

Raimondas Šniuolis

MEDŽIAGŲ INŽINERIJA

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS

Raimondas Šniuolis

MEDŽIAGŲ INŽINERIJA

Mokomoji knyga

**BMK leidykla
Vilnius, 2014**

UDK 620.1(075.8)
Šn-13



Metodinė priemonė finansuota projekto „Šiaulių regiono specialistų perkvalifikavimo programų (modulių) rengimas ir įgyvendinimas bei kvalifikacijos tobulinimas“ (projekto kodas Nr. VP1-2.2-ŠMM-04-V-06-008, finansavimo ir administravimo sutarties Nr. VP1-2.2-ŠMM-04-V-06-008) lėšomis.

Recenzentai

doc. dr. Sergėjus Rimovskis
doc. dr. Artūras Sabaliauskas

Leidinys apsvarstytas ir rekomenduotas spausdinti Šiaulių universiteto Tęstinių studijų instituto tarybos posėdyje 2014-01-31, protokolo Nr. 1.

ISBN 978-609-468-007-6

© Raimondas Šniuolis, 2014
© Šiaulių universitetas, 2014

TURINYS

Ivadas	6
1. Juodujų ir spalvotujų metalų gavyba	7
1.1. Kuras, flusai ir ugniai atsparios medžiagos	7
1.2. Ketaus gamyba	9
1.2.1. Geležies rūdos ir jos paruošimas lydymui	9
1.2.2. Aukštakrosnės konstrukcija ir darbas	10
1.2.3. Aukštakrosnių procesas	11
1.3. Plieno gavyba	12
1.3.1. Plienio gavyba deguoniniame konvertertyje	13
1.3.2. Plienio gavyba Marteno krosnyse	14
1.3.3. Plienio gavyba elektrinėse lydkrosnėse	16
1.3.4. Plienio išpilstymas ir plieninių luitų sandara	18
1.3.5. Plienio kokybės gerinimas	20
1.4. Spalvotujų metalų gavyba	21
1.4.1. Vario gavyba	22
1.4.2. Aluminio gavyba	22
1.4.3. Magnio gavyba	23
1.4.4. Titano gavyba	23
2. Liejiminkystė	24
2.1. Pagrindinės liejamosios lydinių savybės	24
2.2. Liejinių gamyba smėlio formose	25
2.2.1. Modeliai ir liejiniai	25
2.2.2. Liečių sistemos elementai	26
2.2.3. Formavimo ir gurgučių mišiniai	27
2.2.4. Formavimas	29
2.2.5. Liejinių valymas ir terminis apdorojimas	31
2.3. Specialieji liejimo būdai	32
2.3.1. Kokilinis liejimas	32
2.3.2. Liejimas į kevalines formas	34
2.3.3. Liejimas pagal išlydomuosius modelius	35
2.3.4. Liejimas slegiant	36
2.3.5. Išcentrinis liejimas	38
3. Metalų apdirbimas spaudimo būdu	39
3.1. Plastinis deformavimas	39
3.2. Metalų įkaitinimas prieš apdirbant spaudimo būdu	40
3.3. Valcavimas	41
3.3.1. Valcuoti gaminiai	42
3.3.2. Valcavimo įrankiai ir staklynai	43
3.3.3. Technologinis valcavimo procesas	43
3.4. Presavimas	45
3.5. Traukimas	46

3.6. Kalimas	47
3.7. Karštasis tūrinis štampavimas	50
3.8. Šaltasis štampavimas.....	53
3.8.1. Šaltasis tūrinis štampavimas.....	53
3.8.2. Šaltasis lakštinis štampavimas	54
3.9. Lakštinio štampavimo štampai.....	56
4. Metalų suvirinimas	57
4.1. Pagrindinės žinios apie medžiagų suvirinimą	57
4.2. Lankinis suvirinimas	66
4.2.1. Elektros lankas ir jo savybės	66
4.2.2. Suvirinimo lanko maitinimo šaltiniai	69
4.2.3. Suvirinimo medžiagos.....	71
4.2.4. Suvirintosios jungtys ir siūlės	84
4.2.5. Metalurginiai suvirinimo procesai.....	86
4.2.6. Jungčių suvirinimas.....	89
4.2.7. Rankinis lankinis suvirinimas	91
4.2.8. Lankinis suvirinimas po fliusu	92
4.2.9. Lankinis suvirinimas apsauginėse dujose.....	93
4.3. Dujinis suvirinimas	96
4.3.1. Dujiniam suvirinimui naudojamos medžiagos	96
4.3.2. Dujinio suvirinimo įrenginiai	97
4.3.3. Dujinio suvirinimo liepsna ir technologija	98
4.4. Kontaktinis suvirinimas	100
4.4.1. Kontaktinis sandūrinis suvirinimas	100
4.4.2. Kontaktinis aplydomasis suvirinimas.....	101
4.4.3. Kontaktinis taškinis suvirinimas	101
4.4.4. Kontaktinis reljefinis suvirinimas	103
4.4.5. Kontaktinis siūlinis suvirinimas	103
4.5. Ultragarsinis suvirinimas	104
4.6. Trintinis suvirinimas	105
4.7. Elektronpluoštis suvirinimas vakuumė	106
4.8. Lazerinis suvirinimas	109
4.9. Suvirinimas sprogimu	111
4.10. Metalų ir lydinių suvirinamumas	114
4.10.1. Plienų suvirinimas	115
4.10.2. Ketaus suvirinimas	117
4.10.3. Vario ir jo lydinių suvirinimas	119
4.10.4. Aliuminio ir jo lydinių suvirinimas	121
4.10.5. Magnio suvirinimas	122
4.10.6. Sunkiai lydžių metalų ir jų lydinių suvirinimas	122
4.10.7. Skirtingų rūsių metalų suvirinimas	123
5. Netradiciniai apdirbimo būdai.....	125
5.1. Magnetinis impulsinis apdirbimas.....	125
5.1.1. Štampavimas magnetiniame lauke	126

5.1.2. Sujungimas magnetiniu impulsiniu būdu	128
5.2. Apdirbimas elektros srovės impulsų energija.....	130
5.2.1. Apdirbimas elektrohidrauliniu smūgiu.....	130
5.2.1.1. Elektrohidraulinis štampavimas	130
5.2.1.2. Smulkinimas ir valymas	132
5.2.1.3. Vamzdžių išvalcavimas.....	132
5.2.2. Elektroimpulsinis užpurškimas	134
5.3. Elektrokibirkštiniš apdirbimas	136
5.4. Elektrocheminis apdirbimas	143
5.5. Lazerinio apdirbimas	146
5.5.1. Lazerio veikimo principas.....	147
5.5.2. Pagrindinės lazerių panaudojimo sritys	152
5.5.3. Lazerinio apdirbimo būdai	154
5.5.3.1. Paviršių sukietinimas lazeriu.....	154
5.5.3.2. Pjovimas lazeriu	156
5.5.3.3. Skylių formavimas lazeriu	158
5.5.3.4. Legiravimas lazeriu.....	160
5.5.3.5. Detalės paviršių metalizavimas lazeriu	161
5.5.3.6. Kiti lazeriniai technologiniai procesai.....	161
5.5.3.7. Spinduliuotę sugeriančios dangos	164
5.6. Ultragarsinis apdirbimas	165
5.6.1. Ultragarsinio proceso pagrindai	165
5.6.2. Kietų medžiagų ultragarsinis apdirbimas	169
5.6.2.1. Kiaurųjų ir akliniųjų skylių formavimas.....	169
5.6.2.2. Detalės paviršių apdirbimas ultragarsu.....	171
5.6.2.3. Ultragarsinis superfinišavimas	172
5.6.2.4. Paviršinio sluoksnio sukietinimas	173
5.6.3. Ultragarsu apdirbtų paviršių šiurkštumas ir tikslumas	173
5.6.4. Ultragarsinių virpesių panaudojimas technologiniams procesams intensyvinti.....	174
5.6.5. Ultragarsinis valymas.....	175
5.6.5.1. Kavitacionio valymo mechanizmas.....	176
5.6.5.2. Valymo terpių parinkimas	177
5.6.5.3. Ultragarsinio valymo būdai	178
5.7. Apdirbimas sprogimui.....	179
5.7.1. Hidraulinis štampavimas	179
5.7.2. Pramušimas ir pjauystumas	181
5.7.3. Paviršių sustiprinimas sprogimui	182
5.8. Elektronpluoščių apdirbimas	182
5.8.1. Elektronpluoščių lydymas	183
5.8.2. Elektronpluoščių medžiagų garinimas	184
5.9. Apdirbimas vandens čiurkšle	184
5.9.1. Apdirbimo vandens ir abrazyvo čiurkšle technologija	185
5.9.2. Pjovimas vandens ir abrazyvo čiurkšle	187
5.10. Plazminis pjovimas	191
Literatūra	193

Ivadas

Naujų medžiagų ir technologijų kūrimas yra techninės plėtros salyga. Šios medžiagos ir technologinių procesų įvairovė yra prioritetiniai techninio progreso elementai. Medžiagų mokslo laimėjimai pritaikomi medžiagų inžinerijoje, siekiant surinkti pigiausius gamybos ir apdorojimo būdus, paliekančius mažiau atliekų ir sunaudojančius mažiau energijos. Kad pasiektų šiuos tikslus, gamybos inžinierius privalo išmatyti medžiagų apdirbimo būdus ir įgaunamas formas.

Medžiagų inžinerijoje nagrinėjami metalurgijos procesai ir metalų, dažnai naudojamų lydinuose, gavybos iš rūdų metodai. Šiuolaikinė metalurgija yra sudėtingas įvairių gamybos šakų kompleksas. Tai keturių ferolydinių lydymas, plieno lydymas iš aukštakrosnės gauto perlydomojo ketus, plieno luitų stambioms kaltinėms mašinų detalėms gamyba, plieno luitų perdirbimas į rūšinius valcuotus gaminius ir kt.

Ruošiniai ar jų paviršiai formuojami liejimo, apdirbimo spaudžiant (valcavimo, kalimo, štampavimo ir kt.), suvirinimo, pjovimo (pašalinant tam tikrą paviršiaus sluoksnį) ir kt. būdais. Liejimas yra ne tik paprasčiausias, greičiausias, bet dažniausiai ir pigiausias būdas suteikti gaminui norimą formą. Kai kurie liejiniai gali būti naudojami iš karto po liejimo, tačiau dažniausiai juos dar reikia mechaniskai apdirbti ir atlirkti baigiamasiškais operacijas. Specialiaisiais būdais nulieti liejiniai yra gana tikslūs, jų paviršius glotnus, gaunamos mažiausios užlaidos mechaniniams apdirbimui.

Apdirbant spaudimo būdu, keičiama ruošinių ar jų dalies forma ir matmenys. Deformuojant šaltai, kinta metalo mechaninės, fizikinės ir cheminės savybės, gaunami tikslūs matmenys, geresnė paviršiaus kokybė. Karštai deformuojamas metalas yra plastiškesnis, todėl galima apdirbti stambius ruošinius. Tačiau karštojo deformavimo metu ruošinio paviršiuje susidaro nuodegų sluoksnis, nuo ruošinio šilumos iškaitęs įrankis atsileidžia (praranda kietumą ir dyla), sunku palaikyti greitai ataušančią mažų ir plonų ruošinių temperatūrą. Šie ir kiti trūkumai šalinami tobulinant apdirbimo spaudimui technologinius procesus, pvz., apdirbant vakuumė, iškaitinančią ranką ir kt.

