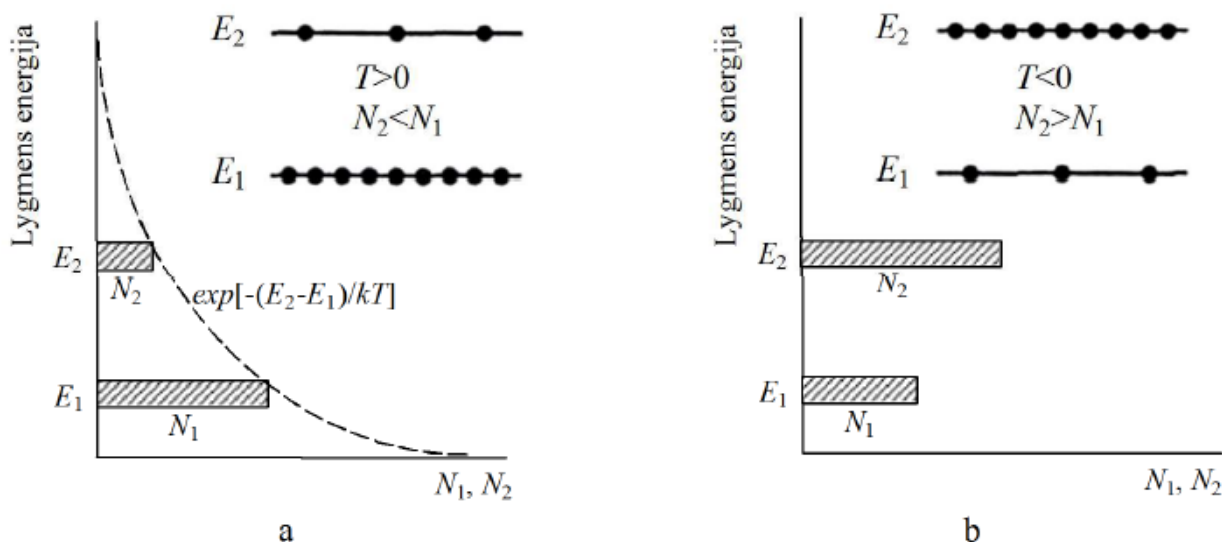
Spontaninė spinduliuotė galima tik iš didesnės energijos (E_2) lygmens į mažesnės energijos (E_1) lygmenį. Spontaninei spinduliuotei būdinga tai, kad ji vyksta atsitiktinai. Dėl savaiminio šuolio atsitiktinio pobūdžio įvairūs atomai spinduliuoja nepriklausomai vienas nuo kito skirtingu laiko momentu. Dėl to jų elektromagnetinės spinduliuotės bangų fazės, poliarizacija (elektrinio lauko

stiprio vektorių E kryptys), spinduliuotės sklaidimo kryptys tarpusavyje yra nesuderintos. Spontaninė spinduliuotė yra nekoherentinė, nors spinduliavimo dažnis gali ir sutapti.

Sužadinta šviesos spinduliuotė yra lazerio veikimo pagrindas. Sužadintą atomą galima priversti grįžti į normalią būseną anksčiau, nei prasidės savaiminė spinduliuotė. Sužadintą (priverstinę) spinduliuotę galima sukelti, pavyzdžiui, paveikus sužadintą atomą šviesos kvantu (fotonu), kuris atitinka sužadintosios ir nesužadintosios būsenos energijų skirtumą. Jeigu daug atomų bus tos pačios sužadintos būsenos, tai ir vienas fotonas galės sukelti visų jų spinduliuotę vienu metu, o šviesa, sklindanti tokia sužadinta (aktyvia) medžiaga, stiprės. Tai pasiekama, kai būna sužadinta daugiau nei pusė atomų. Sužadintos spinduliuotės metu išspinduliuotas fotonas yra identiškas privertusiam jį spinduliuoti fotonui (turi tokią pačią energiją ir sklaidimo kryptį), todėl dėl tokios priverstinės spinduliuotės vyksta efektyvus šviesos stiprinimas, o sustiprinta šviesa yra koherentinė. Šviesai stiprinti parenkamos medžiagos, kurių atomai lieka sužadinti gana ilgai. Žadinama (kaupinama) galinga nekoherentine spinduliuote.

Veikiant atomus spinduliuote, kurios fotonų energija $h\nu_{12}$, visi trys pagrindiniai procesai: *absorbcija*, *spontaninė* ir *sužadinta* spinduliuotė vyksta vienu metu.

Lazerinių energijos lygmenų inversinis užpildymas. Šiluminės pusiausvyros būsenoje N_2 visuomet bus mažesnis už N_1 (5.27 pav., *a*). Esant tokiam energijos lygmenų užpildymo skaičių pasiskirstymui, absorbcijos procesai bus dažnesni už sužadintos ir spontaninės spinduliuotės, todėl turėsime šviesos absorbciją, o ne stiprinimą.



5.27 pav. Dviejų energijos lygmenų užpildymas: *a* – pusiausvyroje sistemoje; *b* – nepusiausvyroje, esant energijos lygmenų inversijai; E_2 – sužadintos būsenos energija; E_1 – pagrindinės būsenos energija; N_2 – sužadintos būsenos atomų skaičius; N_1 – pagrindinės būsenos atomų skaičius; k – Boltzmann (Bolcmano) konstanta; T – absoliutinė temperatūra

Tam, kad atomų sistema stiprintų šviesą, tikimybė fotonui sukelti sužadintą spinduliuotę turi būti didesnė už tikimybę būti absorbuotam, t. y. priverstinių šuolių skaičius per laiko vienetą turi būti didesnis už sugerties šuolių skaičių. Tai pasiekama sužadinant daugiau aukštesnio energetinio būvio atomų nei žemesnio (5.27 pav., b). Šis reiškinys, kai $N_2 > N_1$, vadinamas energijos lygmenų inversija.

Kaupinimo schema. Procesas, kuriuo sukuriamas atomų energijos lygmenų inversija, vadinamas *aplinkos invertavimu*, arba kaupinimu. Sistemoje su dviem energijos lygmenimis, esant optiniam kaupinimui šviesa, kurios fotonų energija $h\nu_{12} = E_2 - E_1$, negalima sudaryti energijos lygmenų inversijos. Net ribiniu atveju, kai išorinio kaupinimo šaltinio galia yra labai didelė, abiejų lygmenų atomų skaičius išsilygina ($N_2 = N_1 = N_0/2$), t. y. absorbcijos šuolių skaičius ir sužadintų spinduliuote šuolių skaičius per laiko vienetą yra lygūs. Todėl, norint sudaryti inversinį lygmenų užpildymą, reikia mažiausiai trijų lygmenų sistemos, kurioje antrasis energijos lygmuo būtų ilgalaikis, palyginti su trečiuoju (aukščiausiu) lygmeniu.

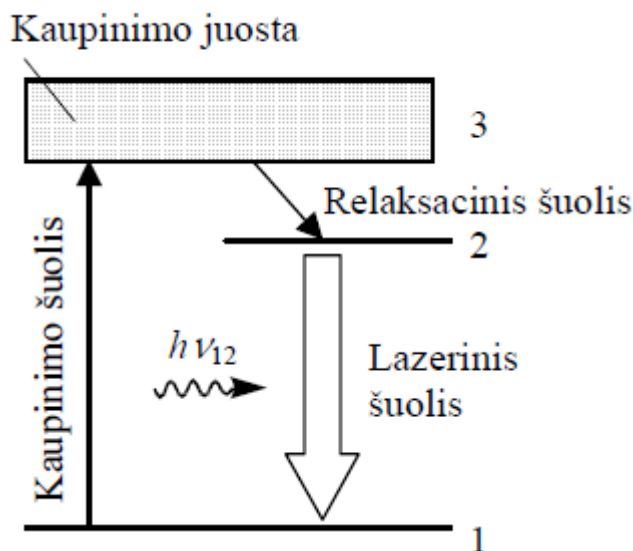
Trijų lygmenų sistemoje (5.28 pav.) lazerinio lygmens užpildymo skaičių N_2 lemia:

- kaupinimo greitis iš 1-ojo lygmens į 3-įjį,
- spontaninių šuolių (spinduliuotės) greitis iš 3-iojo lygmens į 2-ąjį,
- spontaninių šuolių greitis iš 2-ojo lygmens į 1-ąjį,
- sužadintų šuolių greitis iš 2-ojo lygmens į 1-ąjį,
- absorbcijos šuolių greitis iš 1-ojo lygmens į 2-ąjį.

Šuolis $1 \rightarrow 3$ vyksta veikiant išoriniam kaupinimo šaltiniui, o šuolis $2 \rightarrow 1$ atitinka lazerinį šuolį. Trečiasis lygmuo sužadinamas dėl išorinės kaupinimo spinduliuotės, kurios dažnis ν_{13} , absorbcijos. Trijų lygmenų sistemoje inversija sukuriamas tarp lygmenų, iš kurių pagrindinis yra labai užpildytas. Todėl inversijai sudaryti tenka iš 1-ojo lygmens per 3-čiąjį permesti į 2-ąjį lygmenį bent pusę visų dalelių.

Tokioje sistemoje galimas inversinis lygmenų užpildymas $N_2 > N_1$, jei trečiojo lygmens trukmė bus gerokai mažesnė už antrojo. Kaupinimo į 3-įjį lygmenį sužadinti atomai greitai pereina į 2-ąjį lygmenį ir išbūna šiame lygmenyje pakankamai ilgai, kad jame susikauptų reikiamas atomų skaičius, didesnis už atomų skaičių apatiniame (nesužadintame) lygmenyje.

Efektyvesnės keturių lygmenų schemas, kuriose dėl kaupinimo vyksta inversija neužpildyto lygmens atžvilgiu. Čia šuolis vyksta iš 3-čiojo lygmens į 2-ąjį, kuris, esant dideliu energijų skirtumui tarp 1-ojo ir 2-ojo lygmenų, yra beveik neužpildytas.



5.28 pav. Supaprastinta trijų lygmenų Schema

Pagrindinės lazerio dalys. Kiekvieną lazerį sudaro trys pagrindinės dalys:

1. Aktyvioji terpė (veiklioji lazerinė medžiaga) – šviesai stiprinti. Veikliosios medžiagos atomai, jonai arba molekulės turi reikiamą struktūrą energijos lygmenų inversijai sudaryti. Lazerio aktyvioji terpė gali būti kietasis kūnas (amorfus, kristalinis), skystis arba dujos. Šiuo metu žinoma keli tūkstančiai įvairiausių medžiagų, kurios gali būti naudojamos kaip aktyvioji terpė. Nuo jos priklauso svarbiausi lazerio parametrai – spinduliuotės dažnis ir galia. Aktyvioji terpė gali stiprinti tik tam tikro bangos ilgio šviesą. Tai priklauso nuo jos atomų energijos lygmenų išsidėstymo ir kaupinimo bangos ilgio.

Pagal aktyviosios terpės tipą lazeriai skirstomi:

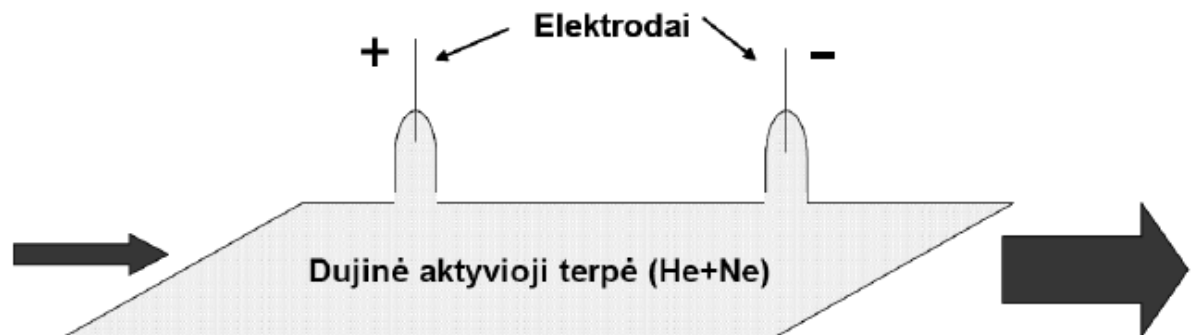
- *Kietojo kūno lazeriai.* Aktyvioji terpė kietojo kūno lazeryje dažniausiai yra strypo formos skaidrus kristalas, į kurį auginant įterpiama lazerio šviesą spinduliuojančių ir stiprinančių aktyviųjų atomų. Kristalo ilgis siekia nuo kelių milimetrų iki keleto centimetrų. Dėl aktyviųjų atomų sąveikos su kristalo atomais aktyviųjų atomų energijos lygmenys išplinta, todėl susidaro galimybė generuoti ir stiprinti bangos ilgio šviesą. Kietojo kūno lazerių aktyvioji terpė gali būti rubino kristalai (lazerio bangos ilgis 694 nm), aleksandritas ($Cr^{+3}:BeAl_2O_3$, 755 nm), specialus stiklas, legiruotas neodimio, disprozio ir kitų lantanoidų („retieji žemės metalai“) atomais. Iš jų labiausiai paplitę yra neodimio (Nd) lazeriai. Nd atomai gali būti implantuoti į tam tikrus kristalus, pavyzdžiui, YAG (aluminio itrio granatas), arba net į stiklą. Kietojo kūno lazerio $Nd^{3+}:Y_3Al_5O_{12}$ (trumpiau $Nd:YAG$) išėjimo bangos ilgis 1064 nm (1,06 μm). Ji gali būti nenutrūkstama arba impulsinė. Kitų kietojo kūno lazerių pavyzdžiai: $Ti^{3+}:Al_2O_3$ (titano safyro); $Ho:YAG$ (holmis įterptas į itrio aluminio granatą, 2090 nm); $Er:YAG$ (erbis įterptas į itrio aluminio granatą, 2940 nm).

- *Dujiniai lazeriai.* Šviesą stiprinančioji terpė dujiniame lazeryje gali būti inertinių dujų atomai, inertinių dujų jonai, metalo garų atomai, molekulės. Dujinių lazerių aktyviašias terpes sudaro helio, neono, anglies dioksido, azoto, argono, ksenono ir kt. dujos. Dujiniai lazeriai:
 - *Helio ir neono lazeris.* Šis lazeris suformuoja nenutrūkstamos bangos 1–50 MW galios srautą. Jo išėjimo bangos ilgis labai tikslus ir stabilus, todėl jis naudojamas interferometrijoje arba holografijoje. Nenaudojamas objektams įkaitinti.
 - *Joninis argono lazeris.* Generuoja nenutrūkstamą mėlynos ir žalios spektro spalvų bangos srautą. Dažniausiai naudojamas holografijoje. Lazeris aušinamas švariu vandeniu, jo našumas siekia 0,01 %.
 - *CO₂ molekulių lazeris.* Generuoja nenutrūkstamą 10,6 μm skersmens 10–6000 W galios bangos srautą ir yra naudojamas objektams įkaitinti IR spinduliuotės juostoje. Našumas didesnis kaip 20 %.
 - *Sužadintos dviatomės molekulės lazeris.* Generuoja vidutinius beveik 1000 W galios 50 ns trukmės impulsus 1000 Hz dažniu. Išėjimo bangos ilgis UV spinduliuotės zonoje yra 300 nm, o našumas beveik 1 %. Kaip sužadintos dviatomės molekulės lazeryje naudojamos fluoro dujos.
- *Skysčių (dažų) lazeriai.* Dažų lazerio aktyvioji terpė skystis. Tai organinis dažiklis (pvz., rodaminas 6G), ištirpintas skystame tirpiklyje (vandenyje, etilo ar metilo alkoholyje ir kt.). Trūkumai: dažų tirpalai dažnai nuodingi ir pavojingi aplinkai, skirtingose spektro srityse reikalingi skirtingi dažai, o tai nepatogu ir brangu.
- *Eksimeriniai lazeriai.* Šiais lazeriais generuojama ultravioletinio ir artimo ultravioletiniam spektrui šviesa (0,193–0,351 μm). Kadangi eksimerinių lazerių bangos ilgis yra labai trumpas, fotonai turi didelę energiją. Dėl to sumažėja lazerio radiacijos ir apdirbamos medžiagos sąveikos trukmė, gaunama minimali terminio poveikio sritis. Eksimerinių lazerių aktyviašias terpes sudaro inertinių dujų Ar₂ (lazerio bangos ilgis 126 nm), Kr₂ (148 nm), Xe₂ (172 nm), taip pat ArKr (134 nm), ArCl (175 nm), ArF (193 nm), KrCl (222 nm), KrF (248 nm), XeCl (308 nm), XeF (351 nm) ir kt. molekulės. Skirtingai nuo kitų molekulinų lazerių, jiems kaupinti naudojamas greitųjų elektronų pluoštas. Naudojami moksliniuose tyrimuose, mikroelektronikoje (ėsdinti), litografijoje, plonų plėvelių gamyboje, kietiems polimerams, keramikai ir puslaidininkiams apdirbti, termiškai jautrioms medžiagoms žymėti, medicinoje (chirurgijoje, oftalmologijoje), termobranduolinėse reakcijose ir kt.
- *Puslaidininkiniai lazeriai.* Tai lazeriniai diodai, kuriuose puslaidininkis naudojamas kaip fotonų šaltinis. Aktyvioji terpė yra puslaidininkių monokristalai (GaAs ir kt.). Tai mažiausi ir ekonomiškiausi lazeriai. Teoriškai puslaidininkinių lazerių naudingumo koeficientas gali siekti 100 %, t. y., visa suvartota elektros energija gali virsti šviesa. Dažniausiai naudojami

pn sandūros lazeriai, kuriuos sužadina elektros srovė. Puslaidininkiniai lazeriai veikia nuolatinio ir impulsinio režimu (impulsinio režimo lazerių šviesos impulsų trukmė yra pikosekundės). Priklausomai nuo puslaidininkio medžiagos generuojamos 0,3–20 μm ilgio bangos. *IR* diapazono puslaidininkiniai lazeriai naudojami atominių ir molekulinų dujų spektroskopijoje, biologijoje, optinėse ryšių linijose ir kt.

Gamyboje dažniausiai naudojami dujiniai ir kietojo kūno lazeriai.

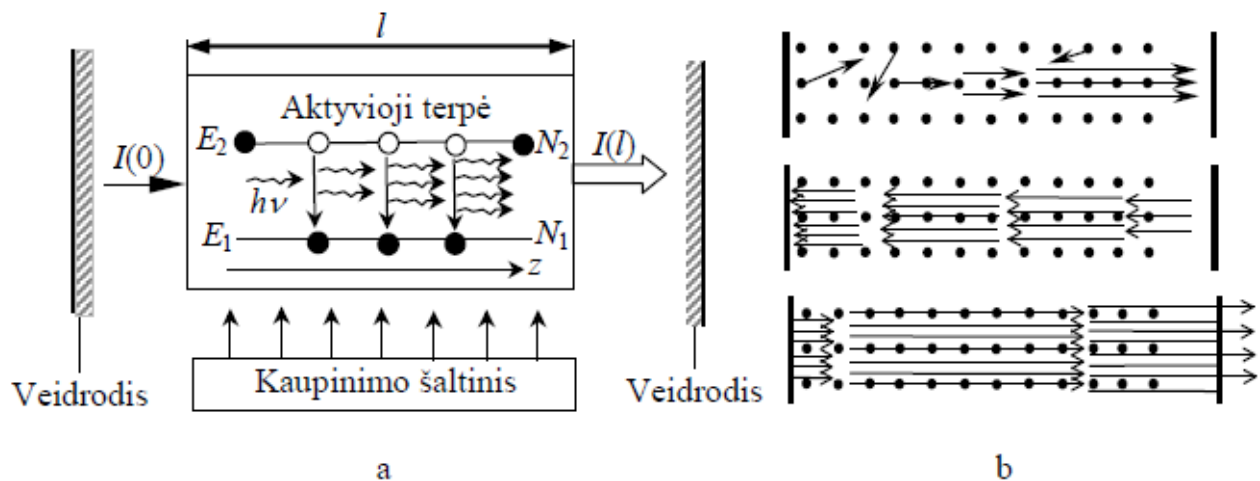
2. Kaupinimo šaltinis – aktyviosios terpės atomams iš žemesnio energijos lygmens į aukštesnįjį sužadinti (perkelti), t. y. atomų energijos lygmenų inversijai veikliojoje medžiagoje sukurti. Dažniausiai inversinis lygmenų užpildymas aktyviojoje terpėje vyksta optiniu (inversija gaunama medžiagai absorbuojant šviesą) arba elektriniu būdu, nors galimas ir cheminis arba terminis (įkaitinant iki aukštos temperatūros ir staigiai atšaldant) aktyviosios terpės invertavimas.



5.29 pav. Elektrinis kaupinimas dujiniuose lazeriuose.

Dujinė aktyvioji terpė kaupinama praleidžiant per ją elektros srovę (5.29 pav.) superaukšto dažnio bangomis. Kietieji kūnai kaupinami sufokusavus į juos šviesos spinduliuotę (naudojamos galingos impulsinės ir nuolatinio veikimo dujų išlydžio lempos) arba kitu lazeriu. Puslaidininkiniai lazeriai kaupinami elektros srove, elektronų pluoštu arba kito lazerio spinduliuote.

3. Optinis rezonatorius – reikiamam stiprinimui pasiekti ir šviesos pluoštui formuoti. Norint, kad sužadinta emisija būtų intensyvesnė už spontaninę, žadinimo banga turi būti pakankamai intensyvi. Tai pasiekama apribojant šviesos srautą veidrodžiais.



5.30 pav. Lazero sandaros schema: *a* – lazerinis šviesos spinduoelis; *b* – generacijos vystymasis lazeryje

Lazeryje aktyvioji terpė būna tarp dviejų veidrodžių (5.30 pav., *a*), sudarančių lazerio rezonatorių. Dažniausiai vienas rezonatoriaus veidrodis visiškai atspindi šviesą, kitas dalį šviesos praleidžia. Aktyviosios terpės išspinduliuota išilgai rezonatoriaus ašies ir atsispindėjusi nuo rezonatoriaus veidrodžių šviesa, kiekvieną kartą sklisdama išilgai aktyviaja terpe, yra stiprinama. Veidrodžiai leidžia pailginti kelią aktyviojoje terpėje 10^3 – 10^6 kartų ir pasiekti generacijai reikiamą suminį stiprinimą (5.30 pav., *b*).