Konstrukciniai elementai gali būti sujungiami virintinėmis siūlėmis kaitinant arba slegiant. Suvirinimo technologiniams procesams priskiriamo: suvirinimas, apvirinimas, litavimas, dengimas korozijai atspariais metalais, pjaustymas. Taikant pažangius suvirinimo bei pjovimo būdus, dažnai tobulinama ar net iš pagrindų keičiama gamybos technologija. Suvirinimo medžiaga ir suvirinimo technologija turi būti pasirinkta tokia, kad virintinės siūlės mechaninės savybės būtų ne blogesnės nei jungiamujų elementų. Suvirinimo būdu gaminamos įvairios metalinės konstrukcijos, remontuojami įrenginiai, gaunamos kelių sluoksninių medžiagos ir kt. Suvirinami ne tik metalai ir jų lydiniai, bet ir kai kurios keraminės medžiagos, plastikai, stiklas, skirtingų rūšių medžiagos. Suvirinama ore ir vandenye įvairose erdvinėse padėtyse.

Netradiciniai paviršinių sluoksninių šalinimo būdai gali būti panaudoti ruošinių apdirbimo procesuose, kuriu technologinės arba ekonominės charakteristikos, esant tam tikroms aplinkybėms, yra pranašesnės, palyginti su tradiciniais medžiagų apdirbimo būdais. Netradiciniai būdai (sprogimo energija, lazerio ar elektronų pluošto šilumine energija, ultragarsu ir kt.) formuojami sudėtingi fasoniniai profiliai, kurie tradiciniu būdu sunkiai apdirbami arba kurių gamyba yra brangi. Labai svarbi daugumos šių naujų medžiagų apdirbimo savybė yra ta, kad ruošinio medžiagos kietis nėra svarbus apdirbimo procesui. Sukietinti detalių paviršiai kartais apdirbami greičiau negu palyginti minkštį. Šie pranašumai panaudojami gaminant štampus ir liejimo formas, kurie baigiami apdirbti po sukietinimo.

1. JUODUJU IR SPALVOTUJU METALU GAVYBA

Metalai gaunami lydant paruoštas rūdas, kurą ir fliusus, kurie kartu sudaro įkrovą. Rūdos – tai uolienos arba jas sudarantys mineralai, kuriuose yra metalų arba jų junginių (Fe_3O_4 , Fe_2O_3 , $FeCO_3$, $Fe_2O_3 \cdot H_2O$, Cu_2S , Mn_2O_3 , Cr_2O_3 ir kt.) ir nenaudingos uolienos su įvairiomis priemaišomis (SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO ir kt.).

Metalurgija – tai iškastų rūdų ruošimas (sodrinimas), lydymo procesai, reikiamas cheminės sudėties metalų ir jų lydinių gavimas, išpilstymas ir sustingusiu luitu perdirbimas. Pagal tai, kokie metalai gaunami iš rūdų, metalurgija skirstoma į juodujų ir spalvotųjų metalų metalurgiją. Juodosios metalurgijos metu aukštakrosnėje iš rūdų išlydomas perdirbamasis ketus, kuris perlydomas į plieną konverteriuose ar krosnyse, taip pat ferolydiniai (geležies lydiniai su Cr , Si , Mn , Ti ir kt.). Plienų luitai perdirbami į valcuotus gaminius (strypus, lakštus, vamzdžius ir kt.).

Pagal metalų gavybos būdą metalurgija skirstoma:

- Pirometalurgija – metalų ir jų lydinių (ketaus, plieno, švino, vario, cinko ir kt.) gavyba (lydymas) aukštoje temperatūroje.
- Hidrometalurgija – metalų gavimas iš rūdų, jų koncentratų ar gamybos atliekų vandeniniaisiais cheminių junginių tirpalais. Taikomas aliuminio, urano, aukso, cinko, nikelio, vario, kobalto, kadmio ir kt. gavybai.
- Elektrometalurgija – juodujų ir spalvotųjų metalų ir jų lydinių (ferolydiniai, šteino, ketaus, nikelio, alavo ir kt.) gavyba, rafinavimas ir perlydymas elektros energija. Taikomi procesai: 1) elektroterminis (metalai perlydomi ar rafinuojami elektrinėse lydkrošnėse); 2) elektrocheminis (vykstant elektrolizei vandeniniuose tirpaluose ar lydaluuose).
- Plazminė metalurgija – sunkiai lydžių metalų lydinių, specialiųjų savybių legiruotojo plieno gavybai plazminėse lydkrošnėse žemos plazmos energija.

1.1. Kuras, fliusai ir ugniai atsparios medžiagos

KURAS. Metalų lydymas iš rūdų ir tolesnis jų perdirbimas vyksta metalurginėse krosnyse esant aukštai temperatūrai, kuri gaunama deginant kurą. Svarbiausi kuro rodikliai: sudegimo šiluma (MJ/kg), stipris, peleningumas, poringumas, kenksmingųjų priemaišų kiekis, terminis stipris.

Kuras gali būti:

1. **Kietas** (*gamtinis* – akmens anglis, antracitas ir kt.; *dirbtinis* – akmens anglių kokšas, medžio anglis, akmens anglies briketai, terminis antracitas ir kt.):

- 1.1. Akmens anglis (1.1 pav.) yra nuosėdinė

iškasama uoliene, susidariusi iš augalinii liekanų, kurios milijonus metų, nesant deguonies, buvo veikiamos aukštos temperatūros ir slėgio.

Sudėtis: anglis (72–92 %), vandenilis (2,5–5,7 %), deguonis (1,5–15 %), siera (0,5–4 %), azotas (~1,5 %), mineralinės priemaišos, kurios, anglims sudegus, sudaro pelenus.



1.1 pav. Akmens anglis

- Jos atmaina – antracitas, kuriame yra iki 94 % anglies. Antracito ištekliai gamtoje yra labai dideli, todėl jis pigus. Pasižymi mažu peleningumu ir dideliu tankiu. Trūkumas – nedidelis terminis patvarumas (linkęs subyrėti į smulkius gabaliukus); tame yra iki 2,5 % S , kuri lydymo metu pašalinama su dujomis arba ištirpssta metale.
- 1.2. **Kokas.** Gaunamas iš akmens anglies sausai ją distiliuojant (kaitinant be oro 1000–1100 °C temperatūroje) specialiose krosnyse 14–20 h. Kokse yra 80–88 % anglies, 8–12 % pelenų, 2–4 % drėgmės, 0,7–1,2 % lakių medžiagų, 0,5–1,8 % sieros ir 0,02–0,2 % fosforo.
Pagrindiniai reikalavimai: 1) didelis tankis (poringumas <35 %); 2) reakcingumas (aukštakrosnių koksui didelis reakcingumas reikalingas geležiai redukuoti); 3) mechaninis stipris (atlaikyti įkrovos svorį); 4) mažas sieringumas (aukštakrosnių kokso <2 % S), kadangi siera lydant gali reaguoti su metalu ir pabloginti jo savybes; 5) peleningumas (<9 %); 6) kokso gabalų dydis – 50–100 mm.
 - 1.3. **Medžio anglis.** Gaunama kaitinant malkas specialiose krosnyse be oro. Tai labai vertingas, tačiau brangus, mechaniskai nestiprus kuras, kuriame nėra sieros, labai mažai pelenų ir kitų žalingų priemaišų. Naudojama aukštostos kokybės ketui gauti.
 2. **Skystas** (nafta, mazutras, benzinas). Mazutras (naftos perdirbimo produktas, turintis iki 88 % C , 10–12 % vandenilio, truputį sieros ir deguonies) purkštuvais išpurškiamas (1–2 %) į lydkrosnės degimo zoną. Naudojamas džiovinimo ir kt. krosnyse. Yra gaminamas mažai sieringas (iki 1 % S , naudojamas lydymui), sieringas (iki 2 % S) ir labai sieringas (iki 3,5 % S) mazutras.
 3. **Dujinis** (aukštakrosnių, koksavimo, gamtinės dujos).
- FLIUSAI.** Flius u vadinama medžiaga, įkraunama į lydymo krosnį tam, kad su nenaudinga (bergždžiaja) rūdos uolienu, kuro pelenais ir kitomis nemetalinėmis priemaišomis (siera, fosforu) sudarytų lengvai lydžius cheminius junginius – šlaką.
- Pašalinus šlaką ir pridėjus naujo reikiamaus sudėties fliuso, galima iš metalo pašalinti daugiau žalingų priemaišų. Fliuso cheminės savybės (bazinis, rūgštinis) turi būti derinamos su ugniai atsparių medžiagų chemine sudėtimi (rūgštinė, bazinė, neutrali iškloja). Kitu atveju iškloja pradės irti. Ketui lydyti naudojami flusai, kurie sumažina šlako lydymosi temperatūrą ir padidina jo takumą.
- UGNIAI ATSPARIOS MEDŽIAGOS.** Jomis išklojamos aukštakrosnių, lydymo, terminių ir kt. krosnių ertmės, kaušai ir kt. Šios medžiagos turi būti patvarios mechaniniam ir cheminiam karšto metalo, šlako ir duju poveikiui aukštoje temperatūroje. Ugniai atsparios medžiagos yra įvairaus dydžio ir formos plytos, milteliai, fasoniniai gaminiai.
- Pagal jose esančių oksidų chemines savybes ugniai atsparios medžiagos būna:
1. **Rūgštinės**, kuriose yra daug silicio dioksido SiO_2 .
Tai kvarcinis smėlis (ne mažiau kaip 95 % SiO_2), iš jo ir kvarcito (kieta metamorfinė uolienu) pagamintos dinasinės plytos (93–97 % SiO_2), kurios atsparios ne mažesnėje kaip 1720 °C temperatūroje. Šiomis plytomis išklojamos rūgštinės Marteno ir elektrinės lankinės plieno lydymo krosnys.
 2. **Bazinės**, kuriose yra CaO , MgO ir kitų bazinių oksidų.
Tai magnezitinės (iki 90 % MgO), magnezito chromitinės (60 % MgO , 8–10 % Cr_2O_3), dolomitinės (apie 60 % CaO , 40 % MgO) plytos. Jų atsparas ugniai didesnis kaip 2000 °C. Šiomis plytomis išmūrijamos Marteno ir elektrinių lydymo krosnių sienos ir padai.

3. Neutralios, kuriose yra daug Al_2O_3 , Cr_2O_3 .

Gaminamos:

šamotinės plytos (apie 60 % SiO_2 , apie 40 % Al_2O_3), kurios termiškai patvarios 1580–1750 °C temperatūroje. Naudojamos aukštakrosnėse, oro šildytuvuose ir kt. chromitinės plytos (apie 65 % Cr_2O_3), lydosi aukštesnėje kaip 2000 °C temperatūroje;

chromo magnezitinės plytos (42 % MgO , 15–20 % Cr_2O_3), kurių atsparumas ugniai didesnis kaip 2000 °C;

molžemio plytos (72–95 % Al_2O_3) – jų atsparumas ugniai 1820–1920 °C.

Kai kurios iš šių medžiagų gali būti priskirtos prie pusiau rūgštinių arba pusiau bazinių. Nedidelė dalis šių oksidų lydosi ir sudaro šlakus, kurie svarbūs metalurginiams lydymo procesams.

1.2. Ketaus gamyba

1.2.1. Geležies rūdos ir jų paruošimas lydyti

Rūdos pavadinimas priklauso nuo to, kokio mineralo joje yra daugiausia. Dažniausiai kasamos ir perdirbamos šios geležies rūdos rūšys:

1. Magnetinė geležies rūda – jos sudėtyje yra magnetito Fe_3O_4 (40–70 % Fe). Rūda turi magnetinių savybių, yra tanki gabalinė uoliena.
 2. Raudonoji geležies rūda – joje yra hematito Fe_2O_3 (45–65 % Fe).
 3. Rudoji geležies rūda – susideda iš mineralų: limonito $2Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$ ir getito $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ (25–50 % Fe).
 4. Špatinė geležies rūda – joje daugiausia yra siderito $FeCO_3$ (30–40 % Fe).
- Yra šviesiai pilkos ir gelsvai Baltos spalvos.

Geležies rūdų ruošimas. Geležies rūda su dideliu Fe kiekiu (apie 60 %) gali būti kraunama į metalurgines krosnis be specialaus ruošimo. Tačiau dažniausiai tenka rūdą paruošti taip, kad būtų pašalintos nenaudingos uolienos. Tokio paruošimo metu rūdoje esantis grynos geležies kiekis procentiškai didinamas iki 60–67 %.

Šio proceso etapai:

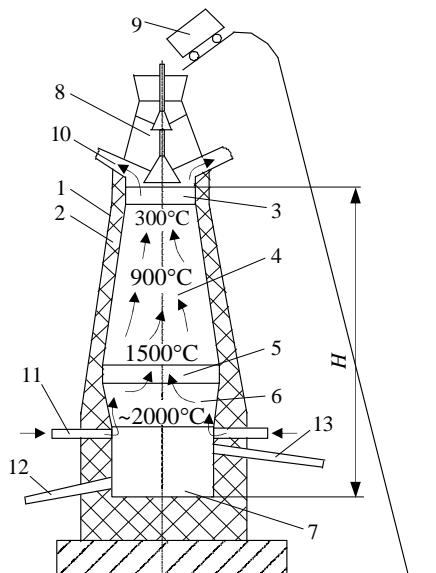
1. Rūdos gabalu susmulkinimas iki 1 mm grūdelių specialiais trupintuvais.
2. Susmulkintos rūdos sodrinimas:
 - c) praplaunant rūdą – vandens čiurkšle atskiriama nenaudinga uoliena (smėlis, molis) nuo sunkesnių naudingųjų mineralų;
 - d) magnetinės separacijos būdu – elektromagnetais atskiriami geležingieji mineralai nuo nemagnetinės nenaudingosios uolienos;
 - e) nusodinimo būdu – rūda suberama į skystį, kurio tankis didesnis už nenaudingosios uolienos tankį, todėl rūdos mineralai nusėda ant dugno, o nenaudingoji uoliena išplaukia į paviršių, nuo kurio pašalinama.
3. Sodrintos rūdos aglomeravimas arba granuliavimas. Gaunami aukštakrosnėms tinkami 30–100 mm didumo korėti gabalai, kuriuos sukepinant iš rūdos pašalinta siera, arsenas, CO_2 ir kt. kenksmingosios priemaišos. Lydant aglomeratą ir riedulius, nereikia atskirai dėti fliusų, nes reikiamas fliuso kiekis į jų sudėtį.

1.2.2. Aukštakrosnės konstrukcija ir darbas

Aukštakrosnė (1.2 pav.) yra šachtinė krosnis, kurios plieninis korpusas 1 išklotas šamotinėmis plytomis 2 (neutrali iškloja). Ją sudaro krosnies viršus 3, žemyn platėjanti šachta 4 (todėl įkrova lydymosi procese lengvai slenka žemyn), plačioji šachtos dalis 5 ir lydykla 6 (link žaizdro siaurėja, todėl kieta įkrova sulaikoma plačiausioje šachtos dalyje ir pačioje šachtoje). Plačiausioje šachtos dalyje 5 ir lydykloje 6 truputį aukščiau pūstuvų 11 redukuojami rūdoje esantys oksidai, išsiangliniai gauta geležis, kuri lydosi ir nuteka į žaizdrą 7. Dalys 5, 6 ir 7 aušinamos vandeniu. Šachtinės krosnies viršuje yra kas 60° pasukamas dvigubas piltuvas 8, per kurį iš viršaus nuolat berima keltuvu 9 atgabenta įkrova (rūdos aglomeratas arba granulės ir kokas). Piltuvą 8 sudaro du nuosekliai veikiantys kūgiai. Vienas iš piltuvo kūgių visą laiką yra uždarytas, todėl aukštakrosnės dujos nuvedamos dujų kanalu 10.

Žaizdro viršuje apskritimu išdėstyti pūstuvai 11 (būna 16–20), kuriais tiekiamas karštas oras (daugiau šilumos tenka įkrovai) ir dujinis kuras, reikalingi koksui degti. Degant kurui, išsiškyrusi šiluma išlydo metalą, kuris lašais nuteka žemyn į žaizdrą. Iš žaizdro išlydytas ketus kas 3–4 valandas nuleidžiamas lataku 12 į išpilstymo kaušus. Šlakas yra lengvesnis už ketų, todėl susikaupia virš jo ir išleidžiamas lataku 13 kas 1–2 valandas. Skystasis šlakas yra sudarytas iš *Si, Al, Ca, Mg, Fe, Mn* oksidų ir kitų junginių, įeinančių į lydinio, ugniai atsparaus klojinio ir flisų sudėtę.

Aukštakrosnės naudingas aukštis H siekia iki 35 m. Toks didelis aukštis reikalingas tam, kad suspėtū išvykti cheminiai procesai, susiję su metalo gavimu iš rūdos.



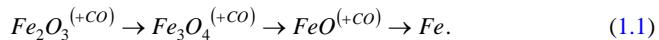
1.2 pav. Aukštakrosnės konstrukcija ir bendras vaizdas:

1 – plieninis korpusas, 2 – šamotinės plytos, 3 – lydkrosnės viršus, 4 – šachta, 5 – plačioji šachtos dalis, 6 – lydykla, 7 – žaizdras, 8 – dvigubas piltuvas, 9 – keltuvas, 10 – dujų kanalas, 11 – pūstuvai, 12 – latakas ketui, 13 – latakas šlakui

1.2.3. Aukštakrosnių procesas

Aukštakrosnėje vyksta įvairūs fizikiniai ir cheminiai procesai. Svarbiausieji jų etapai:

1. Kuro degimas.
Šiame procese dega koktas $C_{kokso} + O_2 = CO_2$ ir CO_2 redukuojamas į CO . Susidaręs anglies monoksidas būtinės geležies oksidams redukuoti.
2. Geležies oksidų redukavimas.
Geležies oksidai reaguoja su CO pagal schemą:



Geležies oksidą taip pat redukuoja kieta kokso anglis:



Kai $T > 1000^\circ\text{C}$, redukuojama dalis Mn ir Si :



kurie ištirpsta geležyje.

Tuo pačiu metu Mn reaguoja su kieta C_{kokso} ir sudaro karbidą Mn_3C , padidinanti anglies kiekį lydinyje. Likusi MnO ir SiO_2 dalis pereina į šlaką.

3. Geležies įsianglinimas ir ketaus susidarymas.
Redukuota iš rūdos gryna geležis $1000\text{--}1100^\circ\text{C}$ temperatūroje reaguoja su karštomis CO dujomis ir C_{kokso} :



ir įsianglina, tirpstant susidariusiam geležies karbidui Fe_3C .

Ketus aukštakrosnėje gaunamas vykstant Fe oksidų, dalias Mn ir Si oksidų, fosfatų ir sieros junginių redukavimo procesams, tirpstant geležyje C , Mn , Si , P , S .

4. Šlako susidarymas.
Susilydžius nenaudingoje rūdos uolienoje esantiems Al , Ca , Mg oksidams, daliai neredukuotų Si , Mn , Fe oksidų ir CaS , apsilydant ir tirpstant ugniai atspariam klojiniiui, kartu su įkrova patenkant įvairiomis priemaišomis, fliusams ir kokso pelenams, susidaro šlakas. Šlakas apsaugo metalą nuo krosnies dujų ir oro poveikio. Šlakas vadinamas rūgštiniu, jei jo sudėtyje vyrauja SiO_2 , P_2O_5 ir baziniu, jei vyrauja Ca , Mg , Mn , Fe oksidai. Lydymo procesui svarbi ne tik šlako sudėtis, bet ir jo temperatūra bei klampa. Esant didelei skysto šlako klampai, gali sutrikti lydymo procesas, nes virš pūstuvų susidaro neprapučiamas sluoksnis. Kai klampa maža, šlakas blogai atskirkia nuo metalo.

Aukštakrosnių produkcija

- Perdirbamasis ketus** (3,5–4,5 % C, 0,3–1,2 % Si, 0,2–1,2 % Mn, 0,15–0,3 % P, 0,02–0,08 % S). Iš jo išlydomas reikiamos cheminės sudėties plienas. Lydoma konverteriuose, Marteno ir elektrinėse krosnyse, kuriose oksiduoja ir pereina į šlaką bei dujas ketaus priemaišos. Perdirbamasis ketus sudaro apie 90 % produkcijos.
- Liejamasis ketus.** Skirtas fasoniniams liejiniams lieti ketaus liejyklose. Jame yra daugiau silicio (iki 3,2–3,7 % Si).
- Ferolydiniai.** Tai geležies lydiniai su Si, Mn ir kitais elementais: feromanganu (70–80 % Mn, iki 2 % Si), ferosilicium (9–15 % Si, iki 3 % Mn), veidrodiniu ketumi (10–25 % Mn, iki 2 % Si) ir kt. Naudojami plienui legiruoti ir *išoksidinti* (pliene mažinamas deguonis, panaudojant aktyviau su deguonimi nei su geležimi reaguojančius elementus, kurie sudaro netirpius oksidus, patenkančius į šlaką).
- Šlakas.** Nutekėjęs į specialius kaušus, skystas šlakas sustingdomas vandens čiurkšle ir sutrupa į smulkius gabalėlius. Iš granuliuoto šlako gaminamos šlako plytos, šlako vata šilumos izoliacijai, šlako blokai, cementas ir kt.
- Aukštakrosnių dujos.** Naudojamos kurui, į aukštakrosnę pučiamam orui kaitinti. Tai vertingas kuras, nes Jame yra likę apie 32 % CO ir 2–12 % H₂.

1.3. Plienų gavyba

Plienas gaunamas iš perdirbamoho ketaus ir plieno laužo.

Tam reikia:

- sumažinti anglies kiekį iki 1,5 % ir mažiau (lydymo metu oksidinama anglis jungiasi su deguonimi ir CO duju burbuliukais išsiskiria iš metalo į krosnies atmosferą);
- sumažinti (sudarant šlaką) Si, Mn, P ir kitų priemaišų kiekį: Si, Mn, P, S sudaro netirpius geležyje oksidus arba kitus netirpius (arba mažai tirpius) junginius (SiO_2 , MnO , CaS , $(CaO)_4P_2O_5$ ir kt.), kurie, jungdamiesi su fluisais, plieno paviriuje sudaro šlaką;
- pridėti legiruojančią priedų (Cr, Mn, Ni, V, Mo, W ir kt.) reikiamaoms plieno savybėms gauti.

Plienų lydymo technologinių procesų sudaro įkrovos pakrovimas, jos išlydymas, lydinio apdirbimas po šlako sluoksniu, šlako pašalinimas, lydinio cheminės sudėties analizė ir jos koregavimas, naujo šlako sudarymas ir jo pašalinimas, plieno išoksidinimas ir išpylimas. Perlydant ketų į plieną, anglies ir priemaišų (Si, Mn, P, S) kiekis mažinamas vykstant oksidacijos reakcijoms.

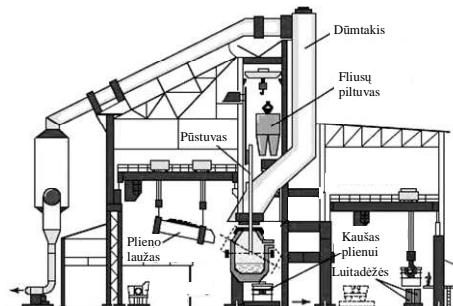
Plienų lydymo proceso skirstymas:

- Bazinis** – galima perlydyti į plieną įkrovą, kurioje yra daugiau sieros ir fosforo. Krosnis išklojama magnezitine arba chromo magnezitine iškloja.
- Rūgštinis** – lydymo procesas yra paprastesnis, ekonomiškesnis ir našesnis už bazinį (rūgštinius klojinius pigesnis ir gerokai patvaresnis, lydymas trunka 20–25 % trumpiau, 10–15 % mažesnės elektros sąnaudos), tačiau ne visada tinkta, nes negalima gauti bazinio šlako ir sumažinti sieros ir fosforo. Ugniai atspariame klojinyje vyrauja rūgštinius oksidas.