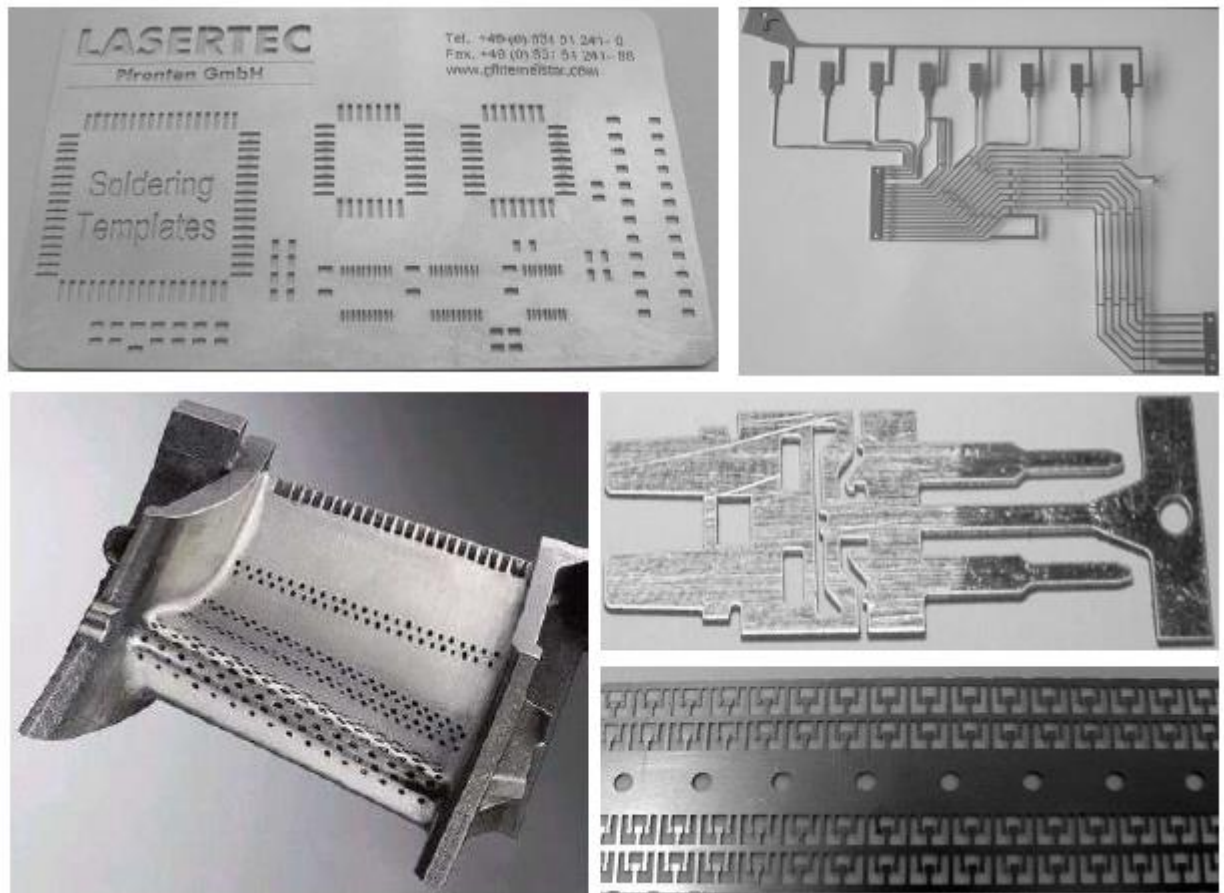
Generacija prasideda iš bet kurio savaiminės spinduliuotės fotono, turinčio tą patį kaip ir lazerinis šuolis dažnį bei kryptį, kuri sutampa su rezonatoriaus ašimi. Energija, būtina dalelėms sužadinti ir energijos lygmens inversijai sudaryti, gaunama iš kaupinimo sistemos. Su kiekvienu atspindžiu nuo dalinai praleidžiančio rezonatoriaus veidrodžio dalis šviesos išeina iš rezonatoriaus, formuodama lazerio spinduliuotės pluoštą. Spinduliuotės pluoštas labai intensyvus. Atomai, kurie išspinduliuoja spindulius spontaniškai visomis kryptimis, priverčiami išspinduliuoti šviesą labai mažo skersmens spindulių pluoštu (pavyzdžiui, 0,2 mm skersmens pluošteliu į pjaunamo ruošinio paviršių). Naudingoji energija yra lazerio spinduliuotės energija. Kita kaupinimo energijos dalis yra išskiriama šilumos pavidalu arba išspinduliuojama į šalis rezonatoriaus viduje.

Aktyvioji terpė, rezonatorius ir kaupinimas kartu sudaro lazerinį šviesos spinduoelį. Lazerių išėjimo spinduliuotė gali būti pastovi, pulsuojanti pavieniais impulsais arba impulsų seka. Pastovi spinduliuotė vadinama nenutrūkstama banga. Dažnai naudingiau lazeriu bombarduoti objektą didelės energijos impulsais nei nenutrūkstamu srautu.

5.5.2. Pagrindinės lazerių panaudojimo sritys

Koncentruotu lazerio spinduliuotės srautu gaunamos siauros įpjovos ir nedidelė terminio poveikio sritis, juo galima apdirbti arba suvirinti sunkiai prieinamas apdirbamų objektų sritis. Lazериu

apdirbami tokie metalo lakštų kiekiai, kurie yra per maži, kad būtų ekonomiškai juos štampuoti (5.31 pav.).



5.31 pav. Lazerinio metalų apdirbimo pavyzdžiai

Lazeris naudojamas mikromechaniniam apdirbimui, pvz., tranzistoriams, diodams silikono plokštelėje gaminti, detalėms termiškai apdoroti, graviruoti (5.32 pav.), suvirinti, žymėti ir kt.

Femtosekundinio (10^{-15} s) lazerio impulsų trukmė yra gerokai trumpesnė nei laikas, per kurį šiluma išsiskverbia į medžiagą, todėl pjaustoma ji išlieka šalta. Lazериu galima pjaustyti ir dinamitą, kadangi šiluma išgaruoja anksčiau, nei jis galėtų sprogti.

Įvairios formos (2D, 3D) detalėms pjauti, gręžti, suvirinti gali būti panaudotos didelio tikslumo ir dinamiškumo lazerinio apdirbimo staklės (5.33 pav.). Staklėse naudojamas „Siemens 840D“ valdymo pultas su 17" TFT (thin film transistor, arba aktyviosios matricos) LCD monitoriumi ir programine įranga.



5.32 pav. Graviravimas lazeriu



a



b

5.33 pav. Lazerinio apdirbimo staklės: *a* – penkių ašių lazerinio apdirbimo centras DML80; *b* – lazerinio pjovimo staklės DML60HSC

Lazerio taikymas apima įvairias mokslo, technikos, technologijos ir kitas sritis (5.34 pav.): lazerinę akių chirurgiją, dantų gydymą, taikinių žymėjimą, priešraketinę gynybą, statybinių mašinų valdymą, lazerinių spausdintuvų, optinių diskų grotuvų, brūkšninių kodų skaitytuvų gamybą, hologramas, lazerių šviesos šou, skulptūrų ir pastatų fasadų valymą, palydovų orbitų ir geodezinius matavimus, atmosferos zondavimą, lazerinę termobranduolinę sintezę, didelės skyros ir sparčių vyksmų spektroskopiją ir kt.



5.34 pav. Lazerio spinduliuote sudarytas raudonas žmonių siluetas

5.5.3. Lazerinio apdirbimo būdai

Lazerio spinduliuotės energija tokia didelė, kad apdirbimas trunka gerokai trumpiau nei kitais būdais, pavyzdžiui, suvirinimo lazerio spinduliuote greitis 10–20 kartų didesnis nei dujinio suvirinimo. Dėl lazerinio proceso lokalumo ir spartumo nėra liekamųjų mechaninių deformacijų, neiškraipoma detalės geometrija; dėl didelio lazerio pluošto galios tankio galima apdirbti beveik visas kietas, trapias, sunkiai lydžias ir kt. medžiagas (metalus ir nemetalines medžiagas, tarp jų ir deimantus), pjaustyti ir suvirinti detales, sukietinti ir legiruoti jų paviršių, valyti fasadus, meno kūrinius ir kt. Lazerio spinduliuote, naudojant optines ir veidrodines sistemas, galima apdirbti sunkiai pasiekiamas vietas.

Kai kuriems lazeriniams technologiniams procesams (suvirinant detales, kietinant jų paviršių ir kt.) darbo vietoje reikia sudaryti inertinių dujų terpę, specialias spinduliuotę sugeriančias dangas ir kt. Kad technologinis procesas būtų efektyvesnis, kartais tikslinga į darbo zoną tiekti papildomą energiją: šiluminę, magnetinę, elektros, mechaninę ir kt.

5.5.3.1. Paviršių sukietinimas lazeriu

Sukietinant lazeriu intensyvus koncentruotas lazerio spinduliuotės pluoštas (sufokusuotas nuo milimetro dalių iki kelių milimetrų paviršiaus plote) veikia apdirbamo metalo paviršiaus sritį, kuri sugeria spinduliuotę paviršiniame sluoksnyje ir greitai įkaista iki aukštos temperatūros, viršijančios kritines A_1 , A_3 reikšmes. Nustojus veikti lazerio spinduliuote, įkaitęs paviršius dėl šiluminio laidumo į medžiagos gylį greitai ataušta, dalis šilumos atiduodama į aplinką.

Dėl greito metalo paviršiaus aušinimo susidaro martensitinė struktūra. Lazerio spinduliuote sukietintas sluoksnis, laipsniškai pereinantis iš smulkiagrūdės struktūros į pradinę, eksploatuojant yra

labai patvarus. Tradiciniais būdais sukietintas (pavyzdžiui, aplydytas kietlydinio milteliais arba metalizuotas) detalių paviršius palyginti greitai ištrupa arba sutrūkinėja dėl jį veikiančių dinaminių apkrovų ir smūgių.

Lazeriniam sukietinimui būdingas trumpalaikis poveikis leidžia išvengti detalės deformacijų. Šiluminis poveikis keičiamas plačiose ribose, reguliuojant lazerio spinduliuotės intensyvumą ir apdirbimo režimus. Reguluojant kaitinimo ir aušinimo greitį ir metalo buvimo aukštoje temperatūroje trukmę, galima gauti reikiamą detalės struktūrą ir atitinkamas savybes. Šiuo būdu galima sukietinti detalių trynimosi paviršius (ypač, kai reikia termiškai apdoroti sunkiai prieinamas vietas), pjovimo įrankių darbinės briaunos, keisti kietinamojo sluoksnio gylį nepažeidžiant geometrinių matmenų (tai ypač svarbu tikslųjų prietaisų ir mechanizmų gamyboje) ir kt. Be to, lazeriu galima sukietinti atskiras detalės vietas po konstrukcijos ar mašinos mazgų surinkimo.

Lazerio spinduliuote švitinant atitinkamas detalės vietas azoto dujose, susidaro metalo nitrido dangos. Tą pačią operaciją atliekant anglies dioksido (CO_2) aplinkoje, gaunamos metalo karbido dangos. Nitrido karbido dangomis galima sukietinti chirurgijoje, stomatologijoje ir kitose medicinos srityse naudojamus instrumentus (jie tampa 2–3 kartus patvaresni, ilgiau laiko). Panašiai kietinami žemės ūkio mašinų, automobilių mazgai, guoliai ir kitos detalės, ypač tada, kai reikia termiškai apdoroti sunkiai prieinamas vietas, lokaliai sukietinti jų paviršių.

Naudojami du lazerinio sukietinimo būdai:

- *Paviršinis sluoksnis įkaitinamas nepažeidžiant apdirbamo paviršiaus mikrogeometrijos.* Šiuo atveju paviršius sukietėja dėl martensitinio virsmo, esant dideliems įkaitinimo ir aušinimo greičiams.
- *Paviršius išsilydo tam tikrame gylyje.* Sukietintą sluoksnį sudaro perlydyta ir grūdinimo sritys. Šis būdas netinka termiškai apdorotiems įrankiniams plienams.

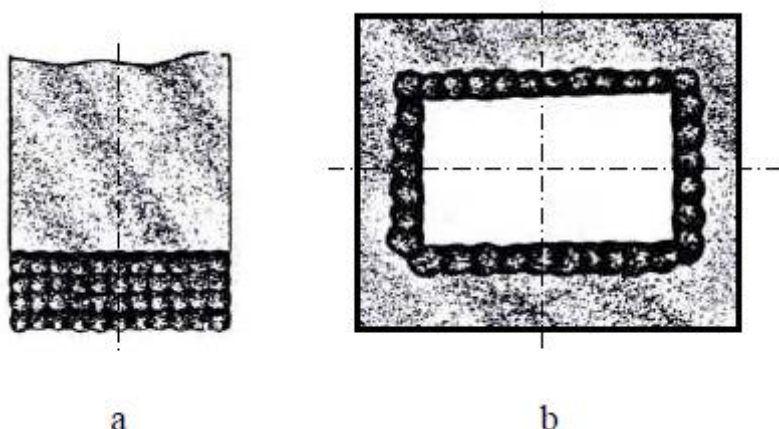
Lazerinio apdirbimo rūšis (impulsinis ar nuolatinis) ir kitos sąlygos priklauso nuo įrankio pjovimo briaunos formos ir dydžio, dilimo tipo, įrankio tipo ir kt.

Impulsiniu apdirbimu sukietinami štampų elementų (puansonų, matricų) darbiniai paviršiai, presformų, kuriomis gaminamos nedidelės detalės, plokštumos. Naudojami režimai, kurie nepažeidžia prieš tai buvusio paviršiaus glotnumo. Paviršių kokybei pagerinti apdirbama argono terpėje. Po lazerinio sukietinimo štampų ir presformų atsparumas dilimui padidėja 1,5–3 kartus. Sukietinimo efektyvumas priklauso nuo šampo (presformos) konstrukcijos, šampo elementų ir medžiagos markės.

Sukietinant nuolatinės veikos technologiniais lazeriais, gaunamas storesnis ir tolygesnis sukietintas sluoksnis, procesas vyksta 2–4 kartus sparčiau negu sukietinant impulsiniais lazeriais.

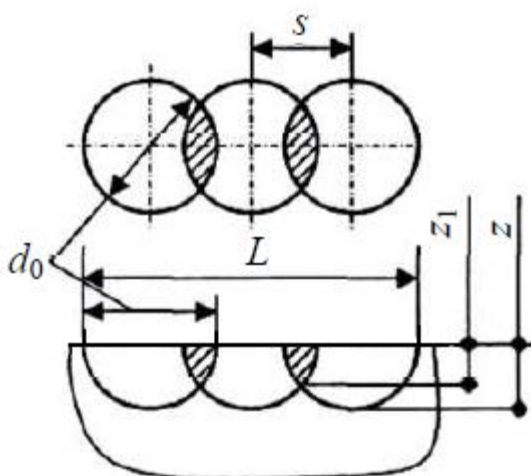
Didelė problema yra mažo skersmens (iki 1,5 mm) iškirtimo puansonų ašmenų dilimas. Užgrūdinti tradiciniais metodais, jie tampa kieti, trapūs ir eksploatuojami labai dažnai lūžinėja. Šiuo

atveju lazeriu sukietinama tik jų galinė plokštuma, t. y. darbiniai ašmenys (5.35 pav.). Kietinama impulsiniu kietojo kūno lazeriu.



5.35 pav. Štampo darbinių dalių kietinimo schemas: *a* – iškirtimo puansono; *b* – matricos

Kai paviršiai sukietinami impulsiniais lazeriais, technologinis procesas turi būti toks, kad spinduliuotės srauto pėdsakai detalės paviršiuje iš dalies dengtų vienas kitą (5.36 pav.).



5.36 pav. Lazerinio sukietinimo schema: *s* – apdirbimo žingsnis; *d₀* – spinduliuotės dėmės skersmuo; *z* – terminio poveikio gylis; *z₁* – pakartotinio terminio poveikio gylis

Lazeriu sukietinamas metalo pjovimo įrankių (grąžtų, pratrauktuvų, frezų, sriegiklių ir kt.) priekinis paviršius ties pjovimo briauna, o kietinant pjūklus ir atpjovimo frezas, sukietinami jų šoniniai paviršiai. Lazeriu sukietinti pjovimo įrankių ašmenys, palyginti su standartinių įrankių, mažiau dyla, padidėja jų terminis atsparumas ir stipris (apie 2,7 karto), pailgėja jų darbo trukmė, tiksliau apdirbamos detalės. Pavyzdžiui, apdirbant lazeriu sukietintais grąžtais ir pjūklais presuotas smulkinių (medienos drožlių) plokštes ir fanerą, ypač baldų gamybos pramonėje, gaunamas gerokai glotnesnis paviršius, neišlaužomi angų kraštai tose vietose, kur priartinamas ir atitraukiamas įrankis.

Lazeriu sukietinami ne tik pjovimo, bet ir įvairūs matavimo įrankiai.

Mašinų gamyboje lazeriniu sukietinimu padidinamas paskirstymo velenėlių, krumpliaračių, vožtuvų darbinių paviršių, vožtuvų lizdų, stūmoklių žiedų griovelių ir kt. atsparumas dilimui. Atsižvelgiant į tokioms detalėms keliamus reikalavimus, gali būti sukietinama išlydant paviršinį metalo sluoksnį arba jo neišlydant. Detalės, kurias eksploatuojant veikia kontaktinės apkrovos, apdirbamos išlydant paviršinį sluoksnį.

Staklių pramonėje lazeriu kietinamos detalės, kurios dirba slydimo trinties sąlygomis: suportai, kreipiamosios, slydimo eigos sraigtai ir kt.

Sukietinto medžiagos sluoksnio storis, plotis, kietis, stipris ir kt. savybės priklauso nuo detalės matmenų ir jos apdirbimo greičio, spinduliuotės srauto energinių parametrų, fizikinių cheminių medžiagos savybių, detalės paviršiaus švarumo ir atspindžio koeficiento. Švarūs blizgantys paviršiai kartais atspindi net iki 90 % lazerio spinduliuotės. Kuo daugiau metalas sugeria energijos, tuo giliau sukietinamas sluoksnis ir tuo kietesnis būna jo paviršius. Tačiau labai didinant spinduliuotės srauto tankį, dėl intensyvaus jos poveikio detalės paviršius pradeda lydytis.

Lazeriu sukietinto metalo paviršius dėl terminio poveikio iš dalies oksiduojasi ir yra tamsesnės spalvos negu paviršius, nepaveiktas lazerio spinduliuotės. Sukietintas sluoksnis paprastai būna ne storesnis kaip 2 mm.

5.5.3.2. Pjovimas lazeriu

Atsiradus galingiems nuolatinės veikos CO_2 lazeriams, buvo pradėtos pjaustyti įvairios nemetalinės medžiagos, kurias sunku apdirbti tradiciniais pjovimo būdais. Didžiausias pjaustymo lazeriu efektyvumas gaunamas sudėtingo profilio plokščių detalių gamyboje ([5.31 pav.](#)), esant didelei jų nomenklatūrai ir vidutiniam partijos dydžiui.

Lazerinis pjovimas nuo kitų pjovimo būdų (mechaninio, abrazyvinio, plazminio ir kt.) skiriasi tuo, kad lazerio pluoštą galima sufokusuoti į keliolikos mikrometrų pluoštelį ir gauti siaurą pjūvį (keičiant spinduliuotės intensyvumą).

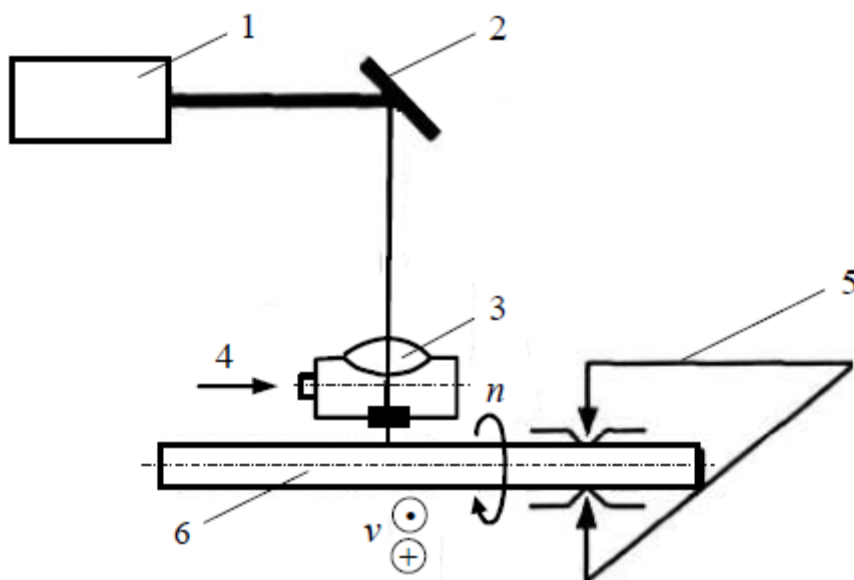
Metalai pjaunami nuolatinės veikos CO_2 lazeriais. Lazerinio pjovimo efektyvumui padidinti į pjovimo zoną pučiamas suslėgtas deguonis, azotas, anglirūgštė arba inertinės dujos. Pjaunant metalus, paprastai naudojamas deguonis, o nemetalinėms medžiagoms pjauti naudojama inertinių dujų arba oro srovė, kurios pagrindinė funkcija yra šalinti suirusias medžiagas iš pjūvio zonos. Kai į pjūvio zoną tiekiamas deguonis, pjaunant plieno arba titano lakštus metalas dega, o pjaunant aliuminį arba varį, – lydosi.

Pjaunant lakštinę medžiagą iki 3 mm storio, lazerinis pjovimas, palyginti su plazminiu ar dujiniu pjovimu, turi pranašumų: 4–6 kartus siauresnis pjūvis, išvengiama liekamųjų mechaninių deformacijų ir kt.

Plieniniai strypai pjaunami trimis būdais:

- sukant strypą aplink geometrinę ašį;
- sukant strypą ir kartu suteikiant jam papildomą slenkamąjį judesį, statmeną spinduliuotės kryptčiai (5.37 pav.);
- stumiant strypą statmenai lazerio spinduliutei.

Norint pasiekti didžiausią pjovimo greitį, optinės fokusavimo sistemos židinyje turi būti žemiau strypo paviršiaus. Tūtos, pro kurią pučiamas suslėgtas deguonis arba oras, išmetimo anga turi būti 1,2–2 mm atstumu nuo apdirbamojo strypo paviršiaus.



5.37 pav. Plieninio strypo pjovimo lazeriu schema: 1 – technologinis lazeris; 2 – atspindžio veidrodys; 3 – optinė fokusavimo sistema su tūta; 4 – tiekiamų suslėgtų dujų srauto kryptis; 5 – mechaniniai gnybtai; 6 – ruošinys

Pjovimo lazeriu greitis priklauso nuo strypo sukimosi greičio. Kuo mažesnis strypo skersmuo, tuo didesnis strypo sukimosi greitis. Tačiau nustatyta, kad viršijus kritinį, t. y. didžiausią strypo sukimosi greitį, pjovimo trukmė pradeda ilgėti. Kad lazeris pjautų greičiau, į pjovimo zoną pro tūtos angą koncentriškai lazerio spinduliuotės srautui pučiamas suslėgtas deguonis. Nupjauto strypo viso pjūvio profilis banguotas (atsiradę nelygumai būna ne didesni kaip 0,2 mm). Tai priklauso ne tik nuo strypo sukimosi greičio, bet ir nuo pučiamo deguonies srauto slėgio. Pučiant deguonies srautą 0,15 MPa slėgiu, pjūvio plotis yra 1,1–1,3 mm (50 mm skersmens strypų, pagamintų iš plieno 45).

Didinant pjaunamo metalo lakšto storį, pjūvio kokybė prastėja. Norint pagerinti kokybę, būtina padidinti deguonies slėgį pjūvio zonoje. Didžiausias mažaanglio plieno lakšto storis, pjaunant 500 W galios lazeriu, siekia 10 mm. Pjaunant tokius storius lakštus, spinduliuotės įėjimo pusėje pjūvis yra

švarus ir lygus, o išėjimo pusėje pjūvio briaunos būna apsilydžiusios. Pjūvio plotis keičiasi nuo 0,8–1 mm spinduliuotės įėjimo pusėje iki 3–5 mm spinduliuotės išėjimo pusėje.