Plienas išlydomas deguoniniuose konverteriuose, lankinėse, indukcinėse, plazminėse ir Marteno krosnyse.

1.3.1. Plieno gavyba deguoniniame konvertertyje

Deguoniniame konvertertyje (1.3 pav.) plienas lydomas iš skystojo perdirbamojo ketaus ir plieno laužo, pučiant iš viršaus iki 0,8–1,24 MPa suslėgtą deguonių pro vandeniu aušinamą pūstuvą. Pūstuvas laikomas 0,7–3 m atstumu iki metalo, jo padėtis sutampa su konverterio geometrine ašimi. Plienui lydyti reikalinga temperatūra pasiekiamama ketaus priemaišų oksidacijos procesuose (po pūstuvu temperatūra siekia iki 2000 °C).

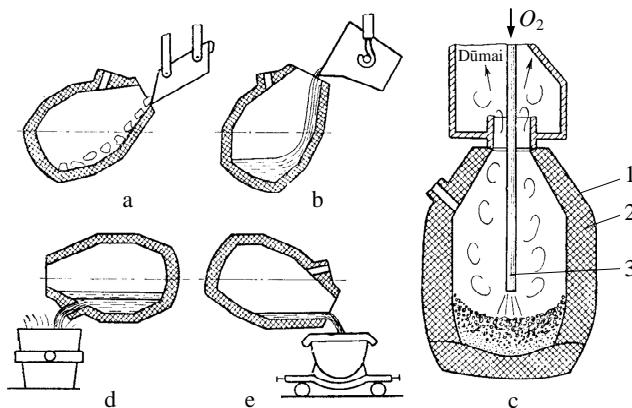


Darbo ypatumai:

- Nereikia kuro.
- Trumpa lydymo trukmė (0,5–1 h).
- Gaunamas aukštos kokybės plienas.
- Reikia daug techniškojo deguonies.

Techninės charakteristikos:

- Talpa – 10–250 t skystojo ketaus.
- Iškloja atlaiko iki 600 lydymų, išklojos storis 700–900 mm.
- Lydalas užima 1/5 konverterio tūrio.



1.3 pav. Deguoninio konverterio schema: *a* – laužo įkrovimas; *b* – ketaus įpylimas; *c* – prapūtimas deguonimis; *d* – plieno išpylimas; *e* – šlako išpylimas; 1 – lakštinio plieno korpusas; 2 – bazinė iškloja; 3 – pūstuvas

Įkrovą sudaro:

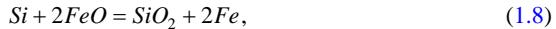
- ◊ skystas perdibamasasis ketus,
- ◊ plieno laužas (iki 30 %),
- ◊ kalkės (jose turi būti daugiau kaip 90 % CaO ir minimalus kiekis SiO_2),
- ◊ boksitai ($Al_2O_3 \cdot nH_2O$) arba lydusis špatas CaF_2 (fluoritas), kurie reikalingi norimos sudėties baziniams šlakui sudaryti.

Pakrovus metalo laužą, supilamas 1250–1400 °C temperatūros ketus. Konverteris pasukamas į vertikalią darbinę padėtį ir nuleidžiamas pūstuvas. Pradėjus tiekti deguonių, į konverterį pakraunamos šlaką sudarančios medžiagos.

Metalurginių procesų metu deguonies srautas intensyviai maišo ketaus sudėties dalis, kurios, reaguodamos su deguonimi, oksiduoja. Pirmiausia oksiduoja geležis, nes jos yra gerokai daugiau nei kitų priemaišų:

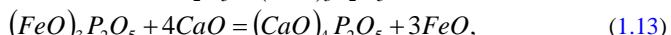
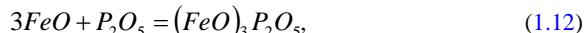
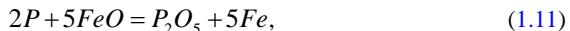


Geležies monoksidas pasklinda ketuje, atiduoda deguonį aktyvesnėms už geležį priemaišoms ir jas suoksidina. Po oksiduojančiojo šlako sluoksniu išdega *Si*, *Mn*, *C*:



FeO tirpstant metale ir šlake, metalas prisodrinamas deguonies, kuris taip pat suoksidina didelę dalį ketaus priemaišų (*Si*, *Mn*, *C*).

Bazinio plieno lydymo procese, esant šlake *CaO* ir *FeO*, vyksta reakcijos:



Susidaręs patvarus kalcio fosfatas ir kalcio sulfidas patenka į šlaką ir atskiriami nuo metalo.

Plieno išoksidinimas. Nors priemaišos jungiasi su deguonimi daug aktyviau nei *Fe*, visiškai suoksidinti jų nepavyksta, nes, mažėjant priemaišų kiekiui, pradeda oksiduotis *Fe*. Geležies oksidai tirpsta geležye, prisotindami metalą deguonies. Plienas, kuriame yra deguonies, netinka apdirbtį spaudimu, nes, deformuojant jį karštą, sutrūkinėja.

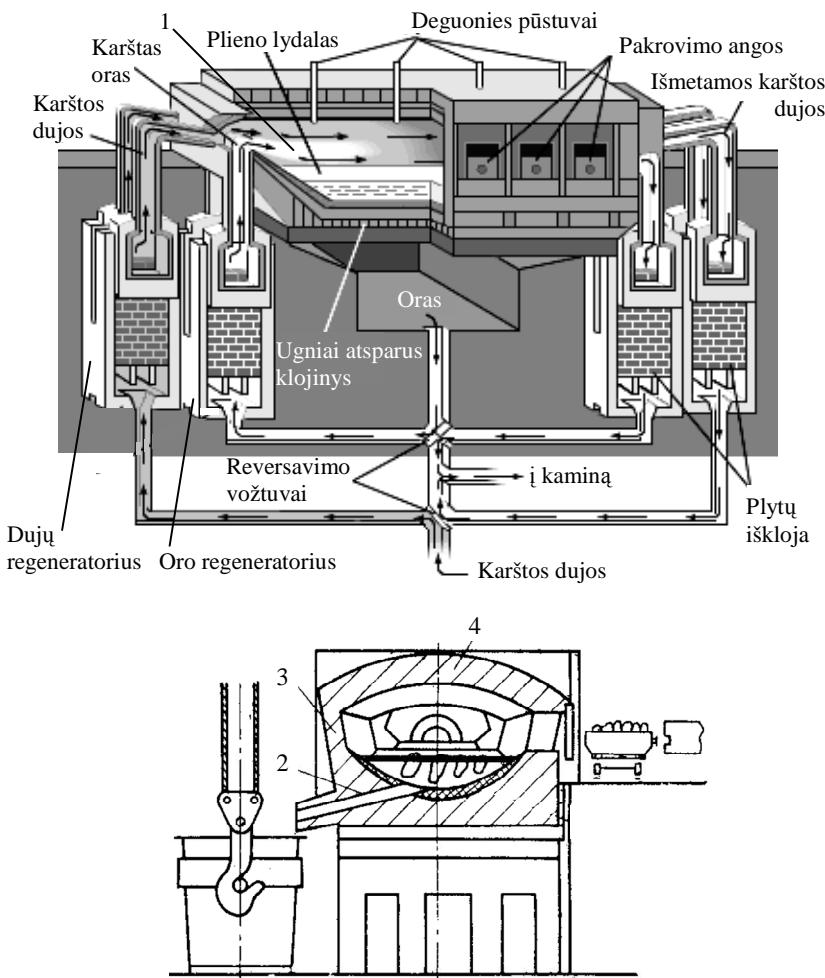
Kai anglies kiekis lydomame metale sumažėja iki reikiama, nustojamas pūsti deguonis. Kadangi metale lieka daug išstirpusio *FeO* ir *O₂*, plienas yra prastesnės kokybės. Prieš išpilant plieną į konverterio į kaušą, jis paeiliui išoksidinamas (deoksiduojamas) feromanganu, po to ferosiliciu ir aliuminiu. Susidarę netirpūs oksidai susijungia į šlaką ir iš konverterio nupilami į šlako kaušą. Kai deoksiduojama tik feromanganu, pliene lieka deguonies, kuris išpilstymo metu reaguoja su anglimi. Susidarę CO intensyviai išsiskiria iš stingstančio plieno, metalo paviršius kunkuliuoja. Gaunamas karštastingis (verdančiojo stingimo) plienas.

1.3.2. Plieno gavyba Marteno krosnyse

Marteno krosnyje plienas išlydomas stambiu liejinių gamybai. Lydymo procesą sudaro tokios operacijos: 1) ugniai atsparaus klojinio smulkus remontas (10–15 min); 2) įkrovos pakrovimas į krosnį ir lydymas; 3) lydinio oksidacija – „virimas“; 4) cheminės sudėties koregavimas; 5) išoksidinimas; 6) plieno išpylimas.

Marteno krosnis (1.4 pav.) yra liepsninė regeneracinė krosnis. Lydomo metalo priemaišos joje oksidinamos krosnies atmosferoje esančiu deguonimi ir pridėta geležies rūda (12–16 % įkrovos masės). Lydomas plienas kaitinamas dujomis arba skystu kuru. Oro į krosnį tiekiama daugiau, nei jo reikia kurui sudeginti. Taip susidaro oksidančioji atmosfera. Marteninis lydymo procesas gali būti bazinis ir rūgštinis.

Kai Marteno krosnis yra prie aukštakrosnės, įkrovą sudaro skystasis ketus (didžioji dalis), plieno laužas, geležies rūda. Kitu atveju – plieno laužas (didžioji dalis) ir luitinis perdirbamasis ketus. Marteno krosnių talpa gali būti nuo 35 iki 900 t.



1.4 pav. Marteno krosnies darbo schema: 1 – liepsnos fakelas; 2 – latakas plienui išpilti; 3 – užpakalinė sienelė; 4 – skliautais

Dujos ir oras, praleisti per regeneratorių (kamera, kurioje suklota su tarpais iškloja iš ugniai atspariu medžiagiu) įkaitintus klojinius, įkaista iki 1000–1200 °C temperatūros ir patenka į krosnies darbinę ertmę (vonią). Degant dujoms susidaro oksiduojantis liepsnos fakelas 1 (fakelo temperatūra siekia 1800–1900 °C), kuris kaitina ir lydo įkrovą. Degimo produktai ir dulkės pasišalina pro kitoje krosnies pusėje esančius kanalus į šlako rinktuvus. Juose nusėda stambios dulkės (50–70 %). Karštos dujos iš šlako rinktuvų (į temperatūrą siekia 1500–1600 °C), praleistos regeneratorių kanalais, įkaitina juose esančias plynas ir ataušusios patenka į kaminą. Kai ataušta kairiosios pusės regeneratoriai, orą ir dujas, perjungus reversavimo vožtuvas, pradeda kaitinti dešinieji regeneratoriai.

Plieno lydymas bazinėje Marteno krosnyje trunka 8–10 val. Lydymo procesui ir priemaišų oksidavimui pagreitinti oras papildomas deguonimi arba deguonis tiesiog įpučiamas į krosnį vandeniu aušinamais pūstuvaus, įstatomais į skyles krosnies skliaute 4.

Pirmausia į krosnį kraunama rūda ir flusai (klintys $CaCO_3$), o jiems įkaitus – plieno laužas. Įkaitus plieno laužui, į krosnį supilamas skystas ketus. Lydantis įkrovai, ketaus priemaišos aktyviai oksiduoja, reaguodamos su krosnies atmosferos deguonimi ir geležies oksidais Fe_2O_3 , patenkančiais į lydomą metalą iš rūdos ir plieno laužo.

Priemaišų oksidai SiO_2 , MnO , P_2O_5 , taip pat kalkės CaO (bazinis flusas) virš lydinio sudaro šlako sluoksnį, kuriame yra daug FeO . Metalo likusias priemaišas, vykstant (1.8), (1.9), (1.11)–(1.13) reakcijoms, toliau oksiduoja FeO , kuris iš šlako vėl pereina į lydinį. Susidarę priemaišų oksidai pereina į šlaką ir jis nupilamas, nes fosforo oksidas lengvai redukuojasi ir iš šlako grįžta į metalą. Šio lydymosi metu beveik visiškai oksiduojaši Si , iš dalies Mn ir P . Jungdamasis su metalu ištirpusiu deguonimi, pagal (1.10) reakciją oksiduojaši anglis. Susidarę CO burbulukai skverbiasi iš metalo ir jis pradeda „virti“ (įkrovoje turi būti 0,5–0,6 % C). Vykdant šiam procesui, šalinama anglis, iš dalies pasišalina dujos ir nemetalinių priemaišos, suvienodėja temperatūra krosnies vonioje. Sierai šalinti pagal (1.14) reakciją pridedama kalkių.

Pasiekus norimą C kieki, o S ir P leistinas ribas, virimo procesas baigiamas. Kadangi po virimo pliene vis tiek lieka FeO , metalas išoksidinamas Mn , Si arba Al .

Lydant legiruotąjį plieną, į lydinį dedama legiruojančių priedų – ferochromo, ferotitano, feromolibdeno, feromangano arba grynuju metalu Ni , Cu ir kt. Baigus koreguoti cheminę sudėtį, plienas išpilamas į kaušus, o iš jų – į luitadėžes.

Rūgštinėje Marteno krosnyje nesusidaro bazinių šlakų, reikalingų S ir P šalinti, todėl įkrovoje ir kure S ir P turi būti kuo mažiau (0,025–0,04 %). Išlydytas plienas yra geresnės kokybės, nes turi mažiau nemetalinių priemaišų ir ištirpusių dujų, tačiau brangesnis, kadangi ilgas lydymo procesas (lėčiau oksiduojaši priemaišos). Iš jo liejamieji svarbios paskirties gaminiai: variklių alkūniniai velenai, artilerijos pabūklai ir kt.

1.3.3. Plieno gavyba elektrinėse lydkrosnėse

Plienui lydyti naudojamos lankinės ir tiglinės indukcinės krosnys.

Privalumai: greitas įkrovos įkaitinimas ir išlydymas; tiksliai reguliuojama temperatūra; lydoma oksiduojančioje, redukuojančioje ir neutralioje aplinkoje arba vakuumu; geresnė plieno cheminė sudėtis; lydomas visų rūšių plienas.

Trūkumas: dėl didelių energijos sąnaudų šios krosnys naudojamos ribotai, nes konverteriuose ir Marteno krosnyse plieno lydymo procesai yra pigesni.

Lankinė lydkrosnė (1.5 pav.). Joje elektros energija verčiama į šiluminę degant elektros lankui tarp elektrodų 1 ($l=3$ m; $d=0,2\text{--}0,6$ m) ir išlydyto metalo 2 (lanko zonoje pasiekama $4000\text{--}6000$ °C temperatūra). Labiausiai paplitusi trifazė lankinė krosnis. Lanko ilgis reguliuojamas automatiškai vertikaliai pastumiant elektrodus.

Metalinis korpusas iš vidaus išklotas bazinėmis (*magnezitinėmis*) arba rūgštinėmis (*dinasinėmis*) ugniai atspariomis medžiagomis 3. Krosnis pakraunama nuėmus skliautą 4 arba pro pakrovimo angą 5. Išlydytas metalas išpilamas į kaušą 9, pavertus krosnį pavertimo mechanizmu 6 per išleidimo lataką 7.

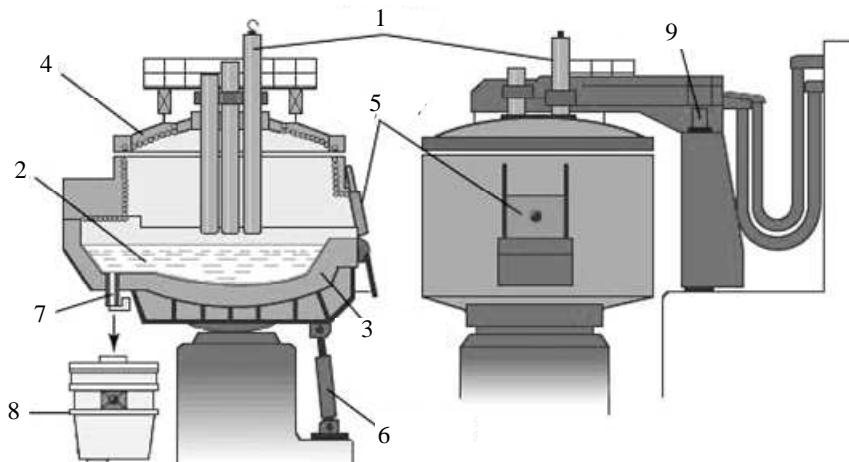
Lydymo procesas skirstomas į **bazinį** (vyksta (1.8)–(1.14) reakcijos) ir **rūgštinių**.

Bazinėse lankinėse krosnyse plienas lydomas iš plieno laužo (iki 90 %) ir luitinio perdirbamojo ketaus (iki 10 %), kuris reikalingas anglies kiekiui įkrovoje padidinti, kad, angliai oksiduojantis, plienas virtų (kaip Marteno krosnyje). Ivairioms priemaišoms oksiduoti į išlydytą metalą dedama geležies rūdos, o baziniams šlakui sudaryti ir fosforui bei sierai iš metalo šalinti – kalkių. Lankinėse krosnyse lengva reguliuoti ir keisti šlako sudetį. Šlakas nupilamas 2–3 kartus (tiesk kartą dedama rūdos ir kalkių). Dėl to fosforo sumažėja iki 0,015 %, o verdant susidarius anglies oksidui, sumažėja ir anglies. Kai pliene lieka reikiamas anglies kiekis, baigiam „virti“ ir iš krosnies dar kartą nupilamas šlakas, krosnį pavertus į darbinės eigos pusę.

Taip baigiasi oksidacinis lydymo procesas. Tuomet į lydkrosnę vėl dedama kalkių, lydžiojo špatą, smulkiai malto kokso redukuojančiam šlakui sudaryti.

Redukuojančio lydymo metu metalas išoksidinamas, šalinama siera, dedama legiruojančių ferolydinų reikiamos cheminės sudetės plienui gauti.

Rūgštinių plieno lydymo procesas daug našesnis, tačiau metalinėje įkrovoje turi būti mažai *S* ir *P*, kadangi, naudojant rūgštinių šlaką, jie nepašalinami.



1.5 pav. Lankinė lydkrosnė: 1 – elektrodai (grafitiniai, angliniai); 2 – plieno lydalas; 3 – ugniai atspari medžiaga; 4 – skliautas; 5 – darbinė anga lydymo eigai valdyti; 6 – hidraulinis pavertimo mechanizmas; 7 – išleidimo latakas; 9 – kaušas; 10 – elektrodų stovas

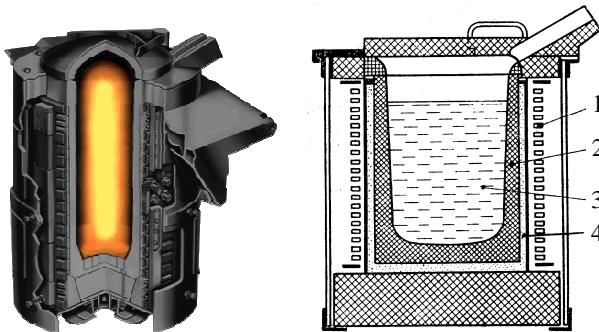
Tiglinė indukcinė lydkrošnė (1.6 pav.). Ją sudaro daugiavijis vandeniu aušinamas induktorius 1, ugniai atsparus tiglis 2, tarp jų – šilumą izoliuojantis intarpas 4. Mažesniems šilumos nuostoliams gauti būti naudojamas nuimamas skliautas 5.

Tiglis išklojamas rūgštine arba bazine ugniai atsparia medžiaga. Daugumos krošnių klojinys rūgštinis. Bazinis klojinys naudojamas plienui, kuriame yra daug *Mn*, *Ni*, *Ti* ir *Al*, lydinti. Lydant krošnyje su rūgščia iškloja, įkrovoje turi būti mažiau *S* ir *P*. Indukcinėje krošnyje galima išlydyti visų markių plieną.

Lydymo procesą sudaro įkrovos pakrovimas (geležies, plieno laužo, ferolydinių), išlydymas, cheminės sudėties koregavimas, išoksidinimas ir išpylimas.

Praleidžiama induktoriumi kintamoji srovė sukuria kintamą elektromagnetinį lauką, dėl to tiglyje indukuojasi sūkurinės srovės, kurios įkaitina metalinę įkrovą 3 iki reikiamaus temperatūros. Įkrovai išsilydžius, i tiglį pakraunamas šlakas, kuris apsaugo metalą nuo prisisotinimo dujomis iš atmosferos, jam esant, mažiau išdegta legiruojančių elementų. Šlaką įkaitina metalo šiluma, tačiau jo vidutinė temperatūra yra žemesnė už metalo temperatūrą. To nepakanka, kad tarp metalo ir šlako intensyviai vyktų metalurginiai procesai, todėl reikia naudoti neužterštą priemaišomis įkrovą, nes nepavyksta labai sumažinti *S* ir *P*.

Baigus lydymo procesą, plienas išoksidinamas ferosiliciu, feromanganu, aliuminiu ir jei reikia – legiruojamas. Lydymo trukmė 1 t talpos indukcinėje krošnyje apie 45 min.



1.6 pav. Tiglinė indukcinė plieno lydymo krošnis:

1 – induktorius; 2 – tiglis; 3 – įkrova; 4 – izoliacinė medžiaga

1.3.4. Plieno išpilstymas ir plieninio lito sandara

Lydymo krošnyse išlydytas plienas išpilamas į kaušus, iš kurių išpilstomas 1) į luitadėžes (1.7 pav.);

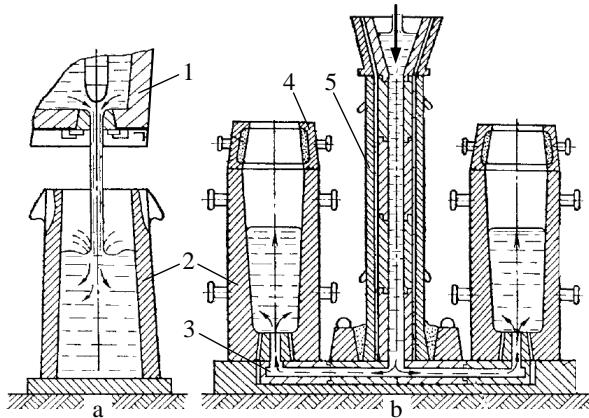
2) nenutrūkstamo liejimo įrenginiuose (1.8 pav.).

Luitadėžėse plienas sukietėja. Gauti luitai apdirbami spaudimo būdu.

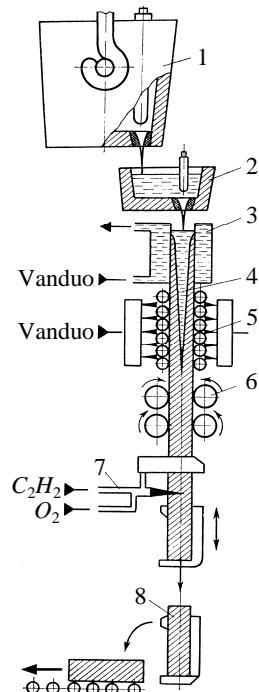
Ketaus luitadėžės pripildomas:

- Iš viršaus (1.7 pav., a). Plienas pilamas iš kaušo 1 į luitadėžę 2 iš aukštai. Metalo purslai sustingsta ant luitadėžės sienelių, sudarydami oksidų plėveles, todėl luito paviršius gaunamas prastesnis.
- Sifoniniu būdu (1.7 pav., b). Metalas išpilstomas į keletą luitadėžių, jas pripildant iš apačios per centrinių lietų 5 ir liečio kanalus 3. Luito paviršius yra švarus, be purslų.