Kvarcinis stiklas lazeriu pjaunamas lengvai, nes toks stiklas, veikiamas koncentruoto lazerio pluošto, yra nejautrus temperatūros pokyčiams, o lazerio spinduliuotės poveikis pasireiškia silicio oksido sublimacija (virtimas dujomis tiesiogiai iš kietosios agregatinės būsenos, praleidžiant tarpinę skysčio fazę) esant temperatūrai, artimai stiklo lydymosi temperatūrai. Todėl šios operacijos metu nesusidaro skysto stiklo, tik šiek tiek apsilydo pjūvio kraštai. Atitinkamai sufokusavus spinduliuotės pluoštą, galima pjauti storus lakštus gana dideliu tikslumu, pavyzdžiui, kai lazerio spinduliuotės galia 200 W, o spinduliuotės skersmuo paviršiuje 0,3 mm, 4 mm storio kvarcinio stiklo pjūvio plotis būna apie 1 mm. Pjūvį užliejantis išlydytas kvarcas pašalinamas didinant lazerio galią, mažinant pjovimo greitį ir išpučiant išsilydžiusią masę iš pjūvio zonos.

Sudėtingiau lazeriu pjauti paprastą stiklą. Esant per mažai galiai arba per dideliame pjovimo greičiui, neužtikrinama kiauro griovelio sublimacija. Spinduliuotės apšvietimo vietoje atsiranda skysta vonelė, todėl susidaro griovelis apvaliais kraštais. Tik padidinus lazerio galią arba sumažinus pjovimo greitį gaunamas pjūvis suapvalintais kraštais. Pučiant orą, galima padidinti pjovimo greitį, pavyzdžiui, esant 400 W spinduliuotės galiai, 4 mm storio stiklas pjaunamas 1,4 m/min greičiu. Silikatiniam stiklui apdirbti geriausiai tinka CO_2 lazeriai, kurių šviesos bangos ilgis $\lambda=5-6 \mu m$.

Technologiniuose procesuose lazeriai gali būti efektyviai panaudoti tik atsižvelgus į apdirbamą medžiagą ir jos paviršiaus kokybei keliamus reikalavimus. Labai svarbu tinkamai pasirinkti lazerio tipą, nes, apdirbant kai kurias medžiagas, turi reikšmės lazerio spinduliuojamos šviesos bangos ilgis. Taip pat svarbu teisingai pasirinkti į apdirbimo zoną tiekiamų dujų sudėtį.

Kietoms, sunkiai lydžioms medžiagoms pjaustyti (keramikai, kompozicinėms medžiagoms ir kt.) gali būti naudojami impulsiniai lazeriai, generuojantys didelės energijos impulsus. Impulsinio pjovimo procese šiluminio poveikio sritis yra mažesnė negu naudojant nuolatinės veikos lazerius. Dėl to pjūvio kraštuose nebūna įtrūkimų.

Pjaunant lazerio spinduliuote medieną, odą, popierių, tekstilės ir kt. medžiagas, į pjovimo zoną pučiamos dujos, pavyzdžiui, anglies dioksidas, azotas, argonas. Tuomet pjūvis yra nedidelio pločio (priklauso ir nuo medžiagos storio), o pati medžiaga neužsidega.

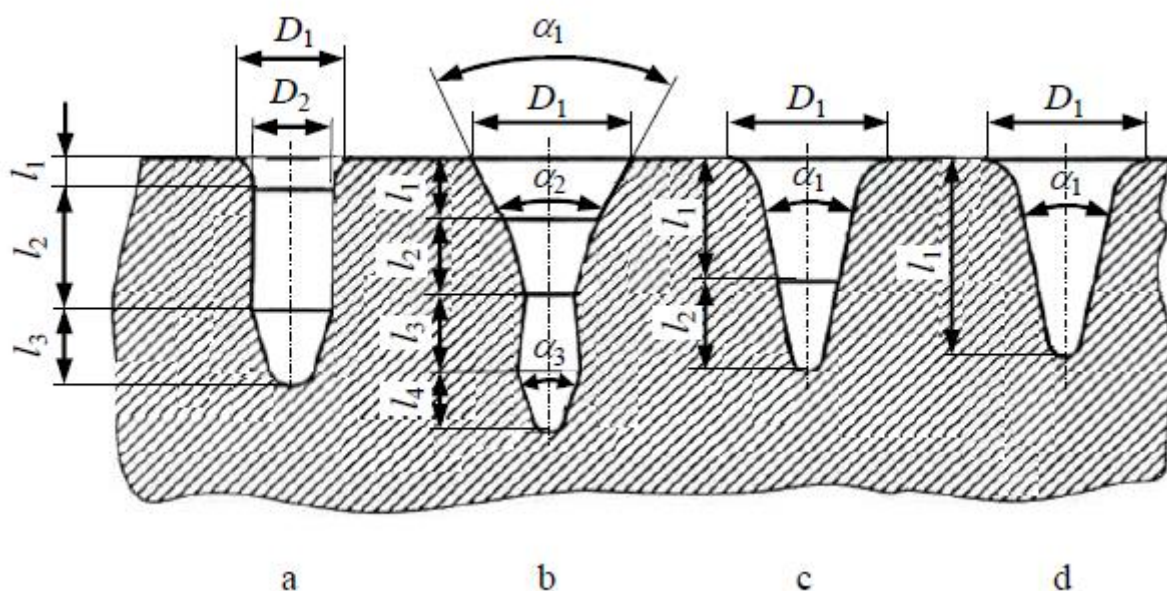
Periodinės veikos CO_2 dujų technologiniuose lazeriuose, palyginti su nuolatinės veikos lazeriais, esant didelei momentinei spinduliuotės impulso galiai, medžiaga iš apdirbimo srities akimirksniu išgarinama ir pašalinama. Ši savybė panaudojama šilumai laidžioms arba magnetinėms medžiagoms, naudojamoms elektros variklių, generatorių ir kitų prietaisų bei mašinų gamybai, pjaustyti. Gaunamas labai siauras pjūvis.

5.5.3.3. Skylių formavimas lazeriu

Skylės skirstomos į ištisines ir aklinąsias. Skylių formavimas priklauso nuo lazerio impulso energijos, trukmės ir dažnio, glaudžiamojo lęšio fokuso padėties apdirbamosios detalės atžvilgiu, fizikinių mechaninių apdirbamosios medžiagos savybių ir kt., o skylės forma – nuo to, kaip sufokusuojama lazerio spinduliuotė. Jeigu pluoštas nesufokusuotas, tai profilis gaunamas netaisyklingos geometrinės formos.

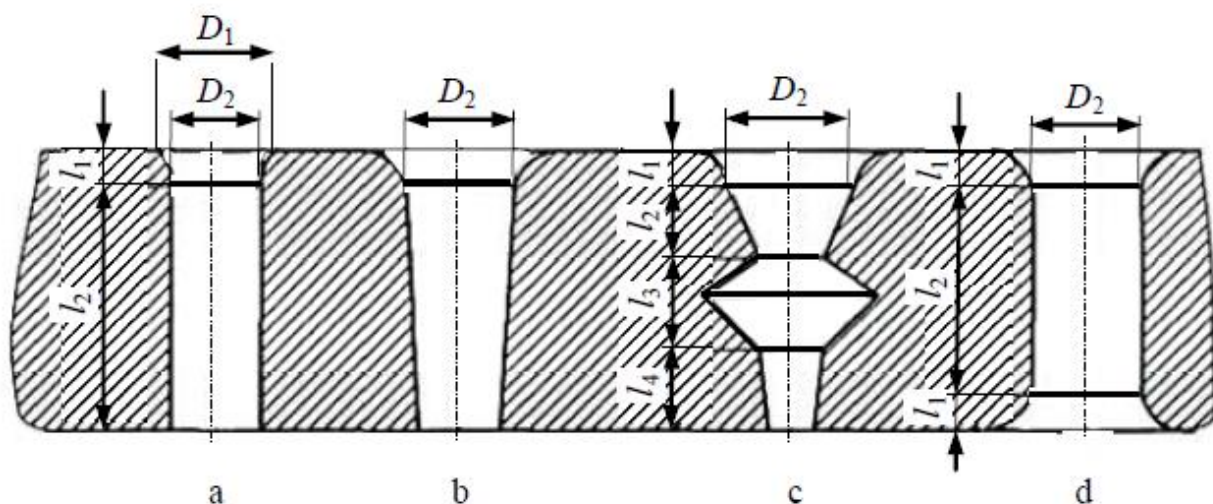
Priklausomai nuo glaudžiamojo lęšio fokuso padėties apdirbamosios detalės atžvilgiu galima gauti įvairių formų aklinąsias skylės (5.38 pav.). Jei fokusas yra ruošinio paviršiuje, skylė turi nedidelį įėjimo kūgį, cilindrinę dalį, kurios parametrai D_2 ir l_2 , ir kūginę dalį, kurios ilgis l_3 (5.38 pav., *a*). Perstumiant glaudžiamojo lęšio fokusą į medžiagą, gaunamas įėjimo kūgis, cilindrinė arba kūginė dalis ir statinės formos elementas (5.38 pav., *b*). Jei glaudžiamojo lęšio fokusas yra virš detalės paviršiaus, susidaro kūginės formos skylė, turinti vieną arba du elementus (5.38 pav., *c, d*).

Skyles lengviau formuoti tose medžiagose, kurių mažas šilumos laidumas (pavyzdžiui, austenitiniame pliene), sunkiau, kai medžiagos šilumos laidumas didelis (varinėse detalėse ir kt.).



5.38 pav. Tipinės aklinųjų skylių schemas, kai glaudžiamojo lęšio fokusas yra: *a* – ruošinio paviršiuje; *b* – perstumtas gilyn į ruošinio medžiagą; *c, d* – virš ruošinio paviršiaus

Formuojant ištisines skylės, vyksta tie patys termodinaminiai procesai, kaip ir gręžiant aklinąsias skylės (5.39 pav.).



5.39 pav. Tipinės ištisinių skylių schemas, kai glaudžiamojo lęšio fokusas yra: *a, b* – ruošinio paviršiuje (keičiant lazerio spinduliuotės galią); *c* – perstumtas į ruošinio medžiagą; *d* – perstumtas giliau į ruošinio medžiagą

Skylėms formuoti (gręžti) naudojami impulsiniai lazeriai. Spinduliuotės tankis siekia 10^6 – $5 \cdot 10^7$ W/cm², o impulso trukmė – 10^{-8} – 10^{-3} s. Tokios didelės galios lazerio poveikis yra panašus kaip ir pjaustant, t. y. medžiaga greitai įkaitinama, išlydoma ir išgarinama iš pagrindinės masės. Greičiausiai gręžimo procesas vyksta esant vidutinei sufokusuotos spinduliuotės galiai, kai impulsai kartojasi dideliu dažniu, o impulso energija maža.

Skylių formavimo lazeriu *trūkumai*: galima apdirbti tik plonas (iki 10 mm storio) medžiagas, dideli skylės paviršiaus formos nuokrypiai (cilindriškumo, apskritumo), aklinoiose skylėse susidaro kraterio formos dugnas.

Dažniausiai lazeris naudojamas skylėms formuoti mechanškai sunkiai apdirbamose medžiagose. Gręžiant skylės lazeriu, darbo našumas, palyginti su mechaniniu skylių apdirbimu, padidėja iki 200 kartų, o palyginti su elektrokibirkštiniu būdu, – 12–15 kartų.

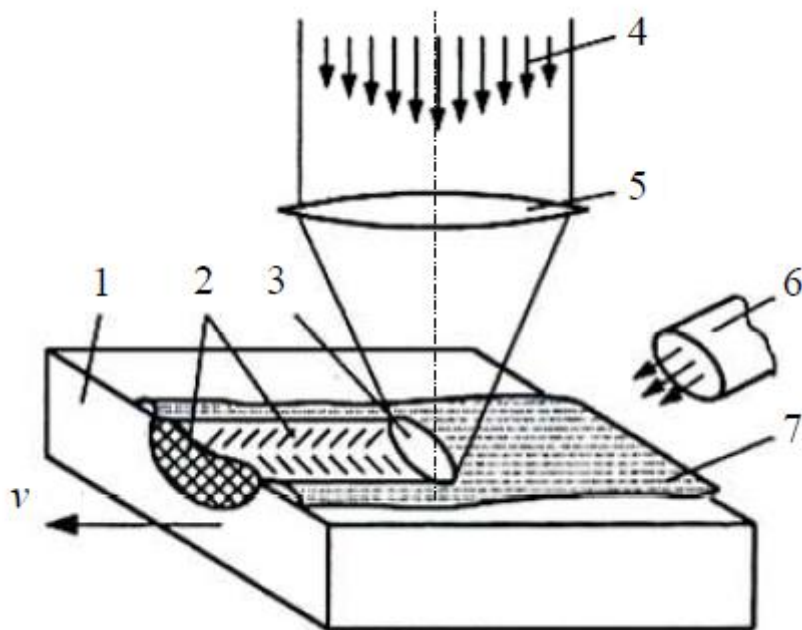
Vienu dviem impulsais neįmanoma gauti taisyklingos cilindro formos skylės, todėl tikslių matmenų skylės yra kalibruojamos. Lazeriu skylės kalibruojamos keičiant glaudžiamojo lęšio židinio padėtį.

5.5.3.4. Legiravimas lazeriu

Legiravimas lazeriu nuo lazerinio sukietinimo (grūdinimo) skiriasi tuo, kad keičiasi cheminė sukietinto sluoksnio sudėtis. Lazeriu metalų paviršiuje galima sudaryti sluoksnį, kuriam būdingos naujos fizikinės, cheminės, mechaninės ir geros eksploatacinės savybės. Lazerio spinduliuotės galios tankis siekia 10^4 – $2 \cdot 10^5$ W/cm².

Legiravimo lazeriu procesas (**5.40 pav.**) yra nesudėtingas ir spartus. Detalės paviršius padengiamas legiruojamuoju elementu (molibdeno, volframo karbido, titano karbido, titano nitrido,

chromo, nikelio, boro arba kitų miltelių sluoksniu). Naudojant įvairius rišiklius, iš legiravimo elementų miltelių daromos pastos. Paveiktas didelės galios lazerio spinduliuotės, legiravimo elementų sluoksnis ir paviršiaus metalas išsilydo ir tarpusavyje susimaišo. Šito neįmanoma padaryti tradiciniais terminio ir termocheminio apdorojimo būdais (įanglinant, azotinant ir kt.). Sluoksnio mikrostruktūra ir gylis priklauso nuo spinduliuotės intensyvumo, poveikio trukmės ir siekia 0,05–2 mm.



5.40 pav. Legiravimo lazeriu schema: 1 – legiruojama detalė; 2 – legiruotas sluoksnis; 3 – išlydyto (skysto) metalo vonia; 4 – lazerio spinduliuotė; 5 – fokusavimo sistema; 6 – apsauginės dujos; 7 – legiravimo pasta; v – detalės slinkimo greitis

Legiravimo elementų milteliai gali būti užpurškiami ant metalo paviršiaus pro specialius antgalius norima kryptimi ir išlydomi kartu su paviršiniu detalės sluoksniu.

Naudojamus legiravimo elementus galima suskirstyti į tris grupes:

- Nemetalinės medžiagos (C , N , B , Si ir kt.). Įsotinus anglimi mažanglį plieną, galima gauti smulkiagrūdę martensitinę struktūrą, kurios mikrokietis siekia 9000 MPa. Po lazerinio azotinimo plieno struktūrą sudaro martensitas, liekamas austenitas ir kieti legiruojančiųjų elementų nitridai (Fe nitridai nėra labai kieti). Lazeriniu būdu įterpiant į plieną boro, jo struktūroje daugėja boridų (FeB , Fe_2B , Fe_3B), o mikrokietis padidėja iki $(12-21) \cdot 10^3$ MPa. Tokie paviršiai yra atsparūs abrazyviniam dilimui. Prisotinus metalus silicio, lazerio poveikio zonoje susidaro silicidai Fe_3Si , Fe_2Si_3 , $FeSi$, $FeSi_2$, o mikrokietis padidėja iki $(14-15) \cdot 10^3$ MPa. Padidėja atsparumas dilimui, korozijai, aukštos temperatūros poveikiui.

- Metalai ir jų lydiniai (*Co, Cr, Ni, Mn, Mo, W, Ti, V*). Legiruojant susidaro persotinti kietieji tirpalai ir tarpmetaliniai junginiai. Legiruoto sluoksnio mikrokietis padidėja iki $(8-10) \cdot 10^3$ MPa.
- Karbidai. Jei medžiagoje yra karbidų, labai padidėja kietis ir atsparumas dilimui. Metalai legiruojami sunkiais lydžių metalų karbidais (*TiC, VC, TaC, WC*). Legiravimo milteliai tiekiami inertinių dujų sraute, nors galima naudoti ir pastas.

Dažniausiai legiruojama didelės galios nuolatinės veikos lazeriais. Šiam procesui naudojami nuolatinės veikos CO_2 dujų lazeriai, kurių galia 0,5–10 kW. Impulsinės veikos technologiniai lazeriai legiravimui nelabai tinka, nes dėl galingo impulsinio spinduliavimo legiravimo elementai detalės paviršiuje išsklaidomi, legiruotasis sluoksnis būna nevienodo storio, prastos kokybės ir banguotas. Kad lazeriu legiruotas paviršius būtų lygus ir glotnus, reikia jį nušlifuoti.

5.5.3.5. Detalės paviršių metalizavimas lazeriu

Detalės paviršių metalizavimas gali būti naudojamas išdilusioms detalėms restauruoti. Apdirbimo esmė yra ta, kad į lazerio spinduliuotės poveikio zoną tam tikru kampu atitinkamu slėgiu įpurškiama metalų (pvz., chromo, nikelio, volframo ir kt.) arba jų junginių miltelių. Veikiami lazerio spinduliuotės milteliai išsilydo (dar prieš pasiekdami medžiagos paviršių), išsilydę milteliai ir pagrindinė masė dešimtųjų milimetro dalių gylyje susimaišo ir abu sluoksniai gerai mechaniškai sukimba.

Lazeriu metalizuoti paviršiai yra vientisos struktūros, juose nebūna ertmių ir įtrūkimų. Vienas iš metalizavimo lazeriu trūkumų yra tas, kad šiame procese reikia labai kruopščiai tikrinti spinduliuotės energetinius parametrus ir metalizavimui naudojamų miltelių dozes.

5.5.3.6. Kiti lazeriniai technologiniai procesai

Raižymas. Tai siaurų (10–50 μm) ir negilių (50–100 μm) takelių sudarymas puslaidininkinių medžiagų plokštelėse dideliu greičiu. Veikiant sufokusuotu lazerio spinduliuotės pluoštu, lokaliai išgarinami medžiagos paviršiaus sluoksniai. Pagal suraižytas takelių linijas plokštelės mechaniškai sulaužomos. Mechaninį raižymą deimantiniais peiliais pakeitus į raižymą lazeriu, nereikia brangaus deimantinio įrankio, gaunamas kokybiškas pjūvis, lengva keisti takelio parametrus (pagal spinduliuotės pluošto parametrus), nereikia suspausti detalės (suspaustoje detalėje gali atsirasti plyšių) ir kt. Raižymui geriausiai tinka kietojo kūno lazeriai, kurių išspinduliuojamos šviesos bangos ilgis 1,06 μm . Šią spinduliuotę gerai sugeria silicis (pagrindinė medžiaga, naudojama puslaidininkinių prietaisų gamybai).

Žymėjimas. Šiam procesui tinka kietojo kūno *Nd:YAG* (neodimio aliuminio itrio granato), CO_2 impulsiniai ir periodinės veikos 10–100 W galios lazeriai. Galima žymėti greitai judančius objektus,

kurie matomi plika akimi arba pro mikroskopą. Kai impulsų pasikartojimo dažnis 10 kHz, žymėjimo greitis siekia 6–12 m/min. Žymėti galima pro permatomus įdėklus, sunkiai prieinamose vietose ir bet kokią medžiagą.

Plačiausiai paplitę žymėjimo lazeriu būdai:

- *Taškinis* – lazerio impulsas palieka pėdsaką gaminio paviršiuje.
- *Kontūrinis* – gaminio paviršiuje padaromi sudėtingos formos piešiniai, simboliai ir kt. Naudojamos automatizuotos sistemos, kurios tiksliai perstumia detalę arba gaminį pagal koordinates. Toks žymėjimo būdas pramonėje yra vienas iš našiausių.
- *Trafaretinis* – lazerio impulsas per specialų trafaretą projektuojamas į apdirbamą paviršių. Naudojant atitinkamus trafaretus arba šablonus, detalės paviršiuje lengva išgarinti ženklą, numerį, simbolį. Tokius trafaretus optinio fokusavimo sistemoje lengva pakeisti, bet jų gamybai reikia daug darbo sąnaudų.

Tekstūravimas. Tradiciniai elektrinio bei cheminio ėsdinimo būdai nėra našūs. Gaminant presavimo formas, labai svarbus paviršių tekstūravimas. Trumpais didelės galios impulsais sudaromas šiurkštus, grublėtas arba duobėtas (tekstūruotas) paviršius. Paviršiaus tekstūra keičiama keičiant impulsų galią, jų pasikartojimo dažnį arba apdirbamos detalės slinkimo greitį. Lazeriu tekstūruotas metalo paviršius sukieta, lėčiau dyla ir pasidaro atsparesnis, kai formuojami karšti plastikai.

Balansavimas. Lazeris gali būti naudojamas tiksliai velenams, rotoriams, smagračiams ir kitoms besisukančioms dalims ir mazgams balansuoti esant dinaminiam režimui. Šis būdas gana tikslus, gerokai sumažėja disbalansas, pailgėja mašinų, turbinų ir kitų įrenginių eksploatavimo trukmė.

Besisukančios detalės paviršiuje galinga lazerio spinduliuote išgarinama medžiaga. Spinduliuotės impulso galios tankis 10^7 – 10^8 W/cm², impulso trukmė 10^{-8} – $5 \cdot 10^{-5}$ s. Esant tokiems lazerio spinduliuotės parametrams, galima tiksliai dinaminio režimu subalansuoti detales ir mazgus, besisukančius 100000 r/min ir didesniu greičiu. Balansuoti skirti įrenginiai turi elektronines sistemas disbalanso vietai ir didumui nustatyti.

Sudėtiniai lazeriniai technologiniai procesai. Jiems būdinga tai, kad, be lazerio, medžiaga tuo pat metu gali būti veikiama mechaniniu, magnetiniu, elektriniu ir kitais būdais. Dažniausiai naudojami sudėtiniai lazeriniai apdirbimo būdai:

Lazerinis mechaninis apdirbimas. Apdirbant medžiagas lazeriniu mechaniniu būdu (pavyzdžiui, tekinant, frezuojant, drožiant ir kt.), pjovimo sritis prieš pat pjovimo įrankį įkaitinama lazerio spinduliuote. Dėl to sumažėja mechaninių jėgų poveikis įrankiui, paspartėja pjovimo procesas, įrankis lėčiau dyla.

Lazerinis plastinis apdirbimas. Apdirbant lazeriniu plastiniu būdu, sukietinimo laipsnis ir gylis labiausiai priklauso nuo fizikinių mechaninių metalo savybių, jo cheminės sudėties, lazerio spinduliuotės intensyvumo ir deformavimo elemento slėgio bei dažnio apdirbamojoje srityje.

Lazerinis plastinis būdas taikomas baigiamosioms technologinėms operacijoms, siekiant padidinti detalės paviršinių sluoksnių kietį ir stiprį, atsparumą dilimui ir nuovargiui. Lazerio spinduliuote įkaitintas metalo paviršius yra veikiamas mechaniškai: paviršius daužomas rutuliukais, juo ridenami tam tikra jėga prispausti ritinėliai, veikiama įvairaus stiprio mechaniniais impulsais ir kt. Dėl to pasikeičia metalo paviršiaus struktūra. Sukietinimo laipsnis tuo didesnis, kuo minkštesnis metalas. Pavyzdžiui, negrūdinto plieno kietis padidėja 2–3 kartus, o užgrūdinto – tik 15–40 %. Didžiausias paviršiaus kietis yra šiuo metodu apdirbto austenitinės, feritinės ir martensitinės struktūros plieno, mažiausias – perlitinės ir sorbitinės struktūros plieno.

Lazerinis ultragarsinis apdirbimas. Šis būdas pagrįstas tuo, kad tuo pačiu metu tą pačią apdirbamą vietą veikia sufokusuotos lazerio spinduliuotės ir ultragarso lauko srautai.

Lazerinis kriogeninis apdirbimas. Detalės paviršinis sluoksnis lokaliai įkaitinamas lazerio spinduliuote ir staigiai aušinamas skysto azoto, helio arba kt. terpėje iki temperatūros, žemesnės už martensitinio virsmo temperatūrą. Aušinamo plieno paviršiniame sluoksnyje gerokai sumažėja liekamojo austenito, todėl, palyginti su sukietinimu lazeriu, paviršinio sluoksnio kietis padidėja apie 40 %.

Lazerinis smūginis apdirbimas. Šiuo būdu sukietinami spalvotųjų metalų ir jų lydinių paviršiniai sluoksniai. Jie yra veikiami stipriais mechaniniais impulsais, susidaranciais dėl lazerio spinduliuotės šiluminės energijos staigaus virsmo mechanine energija. Veikiant medžiagos paviršių (padengtą spinduliuotę sugeriančią dangą) lazerio impulsu, kurio galios tankis siekia 10^9 – 10^{10} W/cm², o trukmė 10^{-8} – 10^{-6} s, susidaro mechaninio smūgio banga, kurios slėgis siekia 600 MPa. Ši banga mechaniškai deformuoja ir sukietina medžiagos paviršinį sluoksnį, pakeičia jo struktūrą, dėl to pagerėja paviršinio sluoksnio stiprio charakteristikos. Kuo stipresnė mechaninio smūgio banga, veikianti statmenai medžiagos apdirbamam paviršiui, tuo didesnis sukietinimo gylis. Lazeriniu smūginiu būdu gali būti mechaniškai sukietinami aliuminio, vario, magnio ir jų lydinių paviršiniai sluoksniai.

Lazerinis hidrosūginis apdirbimas. Mažos skylės gali būti išvalomos hidrauline smūgine banga, susidaranti dėl to, kad lazerio spinduliuotės energiją labai staigiai sugeria skystis. Šiuo būdu galima išvalyti termiškai apdorotų detalių mažo skersmens skyles. Daugelio tikslų detalių (pavyzdžiui, kuro purkštukuose) terminio grūdinimo procese mažos skylės (0,2 mm skersmens ir didesnės) oksiduojasi, užsiteršia ir užsikemša. Užgrūdintų detalių skylės paprastai valomos mechaniškai: pragręžiamos ir išplaunamos žibalu. Panardinus purkštuką į lazerio spinduliuotę sugeriančią terpę, pavyzdžiui, skystą fosfatą, ir paveikus ją lazerio spinduliuote, įvyksta sproginimas,

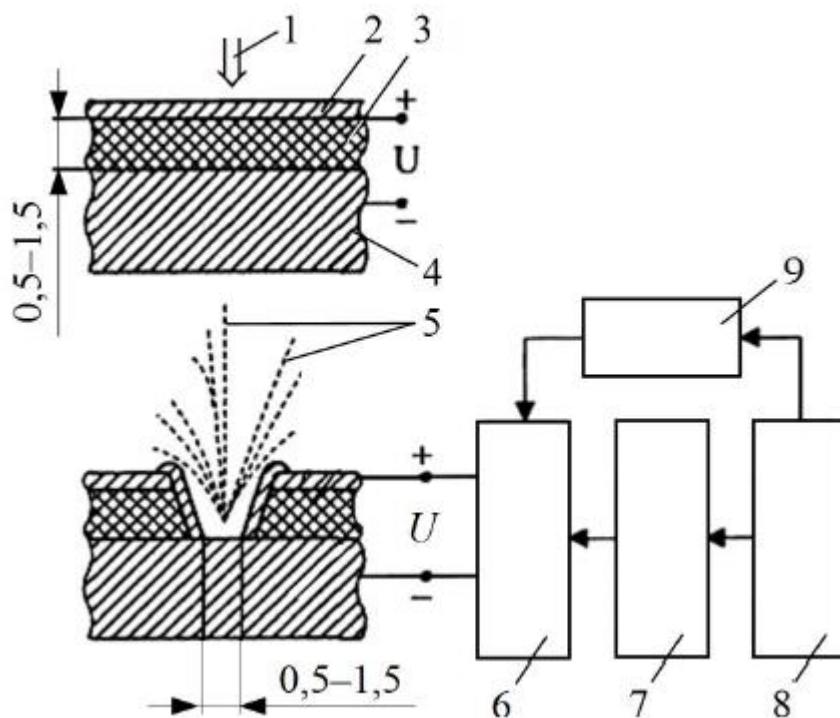
nes spinduliuotės energiją labai greitai sugeria skystis. Skystyje susidariusi hidrodinaminio smūgio banga dideliu slėgiu išstumia skystį pro skylę ir jas mechanškai išvalo.

Lazerinis plazminis apdirbimas. Svarbiausi veiksniai yra plazmos telkinys ir aplinkos dujų slėgis. Valdant spinduliuotės energiją ir dujų slėgį, galima keisti poveikio lazeriu pobūdį. Veikiama 10^7 – 10^{10} W/cm² galios tankio lazerio spinduliuote supančiose dujose, medžiaga išgarinama. Esant didelei spinduliuotės energijai supančiose dujose, susidaro plazmos telkinys. Veikiant lazerio spinduliuote ir plazmos pluoštelio, galima keisti apdirbamosios medžiagos paviršiaus savybes. Pavyzdžiui, paveikus molibdeno plokštelę azoto dujų aplinkoje 10^7 W/cm² galios tankio spinduliuote esant 1 ms 1 MPa slėgiui, joje pramušama skylė. Esant 10 MPa slėgiui, plokštelė net nesilydo.

Lazerinis termocheminis apdirbimas. Šis apdirbimo būdas apima dujų aplinkoje paviršiuje vykstančius procesus, pavyzdžiui, oksidavimą, padengimą, ėsdinimą ir kt. Lazerio spinduliuote, esant 10^6 W/cm² galios tankiui, lokaliai įkaitinamas medžiagos paviršius ir suaktyvinamos jame vykstančios termocheminės reakcijos. Naudojamas mikroelektronikoje, radioelektronikoje ir kitose srityse.

Lazerinis magnetinis apdirbimas. Apdirbant lazeriniu magnetiniu būdu, greičiau susidaro smulkiagrūdė metalų struktūra, nes lazerio spinduliuote išlydyto metalo sritis paveikiama stipriu magnetiniu lauku. Auštant išlydytam metalui, iš austenito susidaro martensitinė adatinė struktūra. Tuo pat metu veikia stiprus magnetinis laukas, kuris sukelia dideles sluoksnių dislokacijas ir juos sutankina. Struktūra tampa iš dalies orientuota ta kryptimi, kuria veikia magnetinio lauko jėgos. Metalas tampa kietas ir atsparus dilimui.

Lazerinis elektrinis apdirbimas. Šiuo būdu pramušamos skylės, sukiatinamas medžiagų paviršius, nusodinamos galvaninės dangos ir kt. Pavyzdžiui, paveikus 1–3 ms lazerio impulsu folija padengtą tekstolito plokštelę, kurios abi pusės laidžios elektrai ir prijungtos prie nuolatinės srovės šaltinio, pramuštos skylės sienelės pasidengia plonu 5–20 μm išgarinto vario dalelių sluoksniu (5.41 pav.).



5.41 pav. Skylių pramušimas ir metalizavimas lazeriniu elektriniu būdu: 1 – lazerio spinduliuotė; 2 – vario sluoksnis; 3 – tekstolitas; 4 – vario plokštė; 5 – išgarintos vario dalelės; 6 – iškrovos blokas; 7 – energijos kaupiklis; 8 – maitinimo šaltinis; 9 – valdymo įtaisas ($U=150\text{--}800\text{ V}$)

5.5.3.7. Spinduliuotę sugeriančios dangos

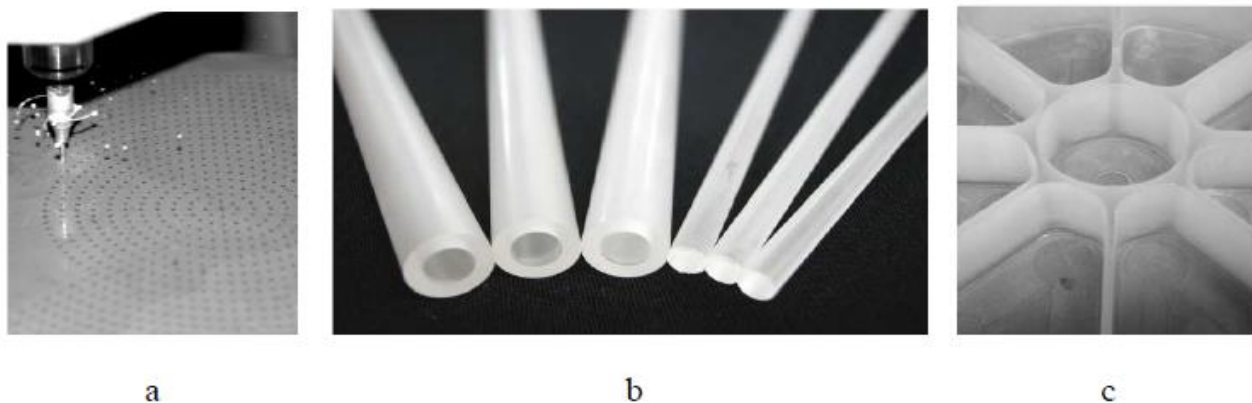
Bet kokio lazerinio poveikio medžiagai atveju svarbu ne tiek spinduliuotės galia, kiek gebėjimas sugerti krintantį spinduliuotės srautą. Pavyzdžiui, CO_2 dujų lazeris spinduliuoja $10,6\text{ }\mu\text{m}$, o kietojo kūno neodimio stiklo lazeris – $1,06\text{ }\mu\text{m}$ ilgio bangą. Juodieji metalai sugeria 10–30 % energijos, kai bangos ilgis $\lambda=10,6\text{ }\mu\text{m}$, ir 50–80 % energijos, kai bangos ilgis $\lambda=1,06\text{ }\mu\text{m}$. Vadinasi, nuo bangos ilgio priklauso, kiek giliai lazerio spinduliuotės srautas įkaitina medžiagą. Kuo daugiau energijos sugeria medžiaga, tuo gilesnis sluoksnis įkaista. Todėl technologiniuose procesuose detalių paviršių tikslinga padengti specialiomis dangomis, kurios sumažina krintančios spinduliuotės atspindį, padidina jos sugeriamąją gebą (absorbciją) ir technologinio proceso našumą. Daugumos metalų sugeriamoji geba didėja mažėjant λ .

Sugeriamąją gebą galima padidinti panaudojus specialias dangas ($10\text{--}40\text{ }\mu\text{m}$ storio plėvelės, miltelius, emulsijas), didinant metalo paviršiaus šiurkštumą, keliant paviršiaus temperatūrą ir kt. Nuo dangos cheminės sudėties priklauso spinduliuotės sugeriamoji geba, kartu sukietinamo sluoksnio storis ir detalės paviršiaus kietis. Pavyzdžiui, padengus nerūdijantį plieną Fe_2S_3 danga, sugeriamoji geba gali padidėti iki 80 % (esant bangos ilgiui $10,6\text{ }\mu\text{m}$). Plačiai naudojamos Al_2O_3 , fosfatinės – $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$, $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$ ($\text{MnFe})_5 \cdot (\text{H}_2\text{PO}_4)_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ir kt. – dangos. Šios dangos yra pigios, atsparios

aukštai temperatūrai, gerai sukimba su metalo paviršiumi, stabilios sugeriamosios gebos. Nustatyta, kad, didinant spinduliuotės srauto galią, metalų sugeriamoji geba savaime didėja.

5.6. Ultragarsinis apdirbimas

Skirtingai nuo lazerinio apdirbimo, apdirbant ultragarsu nuo ruošinio nupjaunamos drožlės. Šis apdirbimo būdas tinka tiek elektrai laidžioms, tiek nelaidžioms medžiagoms apdirbti. Ultragarsu apdirbamos kietos ir trapios medžiagos (5.42 pav.): deimantas, keramika, stiklas, taip pat specialiųjų mechaninių savybių medžiagos, pavyzdžiui, titanas, karščiui atsparūs lydiniai ir kt. Galima apdirbti ir kietlydinus, tačiau tai brangu (labai intensyviai dyla įrankis).



5.42 pav. Ultragarsinio apdirbimo pavyzdžiai: *a* – silicio plokštelėje suformuotos skylės (\varnothing 0,5×11 mm); *b* – lazdelės iš safyro; *c* – plonų sienelių (<1 mm) apdirbimas

5.6.1. Ultragarsinio proceso pagrindai

Ultragarsinis medžiagų apdirbimas yra pagrįstas ultragarsinių virpesių, kurių dažnis $f > 16000$ Hz, sklidimo įvairiose terpėse specifiniais efektais. Ultragarso bangos sklinda nuo virpesių šaltinio. Jei materialioje aplinkoje yra sužadunami ultragarsiniai virpesiai, tai aplinkos dalelės pradeda virpėti apie pusiausvyros padėtį. Virpančios dalelės virpesius perduoda kitoms dalelėms, kurios yra labiau nutolusios nuo garso šaltinio. Susiformuoja akustinė (garso) banga. Greta viena kitos esančios virpančios dalelės virpa ta pačia faze. Taškų, turinčių tą pačią virpesių fazę, visuma vadinama *banginiu paviršiumi*. Priklausomai nuo banginio paviršiaus formos yra skiriamos *plokščiosios*, *cilindrinės* ir *sferinės* bangos.

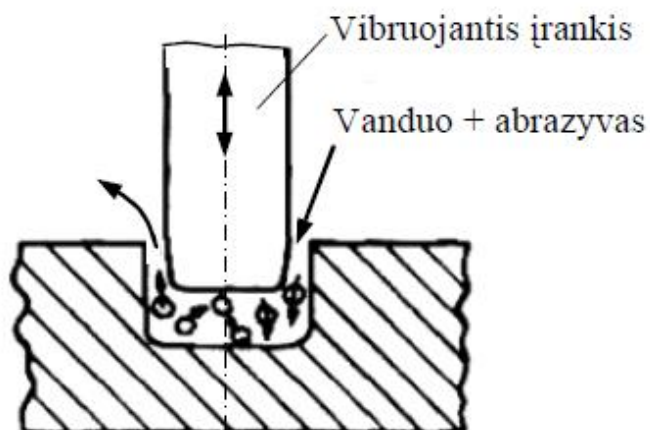
Ultragarso bangos dar skirstomos pagal dalelių virpesių kryptį. Kai dalelių virpesių kryptis sutampa su bangos sklidimo kryptimi, tokios bangos vadinamos *išilginėmis*. Kai dalelių virpesių kryptis yra statmena bangos sklidimo kryptčiai, tokios bangos vadinamos *skersinėmis*. Skysčiuose ir dujose sklinda tik išilginės ultragarsinės bangos. Kietuosiuose kūnuose priklausomai nuo jų formos matmenų, virpesių sužadinimo pobūdžio ir kt. vienu metu gali būti sužadintos išilginės ir skersinės ultragarso bangos, kurių sklidimo greičiai skirtingi.

Skysčiuose ir dujose ultragarso nuostoliai daugiausiai susidaro dėl vidinės trinties (klampumo) ir šilumos laidumo. Kietuosiuose kūnuose pasireiškia papildomi nuostoliai dėl histerezės ir plastinės deformacijos. Labiausiai ultragarsą sugeria dujos, kiek mažiau – skysčiai ir dar mažiau – kietieji kūnai. Gerai garsą sugeria įvairios medžiagos (terpės), pasižyminčios nevienalytiškumu, poringumu ir kt., pvz., plastikai, guma, pluoštinės medžiagos ir kt. Tokio tipo medžiagos dažniausiai naudojamos garso izoliacijai.

Ultragarso apdirbimo principas. Įrankiui, kurio skerspjūvis panašus į ruošinyje apdirbamos išėmos formą, ultragarso dažnio diapazone suteikiami ašiniai mažų amplitudžių virpesiai (5.43 pav.). Abrazyvo grūdėliai, kuriuos neša skystis, pereina tarpeliu tarp įrankio ir ruošinio. Įrankio antgalio virpesių energija perduodama grūdeliams, kurie nuo apdirbamo ruošinio paviršiaus nupjauna drožles. Pjovimo proceso metu, pamažu stumiant įrankį link ruošinio, palaikoma statinė apkrova tarp įrankio ir ruošinio.

Ultragarso apdirbimo metu medžiaga nuo ruošinio nuimama:

- dėl įrankio smūginio poveikio abrazyvo grūdeliams, kontaktuojantiems su ruošiniu;
- dėl laisvų abrazyvo grūdelių smūginio poveikio ruošiniui;
- dėl kavitacijos (garų ar dujų burbuliukų susidarymas skystyje).



5.43 pav. Principinė ultragarso apdirbimo schema

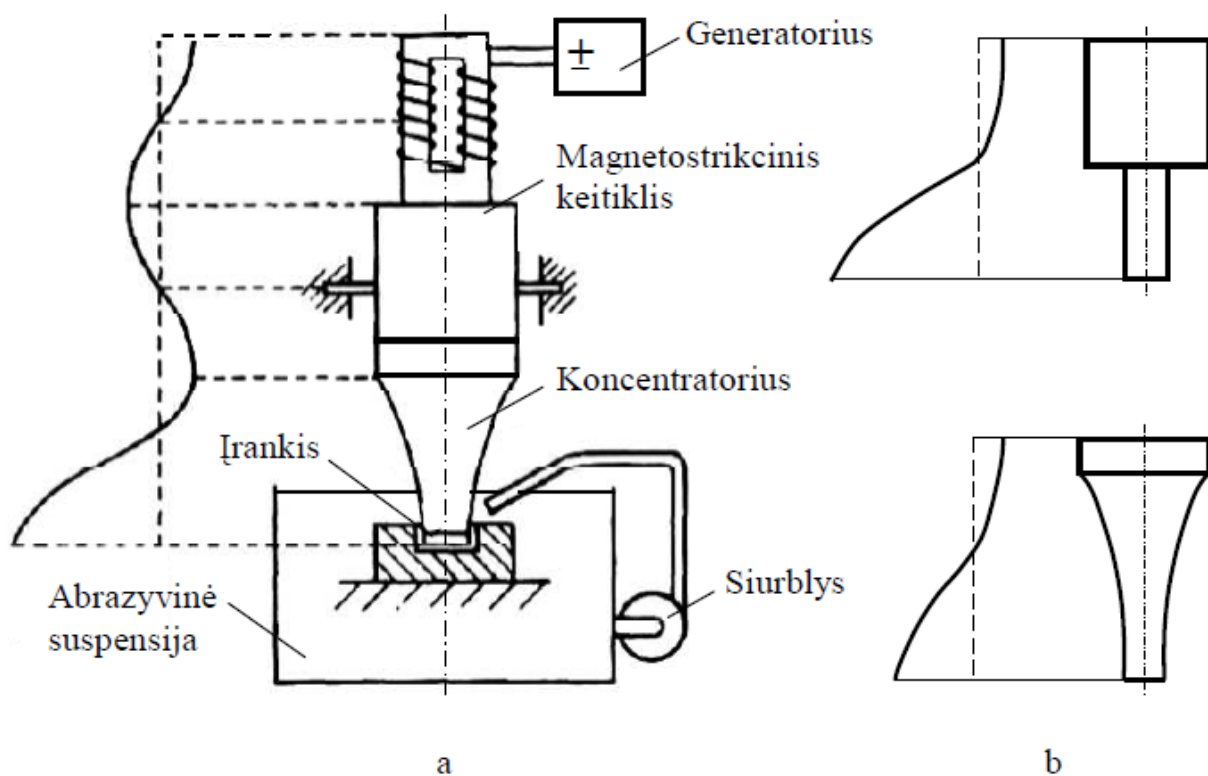
Ruošiniai apdirbami abrazyvinės suspensijos vonioje. Prie ruošinio priartinamas įrankis, pritvirtintas prie koncentratoriaus (5.44 pav.). Koncentratoriaus sujungtas su magnetrostrikine šerdimi, kurią aušina pratekantis vanduo. Šerdies virpesius sužadina ultragarso dažnio generatorius. Abrazyvinė suspensija į vonią tiekama siurbliu, todėl ji nuolat cirkuliuoja. Tarp įrankio ir apdirbamo ruošinio palaikomas pastovus nedidelis tarpelis (kai kuriais atvejais įrankis prispaudžiamas prie ruošinio nedidele jėga).

Akustiniai elementai. Pagrindiniai virpančios sistemos elementai (5.44 pav., a):

- *Generatorius.* Maitinimo signalą (50 Hz) paverčia į aukštojo dažnio signalą (20000–30000 Hz).

- *Keitiklis*. Ultragarsiniam apdirbimui naudojami magnetrostrikciniai, o kartais ir pjezoelektriniai keitikliai. Magnetrostrikciniuose keitikliuose aukšto dažnio virpesiai gaunami praleidžiant atitinkamo dažnio elektros srovę per apviją, gaubiančią keitiklio šerdį. Ši šerdis sudaryta iš 0,1–0,2 mm storio plokštelių (gali būti *Ni*, *Fe–Co*, *Fe–Al* ir kt. lydinų) paketo. Įmagnetinus šerdį, pakinta jos matmenys (magnetrostrikcijos efektas), t. y. sumažėja skerspjūvis, padidėja ilgis. Šerdies virpesių amplitudė siekia 2–5 μm . Virpesių amplitudei padidinti prie šerdies tvirtinamas koncentratorius.
- *Koncentratorius*. Suprojektuotas taip, kad keitiklio amplitudę gali padidinti iki 10–60 μm . Didžiausias mazgo atsparumas nuovargiui pasiekiamas, kai koncentratorius (kintamo skerspjūvio rezonansinis bangolaidis), esantis tarp keitiklio ir įrankio, pagamintas iš vario ir nikelio lydinio.
- *Įrankis*. Jo darbinė forma gali būti įvairi. Tvirtinamas prie koncentratoriaus.