Trūkumas – dalis metalo tenka liečiui; tekėdamas kanalais metalas aušta, todėl jis turi būti įkaitintas iki aukštesnės temperatūros. Šis būdas taikomas legiruotajam ir aukštostos kokybės plienui išpilstyti. Mažesniams subėgimo tuščumos gyliui luituose gauti naujojamas gaubtas 4, dėl kurio plienas ilgiau būna skystas ir papildo kietėjantį luitą metalu.

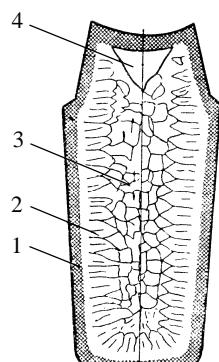


1.7 pav. Plienų išpilstymas į luitadėžes: a – iš viršaus; b – sifoniniu būdu; 1 – kaušas; 2 – luitadėžė; 3 – liečio kanalas; 4 – gaubtas; 5 – centrinis lietus;



1.8 pav. Nenutrūkstamo liejimo įrenginys

Nenutrūkstamo liejimo įrenginje (1.8 pav.) skystas metalas iš kaušo 1 pro tarpių rezervuarą 2 teka į vandeniu aušinamą kristalizatorių 3, iš kurio purkštuvais 5 aušinamą luitą su skysta šerdimi 4 traukia ritinėliai 6. Sukietėjęs luitas supjaustomas acetileno degikliu 7. Kadangi į subėgimo vietas pastovai priteka skysto metalo, luite nėra subėgimo tuščumų, paviršius yra geros kokybės. Šiuo išpilstymo būdu gaunami vienodžiausios cheminės sudėties ir struktūros luitai.



Plienų lito sandara (1.9 pav.). Pilstomo į luitadėžes plieno temperatūra yra 1540–1560°C. Susiliedamas su luitadėžės sienelėmis plienas aušta, pradeda kieteti, todėl prie sienelių atsiranda smulkūs kristalai 1. Už šio sluoksnio yra orientuoti į luito centrą išsišakoję kristalai 2 (dendritai), o luito centre – stambūs, neturintys aiškios orientacijos kristalai 3. Vėliausio stingimo vietoje susidaro subėgimo tuščuma 4. Priklausomai nuo išoksidinimo laipsnio (išoksidinama lydkrosnėje, kauše, luitadėžėje ir mišriai) subėgimo tuščuma gali išsiskirstyti pūslelių ertmėse įvairiose luito dalyse. Apdirbant spaudimu (valcuojant arba kalant) šie burbuliukai susivirina. Nevienalytė yra ir plieninio lito cheminė sudėtis.

1.9 pav. Plienų lito struktūra

1.3.5. Plieno kokybės gerinimas

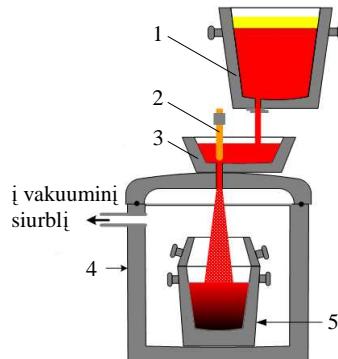
Marteno bei elektrinėse lydymosi krosnyse ir deguoniniuose konverteriuose gauto plieno kokybė yra gerinama mažinant kenksmingųjų priemaišų ir kitų nemetalinių intarpų kiekį metale. Naudojami būdai: rafinavimas sintetiniu šlaku, vakuuminis degazavimas, elektrošlakinis perlydymas, perlydymas vakuuminėje lankinėje krosnyje, perlydymas elektronų pluoštu, perlydymas plazminėse ir kt. krosnyse.

Rafinavimas kauše sintetiniu šlaku. Elektrinėje krosnyje išlydytas šlakas, kurio sudėtyje yra apie 55 % CaO , 40 % Al_2O_3 , nedaug SiO_2 , MgO ir minimaliai FeO , supilamas į kaušą. Ant jo iš krosnies pilamas plienas. Maišantis plienui su šlaku, intensyviai vyksta metalurginės reakcijos (gerokai greičiau negu išprastoje lydymo krosnyje), dėl to (taip pat ir dėl mažo FeO kieko šlake) pliene sumažėja sieros, deguonies ir nemetalinių priemaišų.

Vakuuminis degazavimas kauše arba luitadėžėje. Iš lydinio efektyviai pašalinamos ištirpusios dujos. Vakuumas suardo pusiausvyrą lydinyje ir dujos pasišalina pačios. Degazuojama įvairiais būdais: kaušas su plienu 12–15 min. laikomas vakuumo kameroje, luitadėžės pripildomos esant vakuumui (1.10 pav.), plienas perpilamas iš kaušo į kaušą esant vakuumui ir kt.

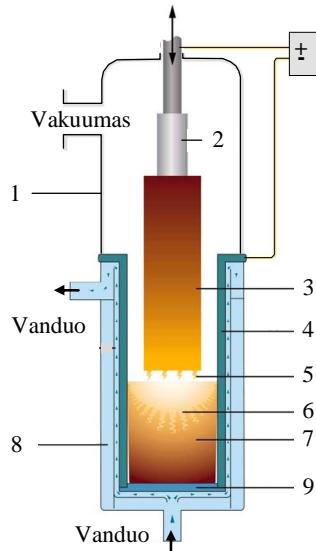
1.10 pav. Vakuuminis degazavimas luitadėžėje:

- 1 – kaušas;
- 2 – fiksavimo strypas;
- 3 – tarpinis išpylimo kaušas;
- 4 – vakuumo kamera;
- 5 – luitadėžė



Perlydymas vakuuminėje lankinėje krosnyje (1.11 pav.). Šioje krosnyje perlydomas elektrodas (mechaniskai apdirbtas metalo luitas) 3 tvirtinamas prie vandeniu aušinamo koto 2. Krosnies kameroje 1 pries lydymą siurbiamas oras, kol lieka 1,3 Pa slėgis (daugiau slėgis nemažinamas, nes blogėja lanko degimo stabilumas). Lanko zonoje elektrodas lydos ir, subėgęs į vandeniu aušinamą varinę luitadėžę 4, sustingsta į luitą 7. Perlydant tokio vakuumo sąlygomis, sumažėja dujų tirpumas pliene, iš metalo geriau pašalinami oksidiniai intarpai.

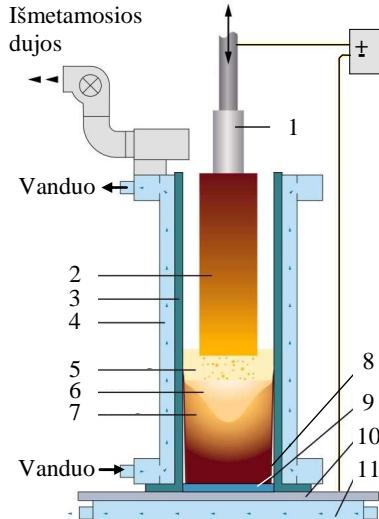
1.11 pav. Vakuuminės lankinės perlydymo krosnies schema: 1 – kamera; 2 – elektrodo laikiklis; 3 – lydisis elektrodas; 4 – varinė luitadėžė; 5 – elektros lankas; 6 – skystas metalas; 7 – luitas; 8 – vandeniu aušinamas korpusas; 9 – apatinė plokštė



Elektrošlakinis perlydymas (1.12 pav.).

Šiuo būdu perlydomi valcuoti, kalti ar liejimo būdu gauti plieno ruošiniai 2 (elektrodai). Per skystą šlaką 5 ir į jį panardintą elektrodą 2 praleidžiama elektros srovė, kuri įkaitina šlaką iki 1700–2000 °C temperatūros. Karštasis šlakas lydo elektrodo galą ir skysto metalo lašai, tekėdami žemyn pro aktyvaus šlako (kuriame tam tikru santykium yra CaF_2 , CaO arba (ir) Al_2O_3 ir kt.) sluoksnį, apsivalo nuo nemetalinių priemaišų (adsorbuojamos arba ištirpsta šlake) ir dujų. Lydantis elektridui, po šlaku susidaro skysto metalo vonelė 6, kuri luitadėžėje 3 létai kristalizuoja, nes yra aušinama vandeniu. Dél kryptingos plieno kristalizacijos iš apačios į viršų lengviau iškyla nemetalinės priemaišos ir dujos, o iš viršaus nuolat tekant skystam metalui nesusidaro subėgimo tuščumų. Šlakas apsaugo skystą metalą nuo atmosferos poveikio. Gaunamas aukštos kokybės plieno luitas 7. Proceso metu šoniniuose liejinio paviršiuose susidaro 1–3 mm storio šlako plutelė 8, kuri dengia glotnų paviršių. Kai luitas luitadėžėje sukietėja, plokštė 10 ir padas 11 su juo nuleidžiami ir luitas nukeliamas kranu.

Po elektrošlakinio perlydymo sieros koncentracija pliene sumažėja iki 0,002–0,008 %, deguonies ir nemetalinių intarpų – 1,5–2,5 karto.



1.12 pav. Elektrošlakinio perlydymo krosnies schema:

1 – elektrodo laikiklis; 2 – elektrodas; 3 – varinė luitadėžė; 4 – kristalizatorius; 5 – skysto šlako vonia; 6 – skysto metalo vonia; 7 – luitas; 8 – šlako plutelė; 9 – numušama plokštė; 10 – pado plokštė; 11 – vandeniu aušinamas padas

1.4. Spalvotųjų metalų gavyba

Spalvotieji metalai skirstomi į grupes:

- Sunkieji metalai – švinas (Pb), varis (Cu), nikelis (Ni), alavas (Sn), cinkas (Zn).
- Lengvieji metalai – litis (Li), magnis (Mg), berilis (Be), aliuminis (Al), titanas (Ti).
- Taurieji metalai – rodis (Rh), platina (Pt), paladis (Pd), auksas (Au), sidabras (Ag).
- Sunkiai lydūs – volframės (W), tantalas (Ta), molibdenas (Mo), niobis (Nb), iridis (Ir).
- Lengvai lydūs – galis (Ga), indis (In), litis (Li), alavas (Sn).
- Radioaktyvieji – uranas (U), radis (Ra), toris (Th), aktinis (Ac), protaktinis (Pa).
- Labai reti – galis (Ga), indis (In), germanis (Ge), hafnis (Hf), lantanas (La), talis (Tl), ceris (Ce), renis (Re).

Mašinų gamyboje daugiausia naudojamas Cu , Al , Mg , Ti , Zn , Ni , Pb ir Sn . Jie naudojami gryni arba įeina į daugelio lydinių sudėtį.

1.4.1. Vario gavyba

- Vario rūdos (jose yra iki 6 % Cu) skirstomos į:
- Sulfidines, kuriose Cu yra junginiuose su siera: $CuFeS_2$, Cu_2S , CuS .
 - Oksidines, turinčias oksidų Cu_2O , CuO ar hidrokarbonatų $CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$.
- Rūdų nenaudingojį uoliena susideda iš prito (FeS_2), kvarco (SiO_2), Mg ir Ca karbonatų, taip pat silikatų, kuriuose yra Al_2O_3 , Ca , Mg ir Fe oksidų. Rūdose būna nedideliai kiekiai Zn , Pb , Ni ir kt. metalų.

Apie 80 % vario gaunama iš sulfidinių rūdų, apie 15 % – iš oksidinių ir iki 5 % randama vario grynuolių.

Varis iš rūdų dažniausiai išgaunamas pirometalurginiu būdu, rečiau – hidrometalurginiu, taikomu dažniausiai oksidinėms rūdoms.