Kai magnetinio lauko kitimo dažnis sutampa su šerdies nuosavu virpesių dažniu, tuomet įvyksta rezonansas. Keitiklis, koncentratorius ir įrankis turi virpėti rezonanso sąlygomis, kad būtų galima maksimaliai išnaudoti tiek amplitudę, tiek suvartojamą galią. Šiuo požiūriu labai svarbu pasirinkti tinkamą įrankio formą (5.44 pav., *b*).



5.44 pav. Pagrindiniai virpančios sistemos elementai: *a* – akustinio junginio elementai ir sistemos virpesių amplitudės pokytis; *b* – koncentratoriaus (greičio transformatoriaus) tipai ir jų sukuriamų virpesių amplitudės

Apdirbimo parametrai. Ultragarsinio apdirbimo procesas priklauso nuo daugelio veiksnių. Svarbiausi iš jų:

- įrankio ir ruošinio medžiaga;
- akustinė sistema – amplitudė, dažnis, veikianti jėga darbo metu;
- abrazyvinė medžiaga, grūdelių dydis ir koncentracija abrazyvinėse suspensijose;
- apdirbamo paviršiaus geometrija.

Abrazyvas. Abrazyvo grūdelių tipas, dydis ir koncentracija turi didelę įtaką ultragarsiniam apdirbimo našumui, kokybei ir tikslumui. Apdirbimo intensyvumas (pvz., apdirbant kietlydinį 0,05–0,3 mm/min, apdirbant stiklą 1–10 mm/min) pasiekiamas parenkant reikiamą grūdelio dydį. Didžiausias intensyvumas gaunamas, kai grūdelio dydis sutampa su įrankio amplitude. Medžiagos nuėmimo intensyvumas sumažėja, kai grūdeliai atšimpa. Norint išlaikyti apdirbimo intensyvumą, reikia pakeisti abrazyvą.

Abrazyviniai grūdeliai veikia kaip pjovimo įrankis, todėl jie turi būti kietesni už apdirbamą medžiagą. Dažniausiai abrazyviniai grūdeliai gaminami iš *boro karbido* (gaunamas kaitinant boro rūgštį elektrinėse krosnyse 2000–2350 °C temperatūroje su koksu, suodžiais ir kt. nepeleningomis anglingomis medžiagomis; už jį kietesnis tik deimantas ir kubinis boro nitridas), rečiau iš *silicio karbido* (silicio ir anglies cheminis junginys, gaunamas iš kvarcinio smėlio ir kokso elektrinėse krosnyse 2100–2200 °C temperatūroje), *elektrokorundo* (gaunamas lydant elektrinėse krosnyse medžiagas, kuriose gausu Al_2O_3).

Abrazyvo grūdeliai, sumaišyti su vandeniu, sudaro suspensiją. Kartais į abrazyvinę suspensiją pridedama iki 15 % cheminių priedų apdirbimo našumui padidinti.

Įrankis. Nudilimo įtakai sumažinti įrankis gaminamas iš dilimui atsparios medžiagos. Pavyzdžiui, apdirbant ultragarsu stiklo gaminius, akustinis įrankis gaminamas iš kietlydinio, apdirbant kietlydinio gaminius – iš grūdinto įrankinio plieno. Grūdinto plieno įrankis naudojamas paruošiamajam, o vidutinio anglingumo – baigiamajam apdirbimui. Be to, rekomenduojama įrankiams sudaryti atvirkštinį kūgiškumą arba įrankio darbiniam paviršiuje sudaryti 1–3 mm pločio kalibravimo juostelę. Naudojant tokius įrankius, galima sumažinti trintį tarp įrankio ir apdirbamos skylės sienelių, pagerinti abrazyvinės suspensijos cirkuliaciją, geriau pašalinti apdirbimo atliekas.

Ultragarsinėse staklėse gali būti naudojamas deimantinis įrankis (5.45 pav.). Specialiai išrasta deimanto dalelių sujungimo technologija, pritaikyta ultragarsiniam apdirbimui. Privalumai – įrankio ilgalaikiškumas, aukštas darbo našumas.



5.45 pav. Deimantinio įrankio

Ultragarsinio apdirbimo staklės (5.46 pav., *a, b*). Jomis apdirbamos kietos (deimantas, kietlydinis, grūdintasis plienas) ir trapios (keramika, stiklas, kvarcas ir kt.) medžiagos. Pagrindiniai staklių elementai – stovas, stalas ir kreipiamosios, akustiniai elementai, skysčio tiekimo sistema, pastūmos mechanizmas. Ultragarsinėse staklėse naudojamas specialus, originalios konstrukcijos staklių suklys (5.46 pav., *c*). Virpesius sukelia jame įtvirtintas magnetrostrikcinis arba pjezokeraminis keitiklis (jį maitina elektrinis aukštojo dažnio generatorius). Jame pritvirtintas darbo įrankis (peilis, grąžtas, sriegtuvas) virpina abrazyvų suspensija tepamą apdirbamos detalės paviršių; vyksta paviršiaus erozija, dėl to sparčiau nuimama drožlė, lengviau apdirbama.

Įrankio darbinę jėgą užtikrina staklių hidraulinė sistema. Apdirbimo proceso metu jėga kinta nuo 1 N (baigiamasis apdirbimas) iki kelių šimtų niutonų (paruošiamasis apdirbimas).

Gaminamos universaliosios (štampams, presformoms ir sudėtingos konfigūracijos detalėms tiksliai ir glotniai apdirbti, detalėms žymėti, skylėms gręžti) ir specializuotosios (sriegiui įsriegti) ultragarsinio apdirbimo staklės.



a



b



c

5.46 pav. Ultragarsinio apdirbimo staklės ir suklys: *a* – 3-ašių *DMS35 Ultrasonic*; *b* – 5-ašių *DMS70-5 Ultrasonic*; *c* – ultragarsinis suklys (*špindelis*)

5.6.2. Kietų medžiagų ultragarsinis apdirbimas

Ultragarsas plačiai naudojamas detalėms iš sunkiai apdirbamų medžiagų apdirbti. Tokiems darbams taip pat labai sėkmingai naudojamas ir elektroerozinis (elektrokibirkštinis, elektroimpulsinis) apdirbimas. Tačiau ultragarsu, skirtingai nuo elektroerozinių apdirbimo būdų, galima apdirbti ne tik elektrai laidžias, bet ir izoliacinėmis savybėmis pasižyminčias medžiagas.

Kriterijus, kuriuo vadovaujantis gali būti nustatoma, ar medžiaga tinka apdirbti ultragarsu, yra trapumo koeficientas k_b , išreiškiamas atsparumo šlyčiai ir atsparumo atplėšimui santykiu. Kuo šis koeficientas didesnis, tuo labiau medžiaga tinkama apdirbti ultragarsu. Pavyzdžiui, kai $k_b \geq 2$, šiai grupei priklauso stiklas, kvarcas, keramika, sitalas; kai $1 < k_b < 2$, – grūdintas, įanglintas, azotintas plienas, kietieji lydiniai ir kt. Apdirbamos ultragarsu šios medžiagos beveik nepatiria plastinių deformacijų (kietoms medžiagoms būdingas ištrupėjimas) arba jos labai mažos. Minkštas medžiagas, kurių $k_b \leq 1$ (mažaanglis plienas, spalvotieji metalai ir kt.), netikslinga apdoroti ultragarsiniais metodais, kadangi nepasiekiamas norimas efektas (nupjaunamo metalo tūrio vienetui sunaudojama labai daug energijos plastiškai deformuoti).

Detalių apdirbimo ultragarsu operacijos:

- kai apdirbama detalė nejuda – fasoninių kiaurųjų ir aklinių skylių formavimas, išorinių paviršių profiliavimas, graviravimas, kreivų ašių skylių sudarymas;
- kai apdirbama detalė juda įrankio atžvilgiu – tekinimas, frezavimas, šlifavimas, sriegio įpjovimas, pjaustymas ir kt.

5.6.2.1. Kiaurųjų ir aklinių skylių formavimas

Įrankis, veikiamas ultragarsinių virpesių ir pastovios spaudimo jėgos abrazyvinės suspensijos aplinkoje, palaipsniui įgilinamas į apdirbamą detalę ir formuoja joje skylę, kurios forma ir konfigūracija atitinka įrankio formą ir konfigūraciją. Toks įrankis, sujungtas su virpesių koncentratoriumi, dar vadinamas akustiniu įrankiu. Jis neturi pjovimo briaunos ir juda tik vertikaliai apdirbamo paviršiaus normalės kryptimi.

Jeigu įrankis yra cilindro formos, tokią operaciją galima vadinti gręžimu. Šiuo būdu gaunamų skylių skersmuo siekia 0,1–100 mm, maksimalus gylis – iki 30–40 mm.

Ultragarsinis apdirbimas naudojamas šampų iš kietlydinio gamyboje. Po apdirbimo sudėtingos konfigūracijos paviršiai neturi defektų, kurių gali būti apdirbus tuos paviršius elektroeroziniu (elektrokibirkštiniu, elektroimpulsiniu) būdu.

Norint paspartinti skylių sudarymą detalėse iš kietlydinio, rekomenduojama tokia apdirbimo schema:

- *pradinis skylės suformavimas elektroeroziniu būdu*, nes jis yra našesnis už ultragarsinį (elektroeroziniu būdu suformavus pradinę skylę paliekama apie 1 mm užlaida tolimesniam apdirbimui);
- *rupasis skylės apdirbimas ultragarsu*, naudojant stambesnius abrazyvinius grūdėlius (įrankio matmuo 0,25 mm mažesnis už numatomą gauti skylės skersmenį);
- *glotnasis skylės paviršiaus apdirbimas ultragarsu*, naudojant smulkesnius abrazyvinius grūdėlius (įrankio matmuo 0,1 mm mažesnis už numatomą gauti skylės skersmenį);
- *baigiamasis skylės paviršių apdirbimas ultragarsu švelniais režimais*.

Tarpelio tarp apdirbamo paviršiaus ir įrankio kontūrų dydis dažniausiai neviršija pagrindinės frakcijos abrazyvinio grūdėlio 1,5 skersmens.

Ultragarsinis skylės paviršių apdirbimas abrazyvu galimas dėl abrazyvinės suspensijos grūdėlių judėjimo tarp įrankio ir apdirbamojo paviršiaus. Dažniausiai įrankiui suteikiami išilginiai ultragarsiniai virpesiai, rečiau – skersiniai ar apskritiminiai.

Ultragarsinio apdirbimo metu vyksta du procesai:

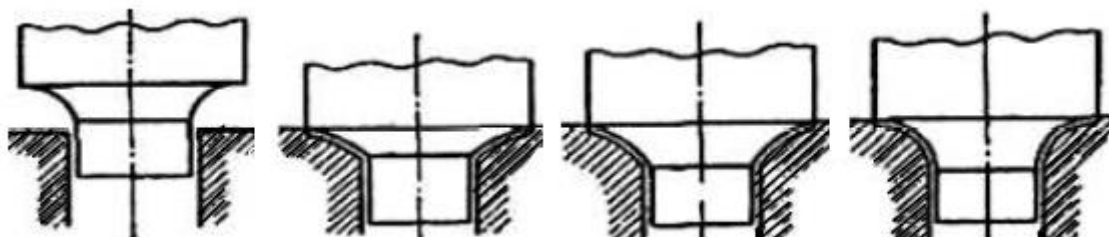
1. Smūginis abrazyvinių grūdėlių įspaudimas į apdirbamą paviršių ir smulkių dalelių nuglemžimas nuo apdirbamo paviršiaus. Operacijos metu pagrindinį pjovimą atlieka abrazyviniai grūdėliai, gaunantys energiją iš įrankio, kuris virpa ultragarsiniu dažniu, galinio paviršiaus. Pagalbinį pjovimą atlieka abrazyviniai grūdėliai, kuriems energiją suteikia įrankio šoninis paviršius.
2. Abrazyvinės suspensijos cirkuliacija darbo zonoje, nuglemžtų apdirbamos medžiagos dalelių ir nudilusių abrazyvinių grūdėlių pašalinimas iš darbo zonos ir naujų, neatšipusių, abrazyvinių grūdėlių tiekimas į darbo zoną.

Norint padidinti apdirbimo ultragarsu našumą, abrazyvinė suspensija turi cirkuliuoti. Naudojami du skirtingi abrazyvinės suspensijos priverstinės cirkuliacijos būdai: vakuuminis ir slėginis (apdirbimo našumas padidėja iki 5 kartų). Apdirbant slėginiu būdu, įrankyje arba apdirbamojoje detalėje yra technologinė skylė, pro kurią abrazyvinė suspensija tiekama į darbo zoną.

Ultragarsinio apdirbimo našumas priklauso nuo

- *abrazyvinių grūdėlių dydžio* – mažėjant abrazyvinių grūdėlių dydžiui, mažėja ir apdirbimo našumas, tačiau kuo smulkesni abrazyviniai grūdėliai, tuo didesnis apdirbimo tikslumas;
- *abrazyvinių grūdėlių koncentracijos suspensijoje* – esant optimaliai koncentracijai, abrazyviniai grūdėliai apdirbamame paviršiuje išsidėsto vienu sluoksniu; esant didesnei koncentracijai, darbo zonoje abrazyviniai grūdėliai gali išsidėstyti keliais sluoksniais ir dėl to ultragarsinio apdirbimo efektyvumas sumažėja.

Įrankio virpesių amplitudė parenkama atsižvelgiant į abrazyvinių grūdelių dydį. Kai virpesių amplitudė yra gerokai didesnė už vidutinį abrazyvinių grūdelių skersmenį, sumažėja apdirbimo našumas, nes vyksta ne tiek paviršiaus apdirbimas, kiek abrazyvinių grūdelių trupinimas. Jei įrankio virpesių amplitudė yra gerokai mažesnė už vidutinį abrazyvinių grūdelių skersmenį, tai taip pat neigiamai atsiliepia apdirbimo našumui, nes smūginės jėgos impulsas, veikiantis abrazyvinius grūdelius, būna nepakankamas grūdeliams įsiskverbti į apdirbamą medžiagą. Optimalus įrankio virpesių amplitudės ir abrazyvinio grūdelio dydžio santykis 0,6–0,8.



5.47 pav. Laipsniškas kietlydinio matricos paviršių formavimas įrankių komplektu

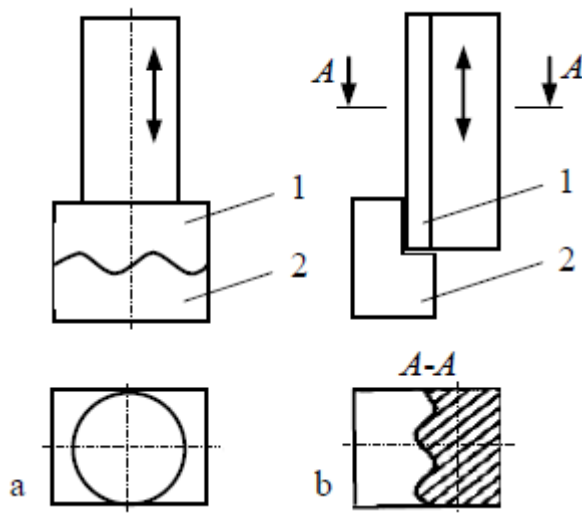
Įrankio prispaudimo jėga F_{st} , nustatoma atsižvelgiant į įrankio skerspjūvio plotą ir konfigūraciją, virpesių amplitudę, abrazyvinių grūdelių dydį, apdirbamos medžiagos savybes. Dažniausiai $F_{st}=20\text{--}200\text{ N}$.

Apdirbant ultragarsu apskritos formos kietlydinio matricas, apdirbamai detalei rekomenduojama suteikti sukamąjį judesį, nes taip išvengiama paviršių apdirbimo defektų dėl kavitacijos. Skylės, suapvalinimai ir kitokie elementai formuojami palaipsniui, naudojant įrankių komplektą (5.47 pav.).

5.6.2.2. Detalės paviršių apdirbimas ultragarsu

Suteikiant apdirbamai detalei pastūmą (išilginę, skersinę) įrankio atžvilgiu, galima atlikti frezavimo, šlifavimo, tekinimo, pjaustymo, graviravimo ir net sriegių įpjovimo operacijas, analogiškas įprastinėms metalo pjovimo operacijoms klasikiniiais įrankiais.

Profiliavimas. Detalių paviršiai profiliuojami įrankiu, kurio galinis arba šoninis paviršiai turi reikiamą profilį (5.48 pav.). Taip dažniausiai apdirbami puansonai iš kietlydinio.



5.48 pav. Detalės paviršių ultragarsinis profiliavimas įrankiais, kurių profilis: *a* – galinis; *b* – šoninis; 1 – įrankis; 2 – apdirbamoji Detalė

Frezavimas. Ultragarsinio frezavimo operacija dažniausiai naudojama formuoti uždaro arba pusiau uždaro profilio kontūrus detalėse iš sunkiai apdirbamų medžiagų (stiklo, keramikos ir kt.), kai nereikia didelio apdirbimo tikslumo.

Tekinimas. Ultragarsinis tekinimas yra analogiškas frezavimo ar plokščiojo šlifavimo operacijoms. Skirtumas toks, kad detalei suteikiamas sukamasis judesys.

Šlifavimas. Ultragarsinio plokščiojo šlifavimo operacija yra analogiška ultragarsinio frezavimo operacijai. Įrankis yra virpinamas apdirbamo paviršiaus normalės kryptimi, detalei suteikiamos reikiamos pastūmos. Į apdirbimo zoną gausiai tiekama abrazyvinė suspensija. Palyginti su įprastinio šlifavimo operacija, gaunamos mažesnės pjovimo jėgos, apdirbtame paviršiuje nebūna mikroįtrūkimų ar prideginimo žymių.

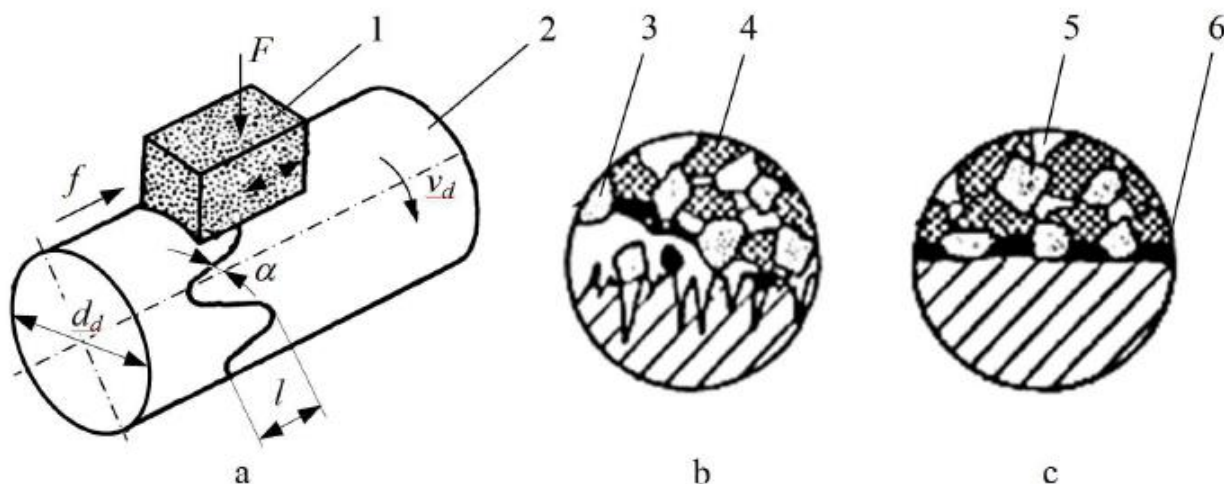
Pjaustymas. Ultragarsinis ruošinių (pvz., iš keramikos, stiklo ir kt. medžiagų) pjaustymas atliekamas įrankiu, kurio forma primena peilį. Peilio storis yra 0,3–0,5 mm.

Sriegių įpjovimas. Ultragarsinis metodas yra vienintelis sriegių įpjovimo kietuose dielektrikuose būdas. Be virpesių įrankiui dar suteikiama pastūma s (lygi sriegio žingsniui p). Todėl įrankis, pamažu įsipjaudamas į detalę, palaipsniui suformuoja sraigtinį paviršių. Sriegis įpjaunamas tuo tiksliau, kuo mažesnė yra virpesių amplitudė ir kuo smulkesni abrazyviniai grūdėliai.

5.6.2.3. Ultragarsinis superfinišavimas

Įprastinis superfinišavimas. Superfinišavimas yra baigiamasis detalių apdirbimo būdas, kai naudojami vienas arba du abrazyviniai (ar deimantiniai) strypeliai. Šiam apdirbimui būdingi švytuojantys judesiai (5.49 pav., *a*) trumpomis eigomis (1–6 mm) ir dideliu dažniu (400–3000 dv.e/min), išilginė abrazyvinio strypelio ar ruošinio pastūma (50–300 m/min), pastovi strypelio

prispaudimo prie detalės jėga ir mažas slėgis apdirbimo zonoje. Detalė sukama apie savo ašį apskritiminiu greičiu 10–100 m/min.



5.49 pav. Superfinišavimas: *a* – įrankio ir detalės darbinių judesių schema; *b* – paviršiaus šiurkštumas prieš superfinišavimą; *c* – paviršius po superfinišavimo; 1 – abrazyvinis strypelis; 2 – detalė; 3 – grūdėlis; 4 – rišiklis; 5 – tuštuma; 6 – šlamas; d_d – detalės skersmuo; l – strypelio švytavimo eiga; F – strypelio prispaudimo jėga; v_d – detalės apskritiminis greitis; $s_{iš}$ – strypelio (detalės) išilginė pastūma; α – sinusoidinio pėdsako kampas

Superfinišuojant abrazyvinis strypelis spaudžiamas prie detalės, kurios paviršius yra šiurkštus (5.49 pav., *b*). Padidėjęs slėgis išplėšia labiausiai apkrautus grūdėlius. Strypelis pradeda keisti matmenis ir formą. Apdirbimo produktai yra pašalinami tepimo aušinimo skysčiu. Dėl savaiminio galandimosi didėja detalės ir strypelio kontakto plotas, mažėja tarpelis tarp jų, todėl apdirbimo produktai vis sunkiau pašalinami iš apdirbimo zonos. Nors šlamo pašalinimo sąlygos sunkios, strypelis kurį laiką intensyviai šalina užlaidą visu pjaunančiuoju paviršiumi. Mažėja grūdelių apkrova ir paviršiaus šiurkštumas. Susidaręs šlamas išsidėsto paviršinio sluoksnio ir strypelio tuštomose. Kai mikronelygumų keteros nugludintos (5.49 pav., *c*), pjovimo procesas nevyksta.

Superfinišavimas naudojamas detalių, dirbančių slydimo ir riedėjimo trinties sąlygomis, savybėms pagerinti (šiuo procesu galima sumažinti paviršiaus šiurkštumą iki $R_z=0,1-0,05 \mu\text{m}$), detalės formos tikslumui padidinti, defektiniam paviršinio metalo sluoksniui, susidariusiam šlifuojant, pašalinti ir paviršiniam sluoksniui sustiprinti.

Įprastinio ir ultragarsinio superfinišavimo palyginimas. Apdirbant ruošinį ultragarsu, nuo užlaidos šalinimo iki šiurkštumo mažinimo pereinama slopinant virpesius (juos nuslopinus, kieti strypeliai nustoja pjauti metalą). Mažėjant ruošinio šiurkštumui, mažėja metalo šalinimo sparta ir abrazyvinio strypelio dilimo intensyvumas.

Superfinišavimui panaudojus ultragarsinius virpesius, sumažėja strypelio slėgis į ruošinį, abrazyviniai strypeliai beveik neapsivelia apdirbtos medžiagos dalelėmis, todėl galima apdirbti ne tik kietų, bet ir minkštų medžiagų paviršių. Pastebėta, kad dėl ultragarsinių virpesių padidėja nupjaunamo metalo sluoksnis (kartu ir abrazyvinio strypelio dilimas), tačiau apdirbant tąsias medžiagas, ultragarsiniai virpesiai mažina proceso našumą. Tai aiškinama tuo, kad dėl aukštojo svyravimų dažnio didžioji abrazyvinių grūdelių dalis pereina savo pėdsaku (mažėja pjovimo tikimybė).

Panaudojus ultragarsą superfinišavimui, našumas, palyginti su įprastiniu superfinišavimu, padidėja 2–3 kartus, kadangi 18–44 kHz dažnio ir 1–5 μm amplitudės virpesiais valomas abrazyvinis strypelis. Ultragarsiniu superfinišavimu per vieną operaciją galima pasiekti paviršiaus šiurkštumą $Ra=0,02\text{--}0,08\ \mu\text{m}$ nepriklausomai nuo jo pradinės vertės. Superfinišavimui paliekama 0,005–0,01 (0,03) mm užlaida.

5.6.2.4. Paviršinio sluoksnio sukietinimas

Sukietinimo ir glotniojo išbaigimo metu įrankiui (dažniausiai gaminamas iš kietlydinio, gamtinio ar sintetinio deimanto) suteikus ultragarsinius virpesius, paviršinis sluoksnis yra sukietinamas ir jame atsiranda liekamųjų gniuždymo įtempių.

Po sukietinimo ir glotniojo išbaigimo paviršiaus šiurkštumas sumažėja 8–10 kartų, mikrokietis padidėja 20–50 %, o paviršių atsparumas dilimui padidėja apie 1,5 karto. Tai didina detalių atsparumą nuovargiui.

Šis metodas taikomas užgrūdintam plienui, įrankiams ir detalėms iš kietlydinio, mažo standumo ir plonomis dangomis dengtiems detalės paviršiams apdirbti.

5.6.3. Ultragarsu apdirbtų paviršių šiurkštumas ir tikslumas

Ultragarsu apdirbto paviršiaus šiurkštumas priklauso nuo abrazyvinių grūdelių stambumo, apdirbamos medžiagos fizikinių mechaninių savybių, įrankio virpesių amplitudės, įrankio darbinio paviršiaus šiurkštumo, skysčio, kuris naudojamas abrazyvinei suspensijai paruošti, rūšies ir kt. Apdirbant ultragarsu, nei apdirbama detalė, nei įrankis neįkaista, paviršiniame sluoksnyje nebūna mikroįtrūkimų ir pridegimų.

Paviršiaus šiurkštumas yra tiesiogiai proporcingas vidutiniam abrazyvinių grūdelių dydžiui. Kuo mažesni abrazyviniai grūdeliai, tuo glotniau apdirbamas paviršius.

Didinant įrankio virpesių amplitudę, apdirbamo paviršiaus šiurkštumas didėja, nes, padidėjus virpesių amplitudei, padidėja abrazyvinius grūdelius veikiančios jėgos. Abrazyviniai grūdeliai giliau įsiskverbia į apdirbamą paviršių ir padidina jo šiurkštumą.

Jei vietoj vandens abrazyvinei suspensijai paruošti naudojamas mašininis tepalas, padidėja apdirbto paviršiaus glotnumas, tačiau sumažėja apdirbimo našumas, lėtesnė abrazyvinės suspensijos cirkuliacija.

Ultragarsu apdirbtų paviršių tikslumas. Skylių matmenų tikslumas priklauso nuo įrankio tikslumo, jo formos kopijavimo tikslumo, skersinių virpesių, nuo įrankio nudilimo ir kt. Paprastai po ultragarsinio apdirbimo skylės geometrinės formos iškraipymai neviršija 10 μm.

Įrankis dyla intensyviau, kai į apdirbimo zoną nepakankamai gausiai tiekama abrazyvinė suspensija ir kai iš apdirbimo zonos nepakankamai gerai pašalinamos atliekos. Pastovi prispaudimo jėga ir virpesių amplitudė didesnės įtakos įrankio dilimui neturi. Apdirbimo tikslumas mažėja:

- dėl įrankį veikiančių žalingų skersinių virpesių, nes dėl to iškraipomi skylės matmenys ir forma (dažniausiai skersiniai virpesiai atsiranda dėl ultragarsinio apdirbimo staklių ir jų įtaisų geometrinių netikslumų, netinkamo kai kurių mazgų surinkimo ir kitų priežasčių);
- didėjant abrazyvinių grūdelių matmenims ir apdirbamos skylės gyliui;
- apdirbant medžiagas, kurioms būdinga stambiagrūdė struktūra (paviršiaus ultragarsinio apdirbimo metu ištrupinamos stambesnės dalelės).

5.6.4. Ultragarsinių virpesių panaudojimas technologiniams procesams intensyvinti

Ultragarsinių virpesių panaudojimas pjovimo procesuose. Ultragarsinius virpesius panaudojus įprastiniuose mechaninio apdirbimo technologiniuose procesuose, kai detalių paviršiai yra apdirbami ašmeniniais įrankiais, pagerėja apdirbamo paviršiaus kokybė, padidėja apdirbimo tikslumas, sumažėja pjovimo jėgos ir kt. Dėl ultragarsinių virpesių poveikio pasikeičia pjovimo proceso kinematika, periodiškai keičiasi pjovimo greičio vektoriaus dydis ir kryptis, pjovimo įrankio kinematiniai kampai, nupjaunamos drožlės storis, sumažėja sukimo momentas ir ašinė jėga ir kt.

Ultragarsiniais virpesiais veikiant frezą, palengvėja pjovimo sąlygos. Dėl to padidėja frezos patvarumas, pjovimo briaunos ilgiau nepraranda pjovimo savybių.

Ultragarsiniai virpesiai pjovimo procese ypač efektyvūs gręžiant ir sriegiant nedidelio skersmens skylės titano ir nerūdijančio plieno detalėse. Dirbant įprastiniu būdu, t. y. nesant ultragarsinių virpesių, gręžti ir sriegti mažų skersmenų skylės kietose medžiagose yra gana sunku, gali lūžti pjovimo įrankis.

Dirbant pjovimo įrankiais, kurių pjovimo briauna yra iš sintetinio deimanto, abrazyvinės suspensijos į darbo zoną galima netiekti (užtenka vandens), nes abrazyvinius grūdelius pakeičia ištrupėjusios sintetinio deimanto dalelės. Naudojant sintetinio deimanto pjovimo įrankius, galima kelis kartus padidinti darbo našumą, pasiekti didesnę apdirbimo tikslumą ir išgręžti bei įsriegti mažo skersmens ir galias (skylės gylis didesnis kaip $10 \cdot D$, čia D – skylės skersmuo) skylės.

Ultragarsinių virpesių panaudojimas skysčiuose ir dujose. Dažų įsigėrimo gylis ir jų ryškumas priklauso nuo dalelių dydžio. Dažų dalelės yra įvairaus dydžio: apie 50 % dalelių mažesnės už mikroną, o apie 20 % dalelių yra iki 20 μm dydžio. Panaudojus ultragarsą, gaunama 90 % smulkesnių už mikroną dalelių ir tik 2 % didesnių kaip 20 μm . Tokiu būdu galima smulkinti metalų miltelius, abrazyvą, keramiką ir kitas medžiagas. Be to, ultragarsu galima smulkinti ir skysčių daleles. Šis principas taikomas suspensijų ir emulsijų gamyboje maišant tarpusavyje nesimaišančias medžiagas.

Difuzinių procesų intensyvinimas. Šiuolaikinėse technologijose plačiai taikoma skysčių difuzija į porėtas medžiagas. Prie tokių procesų priskiriamas medžiagų prisotinimas ir dažymas, odų dažymas ir prisotinimas, pūkų dažymas, laidų izoliacijos prisotinimas, medžiagų plovimas ir kt. Šie procesai vyksta labai lėtai. Pavyzdžiui, į kai kurių rūšių odas tirpalas įsigeria tik per 120 valandų. Toks ilgas procesas labai apsunkina gamybos ciklą, reikia talpių ir didelių įrenginių. Panaudojus ultragarsą, skysčio įsotinimo procesas paspartėja apie 8 kartus. Todėl, apžiūrėjus odos pjūvį po 16 valandų sotinimo, matyti, kad, nenaudojant ultragarso, prisotinti būna tik odos išoriniai sluoksniai, o per vidurį lieka neprisotintas ruožas. Tuo tarpu naudojant ultragarsą, jau po 16 valandų oda būna visiškai prisotinusi.

Ultragarsas ne tik paspartina dažymo procesą, bet ir leidžia giliau įsiskverbti dažų dalelėms. Dėl to dažai geriau sukimba su medžiaga. Be to, naudojant ultragarsą, galima dažyti ir sunkiai dažomas medžiagas: nailoną, kaproną ir kt. Naudojant ultragarsą, dėl kavitacijos paspartėja medžiagų plovimo procesas (net iki 18 kartų).

Aerolio dalelių ir dujinių tarpų šalinimas. Dėl įvairių priežasčių mažos kietųjų kūnų ar skysčių dalelės patenka į orą ir jį užteršia. Taip susidaro vadinamieji aeroliai. Tokios mažos dalelės ilgai nenusėda, o kuo jos mažesnės, tuo ilgiau gali išbūti aplinkoje. Aerolio pavyzdys gali būti dūmai, kurie susideda iš nesudegusių kietų dalelių.

Panaudojus ultragarsą paaiškėjo, kad jo veikiamos mažos kietos dalelės, esančios ore, sukimba ir sudaro didesnes daleles, kurias galima surinkti filtrais. Veikiamos ultragarso sulimpa ne tik kietos, bet ir dujų dalelės. Pavyzdžiui, dujų burbuliukai susidaro virinant stiklą, liejant metalus ir kt. Ertmių susidarymas blogina medžiagos savybes. Naudojant ultragarsą virinimo ar liejimo procese, dujų dalelės sulimpa, o sulipusios lengviau pasišalina iš lydalo. Bandymai parodė, kad, paveikus ultragarsu aliuminio lydinį valandą laiko prieš sustingimą, iš jo beveik pasišalina nereikalingos dujos.

Dujų dalelių sukibimas, leidžiant per skystį ultragarsą, priklauso nuo ultragarso galios. Kai ultragarso galia N mažesnė už kavitacijos ribą N_k ($N < N_k$), dujos beveik nepašalinamos. Padidinus galią ($N \gg N_k$), gerokai suaktyvėja dujų šalinimo iš lydalo procesas.

5.6.5. Ultragarsinis valymas

Ultragarso panaudojimas valymo procesuose pagrįstas jo poveikiu skystoms terpėms. Ultragarsas skysčiuose sukelia intensyvius aukštojo dažnio tampruosius virpesius. Ypatingą reikšmę turi kavitacijos reiškiniai, didelių pagreičių valymo terpėse atsiradimas, šiluminiai efektai ir kt. veiksniai. Kai kuriais atvejais, pavyzdžiui, valant kontaktiniu būdu, ultragarsiniai virpesiai sukeliami valomoje detalėje. Nešvarumų plėvelė ardoma, atskiriama ir ištirpinama dėl terpės cheminio aktyvumo ir veiksnių, susidarančių dėl akustinio lauko poveikio terpei.

Nešvarumų šalinimo būdai: plovimas, cheminis tirpdymas ir mechaninis poveikis. Dažnai šie būdai taikomi kartu. Ypač efektyvus mechaninio poveikio derinimas su plovimu ir tirpymu.

Ultragarsinis valymas paprastai trunka nuo kelių sekundžių iki 15 minučių ir priklauso nuo nešvarumų pobūdžio ir jų kiekio valomo paviršiaus ploto vienetu. Jeigu detalės paviršiuje nešvarumų yra daugiau kaip 200 mg/m², ultragarsinį valymą tikslinga derinti su cheminiais būdais. Tokiu atveju aukštai paviršiaus kokybei pasiekti ultragarsinį lauką reikia naudoti tik paskutinėje valymo stadijoje.

5.6.5.1. Kavitacinio valymo mechanizmas

Žinoma, kad garsas sukelia slėgį ir kuo garsas intensyvesnis, tuo didesnis jo slėgis. Viena iš unikalių skysčio savybių yra gebėjimas atlaikyti didelius slėgius (hidrauliniuose presuose šie slėgiai siekia apie 0,01–0,2 KPa, arba 10–200 atmosferų), tačiau skysčiai labai neatsparūs tempimo įtempiams.

Pereinant garso bangos fazei, skystis retėja ir trūkinėja. Trūkimo vietose susidaro maži dujų burbuliukai, vadinami *kavitaciniais burbuliukais*. Maži burbuliukai susilieja į didesnius, o šie, perėjus bangai, susitraukia. Susitraukimo metu susidaro vietiniai slėgiai, siekiantys šimtus atmosferų. Dėl šių slėgių susidaro didelės galios smūginė banga, kuri paviršiuje, esančiame netoli susitraukiančių burbuliukų, sukelia mechaninį poveikį. Nesusitraukiantys kavitaciniai burbuliukai pradeda virpėti, prasiskverbia į tarpą tarp švaraus paviršiaus ir nešvarumų arba į paties nešvarumo tarpelius ir virpamaisiais judesiais atplėšia jį nuo detalės paviršiaus arba suskaldo.

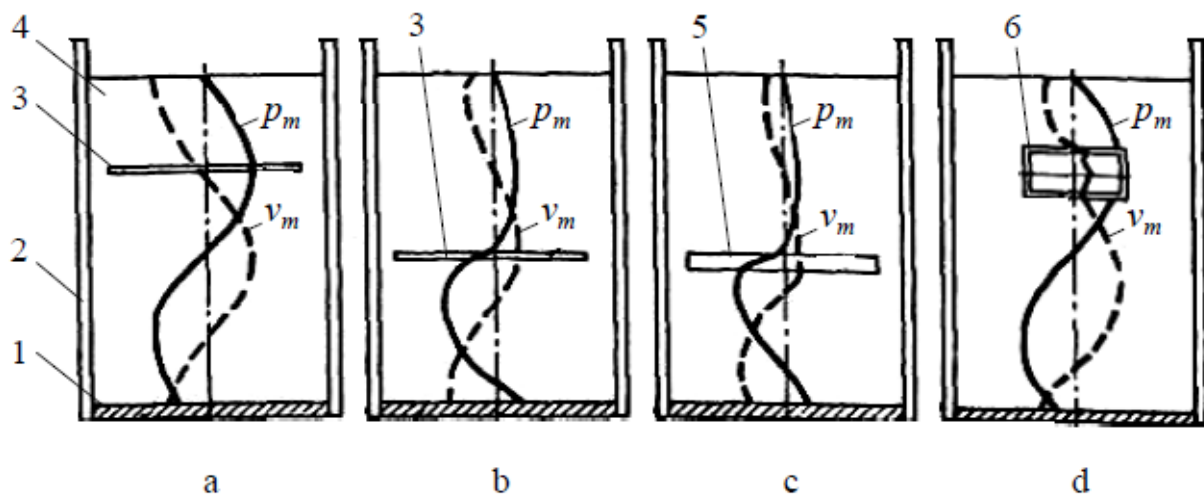
Naudojant valymui ultragarsą, didelę reikšmę turi valomų detalių dydis, užteršimo laipsnis ir pobūdis. Nustatyta, kad, leidžiant pro skystį dujas, palengvėja kavitacinių burbuliukų susidarymas, tačiau kartu sumažėja jų susitraukimo intensyvumas ir kavitacinė erozija. Jos intensyvumas priklauso nuo skysčio temperatūros. Pakėlus valymo terpės temperatūrą, padidėja garų ir dujų slėgis kavitaciniuose burbuliukuose ir sumažėja burbuliukų susitraukimo jėga. Kartu sumažėja dujų tirpumas vandenyje, todėl padidėja susitraukiančių kavitacinių burbuliukų skaičius ir smūgių skaičius per laiko vienetą.

Paprastos formos (neturinčios aklinių skylių ir griovelių) detalės gali būti nuvalytos įrenginiuose, dirbančiuose 18–25 kHz dažniu. Sudėtingos formos (turinčios kreivųjų paviršių, aklinių skylių ir griovelių) detalės ne visada gerai nuvalomos apdirbant šiais dažniais, nes tokio

dažnio bangų ilgiai skystyje susilygina su detalių dydžiais. Intensyvaus garso slėgio sritis, dirbant 18–25 kHz dažniu, yra arčiau spinduliavimo šaltinio, o toliau nuo jo greitai nuslopsta. Todėl efektyviausiai valoma tik kelių dešimčių milimetrų atstumu nuo šaltinio. Valymo procese panaudojus tampriuosius aukštojo dažnio (200–1600 kHz) virpesius, gerokai sutrumpėja ultragarsinių virpesių banga, padidėja darbinės terpės dalelių pagreitis, todėl valymo procesas gali vykti esant didesniai atstumui nuo spinduliavimo šaltinio.

Kartais naudinga valomąjį paviršių virpesiais veikti ne nuolat, bet darant ilgesnius tarpus tarp impulsų. Dirbant 16–24 kHz dažniais, nėra didelio skirtumo, kokio pobūdžio ultragarsą naudoti, tačiau dirbant 300–500 kHz dažniais, impulsinis režimas yra efektyvesnis nei pastovus. Kai galios vienodos, valymas, dirbant impulsiniu režimu, trunka trumpiau nei dirbant pastoviu režimu. Valymo procesą galima paspartinti pakaitinus detalę iki valymo skysčio temperatūros.

Valymo intensyvumas taip pat priklauso nuo detalės padėties ultragarsinėje vonioje (5.50 pav.). Geriausia, kai detalė yra slėgių verpete (5.50 pav., *a*), nes įprastinėmis sąlygomis intensyvesnė kavitacija esti tose vietose, kur dideli slėgių pokyčiai p_m .



5.50 pav. Išilginių tampriųjų virpesių greičio ir svyruojančio slėgio amplitudžių pasiskirstymas ultragarsinėje vonioje: *a* – detalė slėgių verpete; *b* – detalė greičio verpete; *c* – masyvi detalė slėgių verpete; *d* – tuščiavidurė detalė slėgių verpete; v_m – tampriųjų virpesių greičio amplitudė (punktyrinė linija); p_m – svyruojančio slėgio amplitudė (išsitiesinė linija); 1 – virpesių šaltinio diafragma; 2 – vonios sienelės; 3 – plokštelės pavidalo detalė; 4 – skystis; 5 – masyvi detalė; 6 – stačiakampė tuščiavidurė detalė

5.6.5.2. Valymo terpių parinkimas

Valymo terpę parenkama atsižvelgiant į nešvarumų rūšį: dulkės ir šlamas po ėsdinimo, riebalinės plėvelės, lako plėvelės, dažai, poliravimo pastos, oksidų plėvelės, korozijos produktai, nuodegos, dervų nuosėdos ir kt. Ultragarso lauke teršalų plėvelė gali būti pašalinama mechaniškai,

vykstant kavitacijai ir cheminiams procesams tarp nešvarumų ir valymo terpės, veikiant akustinėms srovėms ir kt.

Teršalai gali būti klasifikuojami pagal šiuos požymius:

- pagal nešvarumų savybę atlaikyti mikrosmūgines apkrovas – kavitacijai atsparūs ir neatsparūs;
- pagal nešvarumų plėvelės ir detalės medžiagos ryšio stiprį – tvirtai ir silpnai susijungę su valomu paviršiumi;
- pagal nešvarumų ir valymo terpės cheminę sąveiką – chemiškai reaguojantys su valymo skysčiu ir nereaguojantys (šiuo atveju terpė, nuvalydama nuo detalės paviršių nešvarumus, neturi chemiškai reaguoti su detalės medžiaga arba cheminė sąveika turi būti gerokai lėtesnė už patį valymo procesą ir neturi sukelti detalės ar medžiagos fizikinių mechaninių savybių pažeidimų).

Jeigu nešvarumai tvirtai susijungę su valomuoju paviršiumi, chemiškai nereaguoja su valymo terpe ir jei jų kavitacinis atsparumas lygus detalės medžiagos kavitaciniam atsparumui ar jį viršija, tai tokių nešvarumų negalima pašalinti ultragarsu.

Ultragarsiniam valymui naudojamos valymo terpės: šarminiai valymo tirpalai, neutralūs valymo priemonių tirpalai, rūgštiniai tirpalai, emulsiniai ir dvifaziai tirpalai ir emulsijos – yra parenkamos atsižvelgiant į užterštumo pobūdį, valomos detalės medžiagą, jos konstrukcines savybes ir kt.

Neriebalinius nešvarumus nuo detalių geriausia valyti vandenyje, silpnai pučiant pro jį orą ar kitas dujas. Tai paspartina ultragarsinį valymą.

Riebalinių teršalų ultragarsinis valymas vandenyje yra neefektyvus, todėl valymo skystį reikia pakeisti į chemiškai aktyvų. Be to, ultragarso lauko parametrus reikia parinkti tokius, kad susidarytų intensyvios akustinės srovės.

Galvaninė danga padengtoms detalėms valyti naudojami organiniai tirpikliai (freonas 113, trichloretilenas ir kt.). Jais valant nereikia detalių apsaugoti nuo korozijos, jas lengviau išdžiovinti. Organiniais tirpikliais negalima nuvalyti plėvelių, turinčių didelį kavitacinį atsparumą, chemiškai nereaguojančių su valymo skysčiu (poliravimo pastos ir kt.). Panašioms nešvarumams valyti geriau naudoti vandeninius, šarminius arba neutralius tirpalus su paviršių aktyvinančiais priedais. Naudojant tokius tirpalus formuojasi didesnio erozinio aktyvumo kavitacinė sritis ir gerokai efektyviau mechaniškai ardoma plėvelė.

Gamyboje įvairios metalinės detalės valomos daugiakomponenčiais šarminiais tirpalais, sumaišytais iš kelių skirtingų šarminių druskų ir paviršių aktyvinančių priemonių. Šarminių valymo priemonių gamybai naudojami tokie šarminiai junginiai: natrio šarmas (natrio hidroksidas) $NaOH$;

natrio karbonatas Na_2CO_3 ; natrio metasilikatas Na_2SiO_3 (arba $Na_2O \cdot SiO_2$); natrio ortosilikatas Na_4SiO_4 ; natrio trifosfatas Na_3PO_4 ; natrio pirofosfatas $Na_4P_2O_7$; boratai $Na_2B_4O_7$ arba $NaBO_2$ ir kt.