Vario gavyba pirometalurginiu būdu:

- Rūdos paruošimas lydti (sodrinimas, apdeginimas).
 - Rūdos lydymas į šteiną liepsninėse arba elektrinėse krosnyse 1250–1300 °C temperatūroje.
 - Susidaro šteinas (Cu ir Fe sulfidų lydiny, kuriame yra 20–55 % Cu) ir šlakas.
 - Skysto šteino prapūtimas oru konverteriuose – oksiduojaasi Cu ir Fe sulfidai, kurie virsta šlaku, $S - SO_2$ dujomis.
 - Gaunamas juodasis varis – 98,5–99,5 % Cu ir iki 1,5 % įvairių priemaišų (Fe , S , Ni , Sn , Ag , Au ir kt.).
 - Juodojo vario rafinavimas perlydant (oksiduojamos priemaišos ir pašalinimos su dujomis ir šlaku). Gaunamas techninis varis, kuriame yra 99,5–99,7 % Cu.
- Norint gauti varį bei priemaišų, techninis varis rafinuojamas elektrolizės būdu. Gaunamas labai grynas varis (99,95 % Cu). Anodas – rafinuotas techninis Cu , katodas – plonus gryno Cu plokštelių ant kurių nusėda gryno Cu sluoksnis vykstant elektrolizei. Elektrolitas – $CuSO_4$ (3–4 %) ir H_2SO_4 (10–16 %) vandeninis tirpalas. Vonios dugne kaupiasi dumblas, kuriame yra Au , Ag , Se , As (arseno), Bi (bismuto), Te (telūro) ir kt. Katodai vėliau perlydomi elektrinėse krosnyse.

1.4.2. Aliuminio gavyba

Aliuminio yra apie 270 mineralų sudėtyje. Aliuminio rūdos – boksitai (pagrindinė rūda), nefelinai, alunitai ir kaolinai, kuriuose yra 30–70 % Al_2O_3 . Pagrindiniai procesai:

- Bevandenio Al_2O_3 gavyba iš boksitu.** Šarminis būdas: **a)** susmulkintas boksitas paveikiamas natrio šarmo tirpalu $NaOH$; **b)** gautas natrio aluminatas $NaAlO_2$ hidrolizuojamas, $NaAlO_2 + 2H_2O = NaOH + Al(OH)_3$; **c)** iš gauto aluminio hidroksido $Al(OH)_3$ kaitinančius išgarinamas vanduo ir gaunamas grynas Al_2O_3 .
 - Aliuminio oksido tirpalo išlydytame kriolite elektrolizė.** Anodas – angliniai elektrodai, katodas – 300 mm skystas Al sluoksnis, elektrolitas – kriolito Na_3AlF_6 ir Al_2O_3 (8–10 %) lydalas. Vykdant elektrolizei (elektrolito temperatūra apie 1000 °C), išsiškyrės Al kaupiasi vonios dugne po elektrolito sluoksniu ir periodiškai (kas 3–4 paras) išsiurbiamas, naudojant vakuuminį kaušą.
- Išlydytam kriolitui gauti naudojamas lydžiojo špato (fluorito) koncentratas (95 % CaF_2), sieros rūgštis, aliuminio hidroksidas ir kalcinuota soda.

3. **Rafinavimas.** Elektrolizės būdu gautame aluminyje yra metalinių (*Fe, Si, Cu, Zn*) ir nemetalinių (*C, Al₂O₃*) priemaišų ir deguonies, vandenilio, *CO*, *CO₂* dujų. Rafinuojama *chloru*, prapučiant ji pro išlydytą metalą ir *elektrolizės būdu*. Gaunamas iki 99,9 % grynumo *Al*.

1.4.3. Magnio gavyba

Magnio rūdos – karnalitas, magnezitas, dolomitas, bišofitas.

Magnis gaunamas:

1. **Elektrolizės būdu** iš karnalito.

Technologinis procesas: **a)** karnalito $MgCl_2 \cdot KCl \cdot 6H_2O$ sodrinimas (atskiriamas *KCl* ir netirpios priemaišos); **b)** vandens pašalinimas iš karnalito; **c)** juodojo magnio gavyba elektrolizės būdu. Anodas – grafitiniai elektrodati, katodas – plieninės plokštės, elektrolitas – išlydytos $MgCl_2$ (svarbiausias komponentas), *NaCl*, *KCl*, *CaCl₂* druskos. Vykstant elektrolizei, skyla $MgCl_2$. Katodu ertmėje į paviršių išplaukia *Mg*, (nes lengvesnis už elektrolitą), anodų ertmėje – chloras; **d)** rafinavimas – metalinių (*Fe, Na, K, Al, Ca*) ir nemetalinių (*MgCl₂, KCl, NaCl, CaCl₂, MgO*) priemaišų pašalinimas, perlydant juodajį magnį su flusais. *Mg* grynumas iki 99,9 %.

2. **Terminiu būdu**, redukuojant *Mg* iš degto magnezito arba dolomito.

1.4.4. Titano gavyba

Žinoma apie 70 titanio mineralų. Pramoniniu požiūriu vertingos titanio rūdos: ilmenitas (daugiausia telkinių), rutilas, titanio magnetitas, kuriose yra 20–60 % *TiO₂*.

Pagrindiniai procesai, gaunant *Ti* iš ilmenito rūdos:

- Ilmenito rūdos sodrinimas (gaunamas koncentratas, kuriamo yra apie 45 % *TiO₂*).
 - Fe* oksidų (*FeO* ir *Fe₂O₃*) atskyrimas nuo *TiO₂*, perlydant koncentratą su antracitu terminėse krosnyse: čia *Fe* oksidai redukuojasi iki geležies, kuri įsianglina ir kaip ketus nusėda krosnies apačioje; *TiO₂* pereina į šlaką, kuriamo yra apie 90 % *TiO₂*.
 - Titano tetrachlorido *TiCl₄* susidarymas: *Ti* šlakas sumaišomas su anglimi ir paveikiamas chloru, $TiO_2 + 2C + 2Cl_2 = TiCl_4 + 2CO$.
 - Ti* redukavimas iš *TiCl₄* magnioterminiu būdu: tarp skysto magnio ir *TiCl₄* 1000 °C temperatūroje vyksta reakcija $TiCl_4 + 2Mg = Ti + 2MgCl_2$.
 - Gauto *Ti* rafinavimas distiliuojant vakuume (išsilydo ir išgaruoja *Mg* ir magnio chloridai).
 - Rafinuoto *Ti* perlydymas į luitus vakuuminėse lankinėse krosnyse. Vakuumas apsaugo *Ti* nuo oksidacijos ir padeda pašalinant *H₂*, *Mg*, *MgCl₂*.
- Ti* yra apie 99,7 % grynumo.

2. LIEJININKYSTĖ

Liejimas yra tokis gamybos būdas, kai iš specialiai pagamintą liejimo formą priplilama skysto metalo (ketaus, plieno, žalvario, bronzos, aliuminio, magnio, cinko ir kt. metalų lydinių). Liejiniais vadiname įvairių formų ir svorio dirbinius (ruošinius, detales, gaminius ir kt.), pagamintus liejant („Царь пушка“ – bronsa, 39,3 t, 1586 m.; „Царь колокол“ – bronsa, apie 200 t, 1735 m.). Taip pat liejami dirbiniai iš stiklo, plastiko, gipso, keramikos ir kt.

Liejimo būdai. Tai liejimas smėlio formose; kokilinis; iš kevalines formas; pagal išlydomuosius modelius; liejimas slegiant; liejimas reguliuojant dujų slėgį; išcentrinis; tolydusis; skystasis štampavimas ir kt.

2.1. Pagrindinės liejamosios lydinių savybės

Fasoninių liejinių daugiausia gaminama iš lydinių, kurių pagrindą sudaro geležis (ketus ir plienas – tenka iki 95 % liejinių), varis (bronsa ir žalvaris), aliuminis. Reikiamos konfigūracijos dirbinius nesunku išlieti iš bronzos, silumino, pilkojo ketaus, o iš titano, legiruotojo plieno, specialiųjų bronzų ir žalvario liejinius gaminti yra sunku.

Pagrindinės liejamosios savybės, kurios lemia lydinio tinkamumą dirbinui išlieti:

1. Takumas – tai skysto metalo ir jo lydinių geba tekėti liejimo formoje ir užpildyti jos ertmę. Geras takumas mažina subėgimo tuštumas, porėtumą, ištrūkius ir kt.
2. Susitraukimas – tai liejinio linijinių matmenų ir tūrio sumažėjimas, jam auštant nuo užpylimo iki aplinkos temperatūros. Lydiniui trauktantis, kristalinizacijos metu atsiranda subėgimo tuštuma, kurios išvengiamai prie liejinio prijungus prieląja. Terminis susitraukimo trukdymas atsiranda tuomet, kai atskiros liejinio dalys aušta skirtingu greičiu. Mechaninis susitraukimo trukdymas atsiranda liejiniui trinantis į formas sienele arba esant išsikišusioms liejinio dalimis. Dėl to liejinys gali išsikraipyti, atsirasti plyšių. Ketaus liejinių vidutiniškai susitraukia 1 %, aliuminio liejiniai susitraukia apie 1,3 %, o plieno liejiniai – apie 2 %. Tačiau konkretus liejinų susitraukimas priklauso nuo liejinų konstrukcijos ir cheminės sudėties.
3. Polinkis sugerti dujas ir sudaryti dujinus intarpus (kiaurymes ir pūslės). Daugiausiai ištirpsta vandenilio, deguonies ir azoto dujų. Iš skysto metalo dujos išsisiskiria tuo atveju, kai išorės slėgis yra mažesnis už tirpale esančių dujų slėgi. Auštant skystam metalui, paspartėja kristalinizacija ir sumažėja dujų tirpumas metale. Tačiau padidėja skysto metalo klampa ir dujų burbuliukai sunkiau pakyla į viršų. Šitaip susidariusios dujų pūslės lieka, kol lydinus sukietėja.
4. Polinkis susidaryti nemetalinėms priemaišoms. Nemetalinės priemaišos dažniausiai nepageidautinos, nes nemetaliniai intarpai suardo liejinio vientisumą ir tose vietose sukelia įtempių koncentracijas. Priemaišos atsiranda dėl cheminių reakcijų skystame metale, dėl užteršimo šlako ir formavimo mišinio dalelėmis ir kitų technologinių ypatumų.
5. Patvarumas ištrūkiams (karšto ir šalto lydinio). Šaltieji plyšiai susidaro dėl didelių liejimo įtempių. Karštieji plyšiai liejinuose susidaro lydinio kristalinizacijos metu, kol egzistuoja skysta ir kieta fazės. Šiuo momentu lydinus yra mažai atsparus ir plastiškas ir, net mažai stabdant traukimąsi, tame gali atsirasti karštųjų plyšių.
6. Liekamųjų įtempių susidarymas. Jie susidaro liejinui auštant formoje. Terminiai liekamieji įtempiai ataušusiamė liejinyje sumažinami atkaitinant. Mechaniniai liekamieji įtempiai išnyksta liejinj išmušus iš formos.

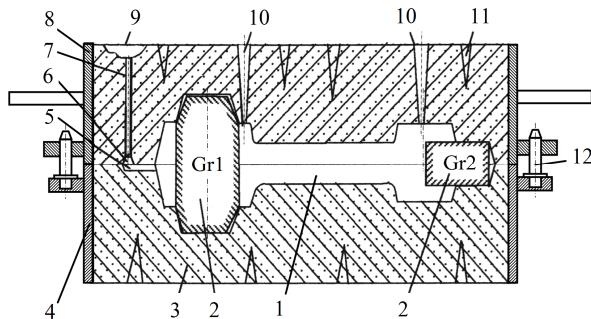
7. Polinkis į likvaciją. Lydinio cheminės sudėties nevienodumas mažinamas modifikuojant skystą metalą, mažinant dujų ir nemetalinių medžiagų kiekį ir kt.

2.2. Liejinių gamyba smėlio formose

Ketaus ir plieno liejiniai liejami drėgnose ir sausose smėlio formose.