5.6.5.3. Ultragarsinio valymo būdai

Valymo efektyvumas priklauso nuo dažnio ir ultragarsinių virpesių intensyvumo, tinkamo keitiklio parinkimo, jo galios, ultragarsinių virpesių perdavimo į vonią sistemos, kinematinės įtaisų schemos, švaraus valymo skysčio tiekimo, galimybės regeneruoti naudojamą terpę ir kt.

Ultragarsinio valymo būdai:

- Panardinimas – naudojamas mažų matmenų detalėms valyti. Detalės sudedamos į tinklelius ir panardinamos į valymo skystį kuo arčiau šaltinio. Geriausia tai atlikti, prijungus prie detalių krepšio vibratorių arba vibruojantį tinklinį būgną.
- Nepertraukiamai nuoseklus – valoma dvejopai: a) ultragarso šaltinis perkeliamas detalių atžvilgiu; b) detalės juda ultragarso šaltinio atžvilgiu. Juostos, lapai, vielos valomi antruoju būdu, naudojant įvairius transportavimo įrenginius.
- Spinduliavimo šaltinis yra valymo zonoje – naudojamas sunkiai pasiekiamoms vietoms, aklinosioms skylėms, kanalams apdirbti. Dažniausiai valoma rankomis, todėl tokie įrenginiai turi būti lengvi ir kompaktiški.
- Kontaktinis – taikomas vidiniams detalių paviršiams valyti, kai nešvarumų storis ne didesnis kaip 2 mm. Ultragarsinio valymo metu ultragarsiniai virpesiai detalėje sukeliami akustinio kontakto tarp detalės ir keitiklio metu. Detalė tampa antriniu spinduliavimo šaltiniu, todėl valymo procesas vyksta ne tik dėl sukkelto ultragarso skystyje, bet ir dėl pačios detalės virpesių, kurie sukelia nešvarumų sluoksniavimąsi. Apdirbant didelių matmenų detales, reikia keisti keitiklio vietą, nes sumažėja ultragarsinių virpesių intensyvumas dėl cilindrinio ultragarso bangos pobūdžio.

5.8. Elektronpluoštis apdirbimas

Apdirbimas elektronų pluoštu pagrįstas tuo, kad elektronų pluošto kinetinė energija paverčiama šilumine. Keičiant elektronų greitį ir elektronų pluošto tankį, galima labai sukoncentruoti šiluminę energiją ir ją nukreipti į bet kurį apdirbamo paviršiaus tašką. Tokia energija medžiagas galima lydyti, suvirinti ([4.7 poskyris](#)), garinti ir kt.

Elektronpluoščio apdirbimo įrenginiai dirba impulsiniu režimu. Impulsų trukmė yra 10^{-4} – 10^{-6} s, jų dažnis 50–6000 Hz. Elektronų pluoštas nukreipiamas į apdirbamą ruošinį labai mažame plotelyje (pluošto skersmuo tik keli mikrometrai). Proceso temperatūra siekia 6000 °C, o 1 μm atstumu nuo spinduliuotės krašto ji ne aukštesnė kaip 300 °C.

Apdirbimas elektronų pluoštu plačiai taikomas tokiose technologinėse operacijose, kaip lydymas (vakuume lydoma, kai reikia gauti ypač grynus metalus), garinimas, terminis apdorojimas, skylių pramušimas (perforavimas), smulkių detalių, fasoninių skylių ir griovelių išpjovimas (pvz., gaminant filjeres), karščiui atsparaus plieno apdirbimas, rubino, kietlydinio, deimanto apdirbimas ir kt.

Šiuo būdu išpjaunamos išėmos ir grioveliai labai plonuose ruošiniuose (plėvelėje, folijoje), gręžiamos mažo skersmens (nuo 1 mm iki 10 μ m) skylės, apdirbamos sunkiai pjaustomos ir lengvai besioksiduojančios medžiagos (apdirbama vakuume), padengiami detalių paviršiai nuo kelių mikrometrų iki milimetro dešimtųjų dalių storio danga.

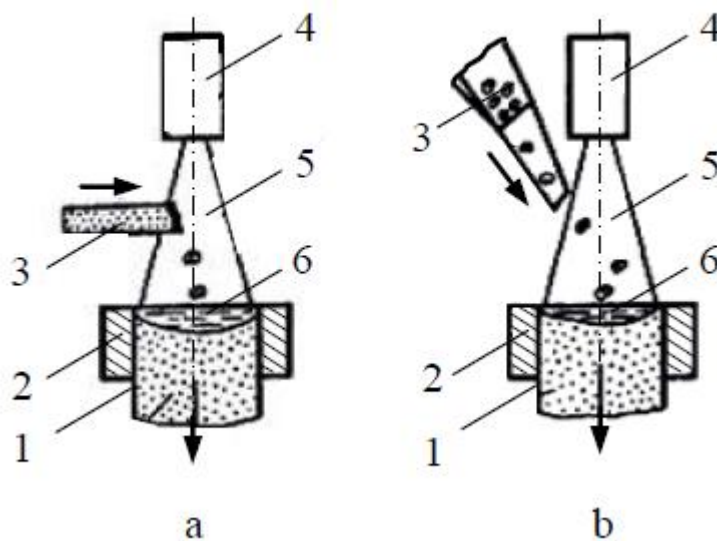
Elektronų pluoštą nukreipus į apdirbamą detalės paviršių, jis, veikiamas didelės energijos mikroimpulsų, įkaista iki austenitinės sandaros tiksliai nustatytame plote. Nutraukus kaitinimą, paviršius užsigrūdina ir sukietėja. Paviršiaus kietis po apdirbimo elektronų pluoštu būna 1–2 vienetais pagal Rokvelo skalę didesnis negu po įprastinio grūdinimo. Be to, dėl martensito susiformavimo, paviršiuje susidaro liekamieji gniuždymo įtempiai, todėl padidėja atsparumas dilimui. Elektronų pluoštu termiškai apdorojami kumšteliai, tvirtinimo detalės, darbiniai guolių paviršiai, pjovimo įrankiai, alkūniniai velenai, jungiamosios konvejerių grandys, vožtuvai ir kt.

5.8.1. Elektronpluoštis lydymas

Elektronpluoštis lydymas yra gerokai pranašesnis už kitus lydymo vakuume būdus (pavyzdžiui, indukcinį arba lankinį): lydymo metu labiau įkaitinamas skystas metalas, lengviau pašalinamos priemaišos, vyksta fiziniai cheminiai procesai, kurie, lydant kitais būdais, nespėja įvykti iki galo arba apskritai neįmanomi.

Lydant metalą vakuume, jame gerokai sumažėja dujų (ypač deguonies), kaitinamos suskyla kai kurios žalingos priemaišos (nitridai, karbidai, oksidai), t. y. vyksta perlydomo metalo rafinavimas (metalas turi mažiau nemetalinių intarpų).

Dauguma lydinių, kurių pagrindą sudaro titanas, volframas, molibdenas, niobis ir kiti chemiškai aktyvūs metalai, yra išlydyti vakuume.



5.57 pav. Elektronpluoštis perlydymas: *a* – perlydomas strypas; *b* – perlydoma biri medžiaga (milteliai, granulės); 1 – liejinys; 2 – tiglio; 3 – perlydomas metalas; 4 – elektroninis prožektorius; 5 – elektronų pluoštas; 6 – skystas metalas

Liejiny 1 (**5.57 pav.**) traukiamas iš tiglio 2 tam tikru greičiu ir pašalinamas iš vakuuminės darbo kameros. Perlydomas metalas gali būti tiekiamas strypo (**5.57 pav.**, *a*) arba miltelių (granulių) pavidalu (**5.57 pav.**, *b*).

Pramonėje metalas elektronų pluoštu lydomas labai svarbioms konstrukcijoms ir detalėms. Kadangi elektronpluoštis lydymas labai pagerina metalo savybes, šis būdas naudojamas plienui lydyti. Galia siekia 1200 kW, gaminami iki 12 tonų liejiniai. Tokie liejiniai naudojami turbinų velenams ir mentelėms, greitaeigiams guoliams ir kt. gaminti.

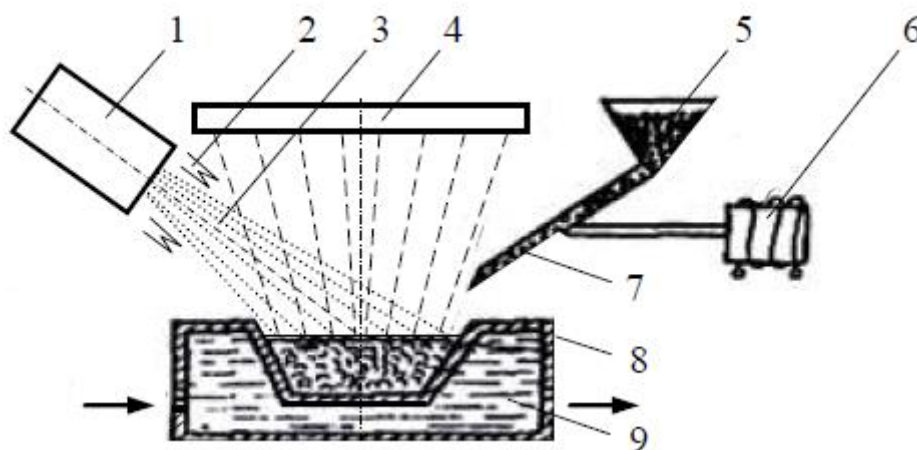
5.8.2. Elektronpluoštis medžiagų garinimas

Medžiagų garinimas elektronų pluoštu plačiai taikomas plonų dangų technologijoje. Skirtingai nuo kitų dengimo būdų, kuriuose garintuvo paviršius kaitinamas per tiglio sienelę arba aukštatemperatūriniu kaitinimo elementu, elektronų pluoštas tiesiogiai kaitina dengiamosios medžiagos paviršių (**5.58 pav.**).

Kaitinant didelio intensyvumo šaltiniu, medžiaga išgaruoja vakuumo kameroje ir nusėda ant iš anksto pašildyto padėklo (dengiamosios detalės). Nusodinimo greitis gali būti skirtingas (vidutiniškai 30 nm/min.). Kadangi elektronų pluoštu garinama vakuume, gaunamos labai grynios dangos, kurių geresnės adhezinės savybės.

Paprastos vieno elemento dangos gali būti gautos naudojant vieną garintuvą. Išgarinant komponentus atskirai, galima gauti daugiasluoksnes dangas.

Dengiamas padėklas (dengiamoji detalė) nuo garintuvo paviršiaus, įvertinus dalelių sklaidos ant padėklo kampą, turi būti ne toliau kaip 250 mm. Tokiu atveju beveik visa garinamoji medžiaga patenka ant padėklo.



5.58 pav. Dangos užgarinimo įrenginys: 1 – elektroninis prožektorius; 2 – pluošto kreipimo sistema; 3 – elektronų pluošto srautas; 4 – padėklas (dengiamoji detalė); 5 – bunkeris su dengiamąja medžiaga; 6 – vibratorius; 7 – latakas; 8 – vandeniu aušinamas tiglis; 9 – skysta garinimo medžiaga

Elektronpluoštis medžiagų garinimas naudojamas mikroelektronikoje dangoms iš pseudolydinių gaminti. Naudojant įvairias garinimo schemas, galima gauti sudėtingos struktūros skirtingų medžiagų dangas, pavyzdžiui, taip gaunama trisluoksni pseudolydinio danga, sudaryta iš 90 % Ti , 6 % Al ir 4 % V .

Elektroniniu pluoštu galima garinti ir nemetalines medžiagas, pavyzdžiui, SiO_2 , Al_2O_3 , stiklą ir kt. Tokios dangos naudojamos optikos ir elektronikos pramonėje, taip pat šilumą atspindinčiam stiklui gaminti.

5.9. Apdirbimas vandens čiurkšle

Apdirbimas aukšto slėgio vandens čiurkšle (*Water Jet Cutting*) naudojamas apdirbti toms medžiagoms, kurias sunku apdirbti tradiciniais pjovimo būdais.

Aukšto slėgio vandens čiurkšle apdirbama:

1. Švari vandeniu *be abrazyvo* (angliškai šis būdas vadinamas „Waterknife“).
2. Vandens čiurkšle *su abrazyvo priemaišomis* (angliškai „Paser-Particle Stream Erosion“, arba „Paser“).

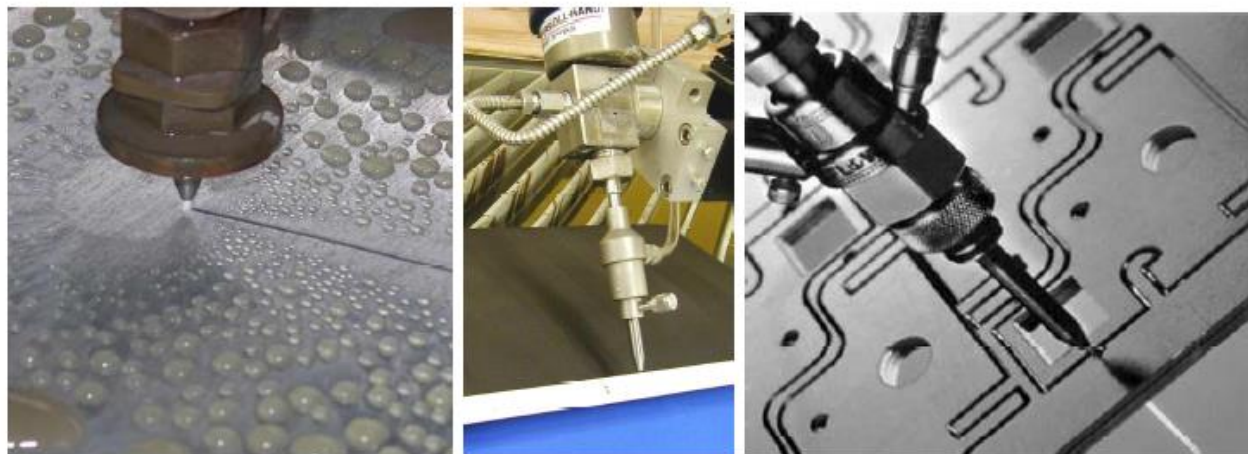
Dažniausiai šiuo būdu apdirbami (pjaustomi, gręžiami, graviruojami ir kt.) stiklas, keramika ir šiuolaikiniai lydiniai, kurių negalima perkaitinti, taip pat kompozicinės, korėtos struktūros medžiagų detalės, smulkinių (medienos drožlių) plokštės, plastikai ir labai plonos detalės (5.59 pav.). Apdirbtos detalės neturi užvartų ir terminio poveikio sričių.



5.59 pav. Apdirbimo aukšto slėgio vandens čiurkšle pavyzdžiai: *a* – medžio; *b* – akmens (graviruotas); *c* – stiklo; *d* – metalo lydinių

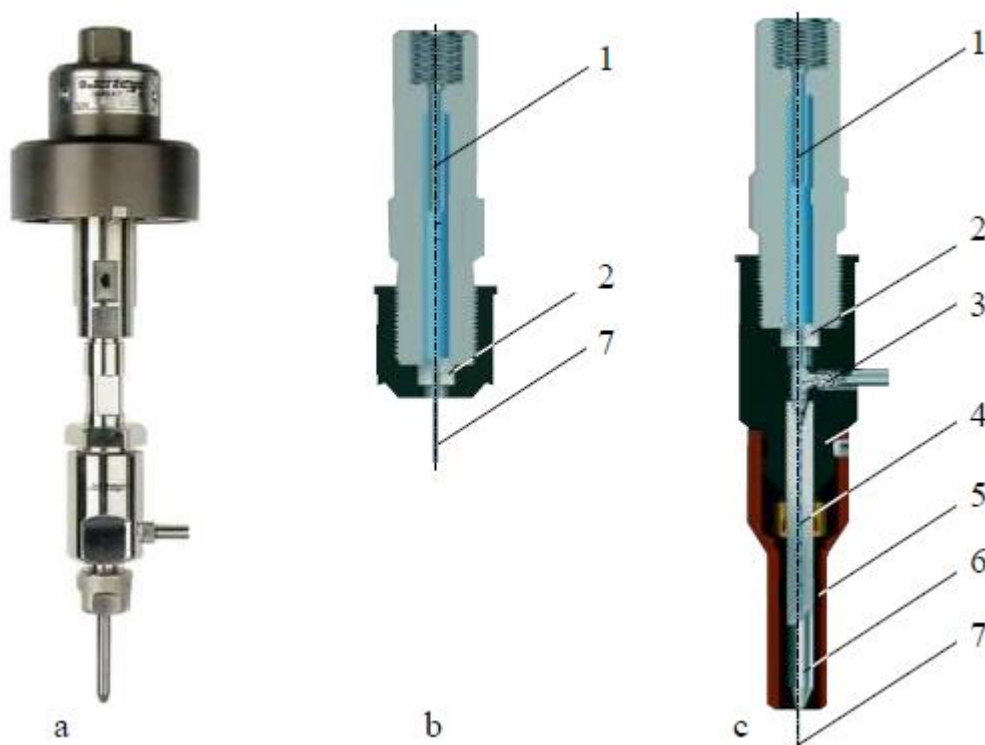
5.9.1. Apdirbimo vandens ir abrazyvo čiurkšle technologija

Didelio slėgio vandens čiurkšlė ardo bet kurį paviršių, į kurį ji nukreipta (5.60 pav.), o vandens čiurkšlėje esančios abrazyvo priemonės padidina pjovimo efektyvumą.



5.60 pav. Apdirbimas vandens čiurkšle

Didelio slėgio vamzdynu vanduo patenka į pjovimo galvutę (5.61 pav.), kuri naudojama vandens čiurkšlei sufokusuoti ir abrazyvinėms dalelėms į ją patiekti. Vandeniui ištekančiam pro vandens tūtą (safyro, rubino, deimanto ar kietlydinio), jis virsta labai plona ir didelio greičio vandens čiurkšle. Kuo didesnis vandens tūtos skersmuo ir vandens slėgis, tuo daugiau vandens suvartojama (0,2–6 litrai/min). Dirbant tik vandens srautu, naudojamos labai mažo skersmens tūtos (apie 0,12 mm).



5.61 pav. Vandens čiurkšlės pjovimo galvutės: *a* – pjovimo galvutės bendras vaizdas; *b* – „Waterknife“ pjovimo galvutė; *c* – „Paser“ pjovimo galvutė; 1 – vandens srautas; 2 – deimantinė vandens tūta; 3 – abrazyvas; 4 – maišytuvas; 5 – apsauginis antgalis; 6 – fokusavimo (abrazyvo) tūta; 7 – vandens (vandens ir abrazyvo mišinio) srautas

Vandens funkcija, pjaunant vandens ir abrazyvo čiurkšle, yra įgreitinti abrazyvo daleles. Dėl didelio vandens greičio maišymo kameroje susidaro išretėjimas, todėl į ją įtraukiamas abrazyvas ir vandens čiurkšlė maišoma su abrazyvinėmis dalelėmis (abrazyvas į pjovimo įrankį tiekiamas specialiu dozatoriumi). Fokusavimo tūtoje (dažniausiai 60–80 mm ilgio ir 0,8–1,2 mm skersmens) abrazyvinės dalelės įgreitinamos ir fokusuojamos. Kuo ilgesnė tūta ir kuo didesnis abrazyvo debitas (tūris, pratekantis per laiko vienetą skersiniu pjūviu), tuo labiau išdyla tūta. Tačiau kai tūta per trumpa, abrazyvinės dalelės nepasiekia reikiamo greičio.

Vandens tūtos dirba 750–1000 valandų (pvz., DuraFlow™ ir kt.) ir daugiau, o vandens ir abrazyvo srautu intensyviai veikiamos fokusavimo tūtos – 80–120 valandų. Išdilus tūtos skylei, čiurkšlė nebekoncentruojama, todėl didėja paviršiaus šiurkštumas ir banguotumas.

Priklausomai nuo įrenginio konstrukcijos ir siurblio našumo gali būti viena, dvi (universaliose įrenginiuose) arba trys ir daugiau pjovimo galvutės (specializuotuose įrenginiuose). Apdirbant ruošinį, pjovimo galvutė juda virš jo, o vandens ir abrazyvo čiurkšlė nustatytu kontūru pjauna ruošinį. 200–410 MPa slėgis suteikia vandens čiurkšlei 800–1000 m/s greitį. Tokiu greičiu tekanti srovė ir be abrazyvinių dalelių pjauna daugelį nemetalinių medžiagų (plastiką, kartoną, medį, stiklo vatą, gumą ar gumos audinius ir kt.). Likusiai čiurkšlės energijai slopinti naudojamas vanduo (pjaustoma virš 700–800 mm gylgio vandens rezervuaro, kuriame absorbuojama čiurkšlės energija).

Pastūma, apdirbant vandens ir abrazyvo čiurkšle, kinta nuo šimtų metrų (popieriui, kartonui ir kt.) iki dešimčių milimetrų (titanui, kietlydiniui ir kt.) per minutę. Kuo medžiaga minkštesnė ir plastiškesnė, tuo lengviau (greičiau) pjaunama. Šiluminės fizikinės medžiagos savybės pjovimui neturi įtakos.

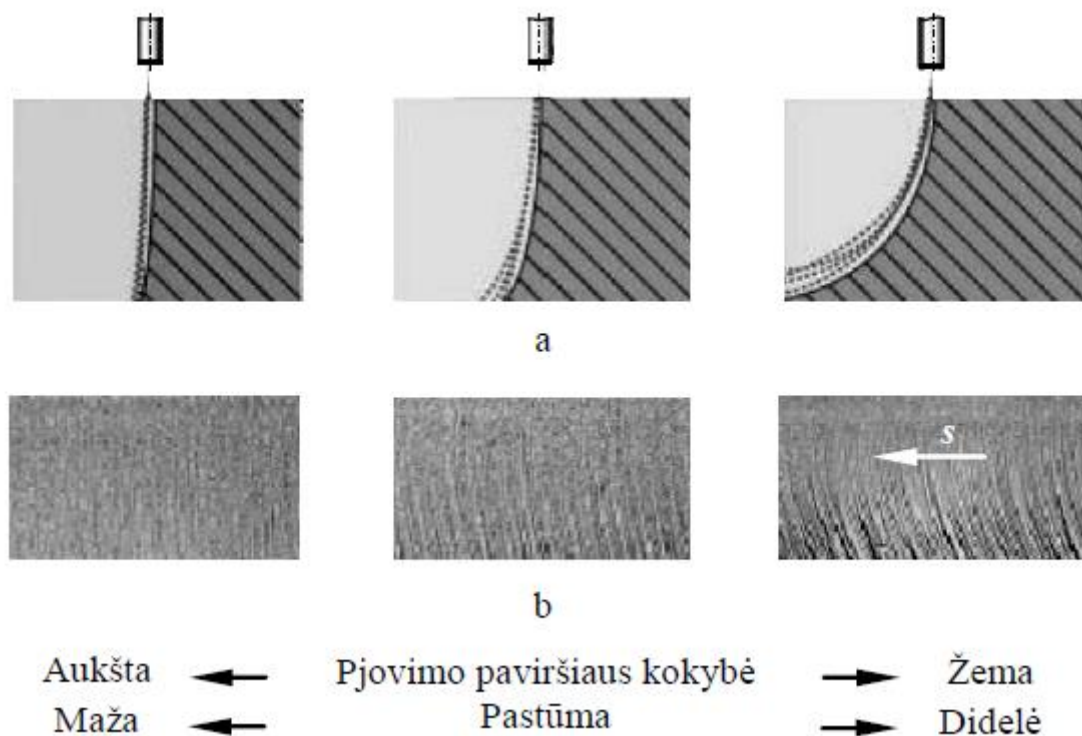
5.9.2. Pjovimas vandens ir abrazyvo čiurkšle

Kietoms medžiagoms pjauti naudojamos abrazyvo dalelės, kurias vanduo nukreipia į pjovimo vietą. Kiekviena iš šių dalelių paviršių apdoroja mikropjovimu.

Dažniausiai gaminio išpjovimas iš ruošinio pradedamas formuojant (gręžiant) skylę. Naudojami trys ruošinio gręžimo būdai:

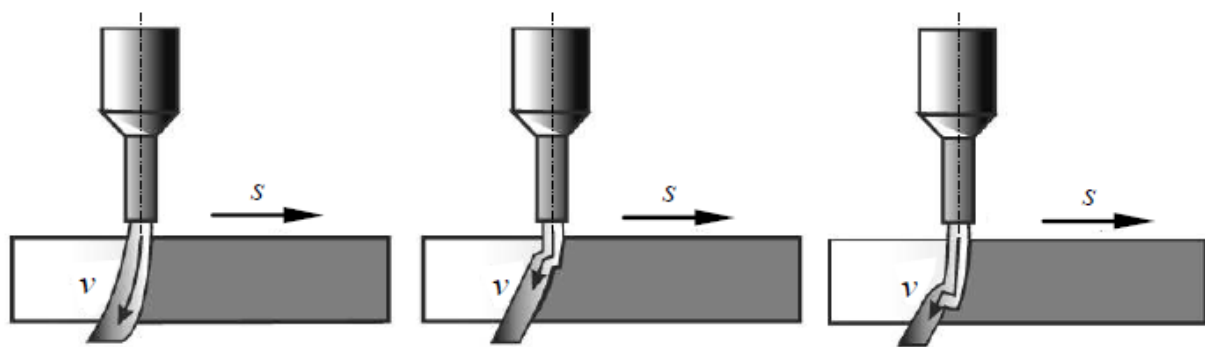
1. Nejudančia pjovimo galvute – vandens ir abrazyvo čiurkšlė išteka pjovimo galvutei nejudant. Skylėje susidaro didelis slėgis, kuris slopina čiurkšlę, o aklinojoje skylėje atsispindėjusi čiurkšlė gali pažeisti abrazyvo tūtą.
2. Apskritiminiu judesiu – pjovimo galvutė juda apskritiminiu judesiu. Esant siauroms išėmoms, apskritiminio judesio spindulys gali būti per didelis.
3. Slankiojamuoju judesiu – galvutė juda tiesiaiegiu slenkamuoju judesiu. Kol suformuojama kiaurymė, labai tyška.

Pjaunamu paviršiumi nukreipiama čiurkšlė išlinksta tam tikru kampu, kuris priklauso nuo pastūmos dydžio (5.62 pav.). Sustabdžius pjovimo galvutę, pjovimas dar kurį laiką tęsiasi, todėl, prieš keičiant pjovimo galvutės judėjimo kryptį, sumažinama pastūma, o kai kuriais atvejais ji visiškai sustabdoma (nes antroje gaminio pusėje gali atsirasti neperpjautų segmentų).



5.62 pav. Pjovimo pastūmos ir paviršiaus šiurkštumo tarpusavio priklausomybė: *a* – pjūvio briaunų nukrypimas nuo statmens; *b* – pjovimo paviršiaus kokybė

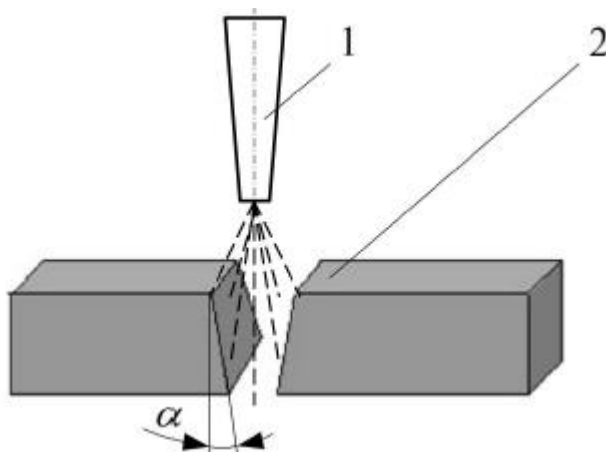
Didėjant pastūmai, pjaunamajame paviršiuje susidaro laiptelis (5.63 pav.), kurį veikia pagrindinė čiurkšlės energija. Po šiuo laipteliu pjovimas ne toks efektyvus. Čiurkšlės intensyviai pjaunamas ir žemyn stumiamas laiptelis didėja ir platėja. Šis laiptelių susidarymo ir išnykimo ciklas nenutrūksta, todėl pjūvio paviršius būna banguotas. Gaunamos bangos yra lygiagrečios čiurkšlei ir pasvirusios pastūmai priešinga kryptimi. Mažinant pjovimo pastumą, paviršiaus šiurkštumas mažėja.



5.63 pav. Laiptelio susidarymo schema didėjant pastūmai

Pjūvio plotį lemia tūtos skersmuo (kuo jis didesnis, tuo pjūvis platesnis). Čiurkšlės įėjimo vietoje gali suapvalėti pjaunamo gaminio briaunos (suapvalėjimas tuo didesnis, kuo greičiau abrazyvo tūta tolsta nuo pjaunamo paviršiaus).

Pjovimo briaunos nuokrypis nuo statmens į paviršių priklauso nuo medžiagos kiečio bei storio ir yra $0\text{--}2^\circ$ (5.64 pav.). Ši paklaida susidaro todėl, kad abrazyvinėms dalelėms atsitrenkus į paviršių (vykstant pjovimui) keičiasi jų judėjimo trajektorija. Didžiausias nukrypimas (apie 2°) gaunamas dirbant didžiausia pastūma. Mažinant pastumą, kampas mažėja iki 1° , tačiau pernelyg sumažinus pastumą, ruošinio viduje galimas plačiausias pjūvis.



5.64 pav. Pjūvio vandens ir abrazyvo čiurkšle skerspjuvio forma: 1 – pjoviklio antgalis; 2 – pjaunamas ruošinys; α – pjūvio susiaurėjimo kampas

Pjauti naudojamas abrazyvas (olivinas, marmuras, granitas, rečiau boro karbidas, korundas, silicio karbidas, elektrokorundas ir kt.), kurio grūdelių skersmuo $0,18\text{--}0,5$ mm. Abrazyve nepageidautina itin smulki frakcija (dulkės), nes mažėja pjovimo galia ir reikia daugiau abrazyvo.

Abrazyvinė medžiaga naudojama vieną kartą. Pakartotinai ją naudoti netikslinga, nes panaudotos medžiagos pjaunamosios savybės yra blogesnės (dalelės praranda aštrias briaunas) ir tam pačiam darbui atlikti reikia dvigubai daugiau abrazyvo.

Kai vandens sraute trūksta abrazyvinių dalelių, pjaunama lėtai ir tai brangiai kainuoja. Esant dalelių pertekliui, jų negalima įgreitinti, todėl mažėja srauto greitis, prastėja koncentracija ir didėja kaina.

Pjovimo didelio slėgio vandens ir abrazyvo čiurkšle privalumai:

- apdirbtas paviršius yra aukštos kokybės, jame nėra mikroįtrūkimų, terminųpakitimų (sukietinimo ir kt.), šlako ir degenų, nesusidaro užvartos;
- pjaunamos kietos, minkštos, akytos, jautrios temperatūrai ir slėgiui (pvz., plastikų dengta skarda), armuotos, net lipnios medžiagos;
- didelis pjovimo našumas bei tikslumas ($\pm 0,1$ mm);

- išpjaunamos mažo kampo išėmos;
- gaunamas siauras (naudojant „Waterknife“ sistemą pjūvio plotis 0,1–0,2 mm, naudojant „Paser“ – 0,8–1,6 mm) ir gilus (100–300 mm) pjūvis;
- ekologiškai švarus apdirbimo būdas (nesusidaro žalingų dujų ar garų, pjaustomos medžiagos nedulka ir kt.);
- galima pjaustyti po vandeniu ir sprogioje aplinkoje;
- kaina nepriklauso nuo pjūvio formos (tiesus ar fasoninis).

Pjovimo didelio slėgio vandens ir abrazyvo čiurkšle trūkumai:

- brangi įranga;
- pjūvio paviršiaus banguotumas ir nukrypimas nuo statmens didinant pastūmą;
- pjovimas nėra pigus;
- ribotas apdirbimo gylis ašine (vandens čiurkšlės) kryptimi;
- gaminys gali įmirkti.

Šiuo būdu galima pjaustyti grūdintą plieną ir kitas kietas medžiagas iki 100 mm, kitus metalus iki 120 mm, nemetalines medžiagas iki 150 mm, minkštas medžiagas iki 200 mm, akytas bei minkštas medžiagas – iki 300 mm storio. Kuo medžiaga kietesnė ir storesnė, tuo lėčiau pjaunama.

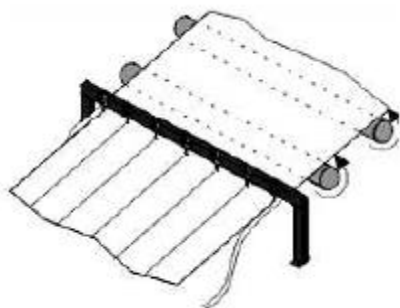
Lazerinis pjovimas yra pranašesnis už pjovimą vandens čiurkšle, kai reikia pjauti iki 6 mm spalvotuosius metalus, iki 20 mm konstrukcinį ir iki 12 mm nerūdijantį plieną. Kai sluoksnis storesnis kaip 25 mm, pjaunama vandens čiurkšle.

Plona čiurkšle išpjaunamos paprastos ir precizinės geometrinės formos detalės (5.59 pav.). Daugeliu atvejų apdirbimo tikslumas prilygsta apdirbimo frezavimo staklėmis tikslumui.

Pjovimo vandens čiurkšle panaudojimas:

- *automobilių pramonėje* – pjaustomos salono, bagažo ir variklio skyriaus nemetalinės detalės (durų apmušalai, kilimėliai, triukšmą sugeriantys elementai, taip pat išpjaunamas stoglangis ir kt.);
- *statyboje* – pjaustomos gipso kartoninės plokštės, izoliacinės medžiagos (stiklo ir akmens vata), plienas, spalvotieji metalai ir jų lydiniai, akmuo ir kt.;
- *reklamoje* – pjaustomi firmų logotipai, sienų ir grindų dekoracijos;
- *stiklo pramonėje* – pjaustomi lakštai, atliekamas fasoninis apdirbimas ir kt.;
- *plastikų gamyboje* – pjaustomos akytos medžiagos; presuoti gaminiai, sustiprinti stiklo ar anglies pluoštu ir kt.;
- *aviacijoje pramonėje* – pjaustomi presuoti ir laminuoti gaminiai, sustiprinti stiklo ar anglies audiniais; titanas, legiruotieji lydiniai ir kt.;
- *maisto pramonėje* – pjaustoma šaldyta žuvis, mėsa ir kt.;

- *akmens apdorojimo versle* – pjaustomos sienų ir grindų dekoracijos iš granito, marmuro, keraminių plytelių ir kt.;
- *celiuliozės pramonėje* – pjaustomas popierius (5.65 pav.), gofruotasis kartonas ir kt.



5.65 pav. Nepertraukiamos gamybos produktų (popieriaus, kartono, odos ir kt.) pjaustymo įrenginys (7 pjovimo galvutės)

Gaminį perpjovusios čiurkšlės energija absorbuojama iki 1 m gylio gaudytuve (vandens bake), kuris būna didesnis už apdorojamą gaminį. Įrenginiuose gali būti naudojamas linijinis gaudytuvas (yra po pjovimo galvute), kurį sudaro x koordinačių ašimi paslankus lovys (100 mm gylio), pripildytas keraminių rutulių.

Įvairių konstrukcinių medžiagų pjaunamas storis apdirbant lazeriu ir vandens čiurkšle duotas 5.2 lentelėje.

5.2 lentelė. Didžiausias lazeriu ir vandens čiurkšle pjaunamų konstrukcinių medžiagų Storis

Konstrukcinė medžiaga	Pjūvis lazeriu, mm	Pjūvis vandens čiurkšle, mm	
		kokybiškas	rupus
Nerūdijantysis plienas	iki 12	iki 30	iki 60
Statybinis plienas	iki 20	iki 30	iki 60
Įrankinis plienas	iki 15	iki 30	iki 60
Aliuminis	iki 8	iki 40	iki 80
Varis, žalvaris, bronz	iki 3	iki 30	iki 60
Titanas	iki 3	iki 30	iki 60
Plastikai, mediena, oda, audiniai	iki 25	iki 50	iki 100
Sluoksniuotas plastikas		iki 50	iki 100
Akmuo, keramika, stiklas		iki 40	iki 100

Žymėjimo ir graviravimo operacijos režimai parenkami taip, kad vandens ir abrazyvo čiurkšlė pašalintų tik viršutinį gaminio sluoksnį. Todėl apdorojama mažu abrazyvo kiekiu, mažu slėgiu (50–100 MPa) ir vidutine pastūma.



5.66 pav. 6-šių ašių pjovimo sistema

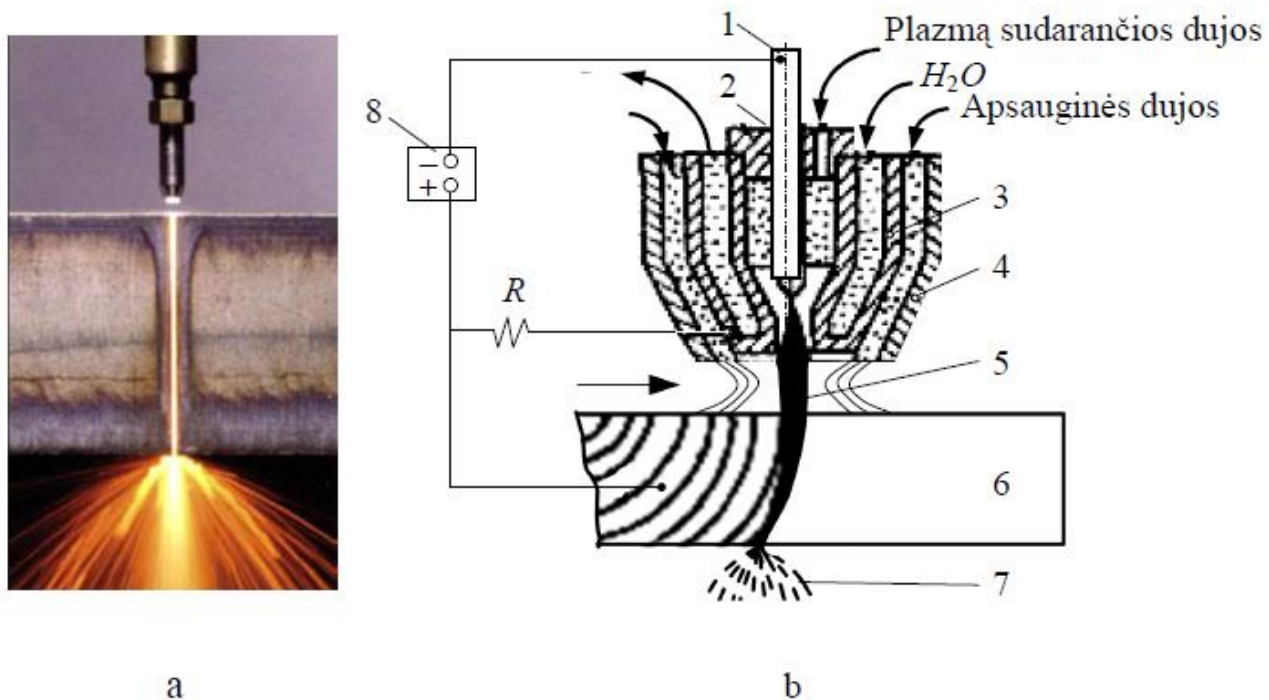
Kanados kompanija „Flow“ Las Vegaso mieste (JAV) vykusioje pramoninės technikos parodoje „Fabtech International & AWS Welding show 2008“ pademonstravo 6-šių ašių robotizuotas pjovimo vandens srove sistemas, kuriomis galima suformuoti sudėtingus trimačius raižinius (5.66 pav.). Palyginti su egzistuojančiais skaitmeniniu būdu valdomais (*computer numerically controlled, CNC*) 5 ašių įrenginiais, naujasis produktas yra universalus, gali būti perderinamas įvairiausiems gaminiams gaminti, juo pagamintų gaminių savikaina nėra didelė.

5.10. Plazminis pjovimas

Acetileno liepsna našiai pjaunami plonesni kaip 75 mm storio plieno lakštai, o plonesni kaip 25 mm storio lakštai – net iki 5 kartų našiau.

Plazminis pjovimas (*PAC*, arba *Plasma Arc Cutting*) dažniausiai naudojamas 0,5–75 (160) mm storio metalo lakštams iš nelegiruotojo ir nerūdijančiojo plieno, spalvotiesiems metalams, jų lydiniams ir kt. pjauti. Didžiausias našumas pasiekiamas pjaunant plieno lakštus iki 30 mm storio.

Plazminio pjovimo metu (5.67 pav.) į lankinės iškrovos stulpą nuolat pučiamos nejonizuotos dujos. Dėl lanko energijos šios dujos įkaista, jonizuojasi ir virsta plazmos srautu. Procese tarp volframo elektrodo ir detalės sukuriamas nuolatinės srovės lankas. Plazma (jonizuotos dujos), kurios temperatūra 10000–30000 °C, nukreipiama į apdirbamojo ruošinio paviršių, išlydo ir pašalina pjaunamą medžiagą iš pjūvio vietos.



5.67 pav. Plazminis pjovimas: *a* – bendras vaizdas; *b* – plazminio pjovimo schema; 1 – volframinis elektrodas; 2 – izoliacinis tarpiklis; 3 – varinis vandeniu aušinamas antgalis; 4 – išorinis antgalis; 5 – plazminis lankas; 6 – pjaunamas metalas; 7 – šlakas; 8 – srovės šaltinis

Įvairiems metalams pjauti naudojamos įvairios plazmą sudarančios dujos: argonas, azotas, azoto ir deguonies arba azoto ir vandenilio mišiniai. Procese naudojami specialūs CO_2 arba azoto ekrano antgaliai. Vietoj dujinio ekrano gali būti naudojamas vandens purškimo antgalis, kuris dar labiau susiaurina liepsną. Plienas pjaunamas 80 % azoto ir 20 % deguonies mišiniu arba tik azotu, naudojant vandens ekraną.

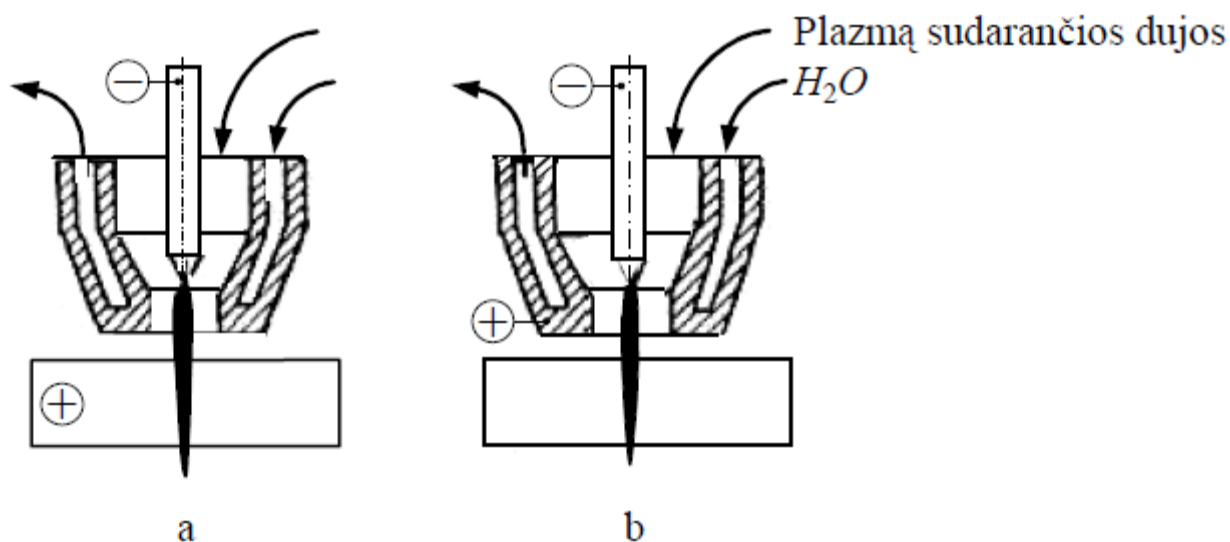
Lakštams pjauti parenkama 120–400 V įtampa. Priklausomai nuo pjaunamos medžiagos ir pjovimo greičio, srovė gali būti 20–1000 A. Paprastai automatinio pjovimo įrenginio stalas yra panardintas į vandenį iki pjaunamos detalės apačios. Plazmos dujos nupučia taip pat dujomis tapusio metalo daleles į vandenį, kur jos sustingsta. Prie degiklio prijungtas antgalis sukuria vandens ekraną aplink lanką. Tai sumažina pjaunant kylantį triukšmą.

Plazminio pjovimo privalumai: galima pjauti bet kokį metalą ar lydinį (įprastiniu dujiniu būdu nerūdijantysis plienas, ketus ir spalvotieji metalai nepjaunami, nes netenkinamos pjovimo sąlygos); metalo paviršius beveik nesioksiduoja, kai proceso metu naudojamas vandens ekranas; mažesnė terminio poveikio sritis; nedidelės liekamosios deformacijos dėl didelės plazmos lanko koncentracijos; nepažeidžiamas šalia pjūvio esantis dažų sluoksnis; didelis pjovimo greitis (5–7 kartus didesnis nei dujinis pjovimas deguonimi); nereikia išankstinio pakaitinimo ir kt.



5.68 pav. Plazminio pjovimo pavyzdžiai

Plazminių lankų formuojamos skylės, išpjunami (5.68 pav.), suvirinami, lituojami ruošiniai, dengiamas gaminių paviršius ir kt. Kai naudojamas degiklio sukurtas plazminis srautas, t. y. elektros lankas dega tarp nelydaus volframinio elektrodo ir degiklio antgalio (5.69 pav., b), juo galima apdirbti elektrai nelaidžias medžiagas, pjauti, suvirinti nemetalines medžiagas ir metalus su nemetalais.



Mikroplazminis pjovimas. Mikroplazminių lankų galima pjauti plonesnes kaip 0,1 mm ir iki 2 mm storio medžiagas (foliją, tekstilės audinius ir kt.), preciziškai suvirinti ir apdirbti plonus metalus. Mikroplazma pjaunamų sintetinių ir stiklo audinių kraštai apsilydo, todėl gaunamas kokybiškesnis pjūvis. Srovės stipris 0,1–20 A.