Drėgnos formos – tai ką tik pagamintos formos, kuriose yra apie 3,5–6,5 % drėgmės. Liejinių gamyba drėgnose smėlio formose ekonomiškesnė, kadangi sutrumpėja liejinio gamybos laikas. Tačiau drėgnų smėlio formų trūkumas – mažas formos stipris.

Sausos formos yra stipresnės, laidesnės dujoms ir pačios mažiau jų išskiria nei drėgnos formos. Nuo formos kokybės priklauso liejinio kokybė.



2.1 pav. Išilginis formos pjūvis: 1 – formos ertmė; 2 – gurgučiai; 3 – formavimo mišinys; 4 – apatinė formadėžė; 5 – tiektuvas; 6 – šlakų gaudytuvas; 7 – vertikalus kanalas; 8 – viršutinė formadėžė; 9 – piltuvas; 10 – ortakis; 11 – duju išleidimo kanalai; 12 – centravimo kaiščiai

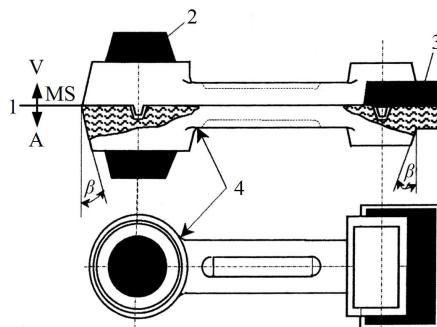
2.1 paveiksle parodyta surinkta forma, panaudojus išardomajį modelį ir gurgučius. Formos darbinė ertmė yra abiejose pusformėse.

Formadėžės dažniausiai gaminamos iš plieno (suvirinamos arba liejamos), ketaus ir aliuminio (liejamos). Formuojant rankomis naudojamos ir medinės formadėžės.

2.2.1. Modeliai ir liejiniai

Modeliai ir gurgdėžės gaminami mediniai, gipsiniai, o masinei gamybai – iš ketaus, aliuminio, vario lydinių ar plastiko.

Nesudėtingo liejinio modelis gaminamas iš vienos dalies. Sudėtingesnių liejinių modeliai gaminami iš dviejų (2.2 pav.) ar net kelių dalių. Išsikišusios modelio dalys, kliudančios modelį išimti iš sutankinto mišinio, daromos nuardomos.



2.2 pav. Modelio brėžinys

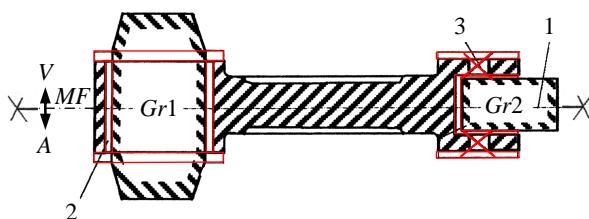
Modelis turi skyros plokštumą 1 (*MS*), gurgučių ženklus 2 ir 3 (nuspalvinti juodai), kurių konfigūracija atitinka gurgučius *Gr1* ir *Gr2*. Modeliu iš formos lengviau išimti, nesugadinant formos ir gurgučių, jo vertikalios sienelės turi nuolydžius β (2.2 pav.). Jie parenkami iš lentelių. Sienelių susikirtimo vietos 4 turi būti užapvalintos.

Gaminamo modelio matmenys yra didesni, nes įvertinamas susitraukimas ir apdirbimo užlaida, kuri nurodoma liejinio brėžinyje. Jei galima, gurgučių reikėtų vengti, kadangi konstrukcija be gurgučių yra ekonomiškesnė.

Modeliai ir gurgdėžės yra gaminami pagal liejinio brėžinį (2.3 pav.). Pradinis dokumentas liejinio brėžiniui braižyti yra detalių brėžinys.

Liejinio brėžinyje nurodoma:

- Modelio ir formos skyros plokštuma (MF)*. Modelio ir formos viršutinė ir apatinė dalys gaminant formą žymimos raidėmis *V* (viršus) ir *A* (apačia). Netiesi skyros plokštuma gerokai paprangina modelio ir formavimo kainą.
- Mechaninio apdirbimo užlaidos*. Brėžinyje brėžiamos plona linija.
- Gurgučių ženklių išdėstymas ir matmenys*. Gurgučių ženklių daromi gurgučiui tvirtinti formoje. Jie brėžiami plona linija pjūvyje štrichuojant prie kontūrinės linijos. Ženklių matmenys priklauso nuo gurgučio matmenų ir formos tipo (drėgnos, sausos). Gurgučiai ženklinami raidėmis *Gr*.
- Liejimo nuolydžiai, suapvalinimai, skyčias ir įdubos*. Liejinių išorinių paviršių nuolydžių vertės pateikiamos žinyne (priekaus nuo aukščio ir kt.). Vidinių paviršių nuolydžiai turi būti dvigubai didesni. Reikia stengtis konstruoti liejinį be aštrių kampų ir staigūs sienelės storio pokyčių, vengti iškilimų ir įdubų, kad liejinys galėtų kuo laisviau trauktis formoje. Jei skyčias negaminamas liejant, tai liejinio brėžinyje užbraukiamos kryžmai plona linija.
- Liečių sistema ir prielajos*. Nurodoma maitintuvų sujungimo su formos ertme vieta (2.3 pav. neparodyta).
- Kiti reikalavimai*, kuriuos turi atitikti liejinys (liejinio tikslumas, šiurkštumas ir kt.).



2.3 pav. Liejinio brėžinys: *MF* – modelis, forma; *V* – modelio ir formos viršus; *A* – modelio ir formos apačia; *Gr1* – gurgutis; 1 – skyros plokštuma; 2 – mechaninio apdirbimo užlaidos; 3 – mechaniskai apdirbama skyčės

2.2.2. Liečių sistemos elementai

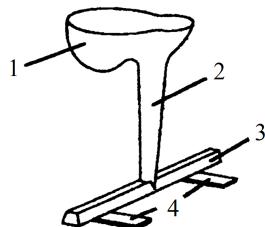
Kanalai, kuriais išlydytas metalas patenka į formos ertmę, vadinami liečių sistema.

Liečių sistema sudaro (2.4 pav.): piltuvas 1 (lengviau ipliti metalą), vertikalus kanalus 2 (siurėja į apačią, kad nejisisiurbtu oro), šlakų rinktuvas 3 (iš piltuvo patekusiam šlakui nusistoti), tiektuvas 4 (metalui tekėti į formos ertmę). Liejant stambius liejinius, daromas ortakis (orui ir dujoms išeiti).

Formos pildymo metu susidariusios dujos ir garai išeina pro orui laidų formavimo mišinį, ortakius arba prielajas. Ortakis taip pat naudojamas liejimo formos pripildymui lydalo kontroliuoti.

Pagrindiniai reikalavimai parenkant liečių sistemą:

1. Liečių sistema turi užtikrinti sklandų skysto metalo tiekimą į formos ertmę.
2. Sulaikyti šlakus ir kitas nemetalines medžiagą.
3. Sumažinti turbulenciją, kad nepatektų duju ir forma nebūtų išplauta.
4. Metalo išeiga liečių sistemai turi būti minimali.
5. Pilamo metalo srovė į formos sienelę arba gurgutį turi būti be smūgių.
6. Skystas metalas turi būti tiekiamas į statoriaus liejinio dalį. Tai leidžia išvengti vietinių perkaitinimų ir gauti tankų liejinį.
7. Tinkamas metalo tiekimo vietas parinkimas (turi didelę įtaką liejamų metalo tankui ir galimiems liejimo defektams).



2.4 pav. Liečių sistema

Paprastiems liejiniams nėra reikalo konstruoti sudėtingos liečių sistemos. Šiuo atveju pakanka tiesių kanalų, tik reikia vengti smailių kampų. Šlakams ir kitoms nemetalinėms dalelėms sulaikyti liečių sistemoje dažnai naudojami akytosios keramikos filtrai, pagaminti iš Al_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2 , MgO junginių ir kt.

Storasieniuse elementuose gali susidaryti subėgimo tušumų, todėl virš jų daromos prielajos – liečių sistemos elementas stingstančiam liejiniui maitinti skystu metalu (skysto metalo rezervuaras), kad nesusidarytų susitraukimo kiaurymai (jos turi susidaryti tik prielajoje, bet ne liejinyje). **Reikalavimai prielajai:** 1) ji turi sukieteti ne greičiau už liejini; 2) pakankama skysto metalo atsarga prielajoje (metalo susitraukimui kompensuoti); 3) prielajos forma ir jos pastatymo vieta turi užtikrinti gerą skysto metalo tiekimą į tas liejimo vietas, kuriose susidaro subėgimo tušumos ir porėtumas.

2.2.3. Formavimo ir gurgučių mišiniai

Mišinių sudėtis priklauso nuo lydinio sudėties, liejinio svorio ir konfigūracijos, jo sienuolių storio, gamybos apimties ir kt.

Reikalavimai mišiniams:

1. **Plastišumas.** Mišinsys turi būti lengvai sutankinamas ir tiksliai atkartojama modelio forma.
2. **Stipris.** Mišiniai turi išlaikyti formą ir nesuverti veikiant skystam metalui, išorinėms ir kitoms apkrovoms.
3. **Atsparumas kaitrai.** Mišinsys turi nesukepti ir nesusilydyti su metalu.
4. **Laidumas dujoms.** Jei mišinio laidumas nepakankamas, liejinyje lieka duju pūslės.
5. **Paslankumas.** Tai mišinio savybė susispausti auštant liejiniui.
6. **Tinkamumas pakartotinai naudoti** ir kt.

Formavimo mišinsys. Jų sudaro naudotas mišinsys ir nenaudoto mišinio priedai. Jų pagrindinė sudedamoji dalis yra smėlis. Smėliui surišti dažniausiai pridedama molio ir vandens, nors naudojamos ir kitos rišamosios medžiagos: sėmenų aliejus, pokostas, fenolinės dervos, skystasis stiklas (natrio silikato vandeninis tirpalas) ir kt.

Tipinė formavimo mišinio sudėtis yra tokia: 80–90 % kvarcinio smėlio, 4–15 % molio, 3–7 % vandens ir 3–6 % priedų.

Kuo daugiau smėlyje yra kvarco, tuo didesnis jo terminis stabilumas ir aukštesnė lydymosi temperatūra. Priklasomai nuo grūdelių dydžio formavimo smėlis skirstomas į grupes, kurios nustatomos sijojant smėlį per sietų komplektą. Be kvarcinio smėlio formų (ir gurgučių) gamyboje naudojamos kaitrai atsparesnės medžiagos (iki 2400 °C): cirkonis, chromitas, chromo magnezitas, šamotas ir kt. Tačiau šios medžiagos gerokai brangesnės už kvarcinį smėlį.

Molis (tiekiamas emulsijos pavidalu) formavimo mišiniams suteikia stiprio. Vanduo (2–8 %) aktyvina molį, todėl formavimo mišinys tampa plastiškesnis ir stipresnis. Vandens kiekis mišinyje turi būti kontroliuojamas, nes molis absorbuoja tik tam tikrą jo kiekį. Didelis vandens kiekis formavimo mišinį daro plastiškesnį, tačiau labai sumažina formos stipri. Priedai suteikia mišiniams specialių savybių: *akmens anglų dulkės* naudojamos, kad formavimo mišinys nepridegtų prie liejinio; *grafitas* (0,5–2,0 %) palengvina formavimą ir pagerina liejinių paviršiaus kokybę; *medienos miltai ar drožlės* (0,5–2,0 %) padidina duju pralaidumą, sumažina formos plėtimą iškaitinimo metu; *maršalitas* (iki 35 %) padidina mišinių atsparumą kaitrai ir, padidindamas mišinių tankį, sumažina metalo skvarbą; maži *smulkaus geležies oksido* kiekiei tam tikruose mišiniuose padidina atsparumą karščiui; *melasa*, turinti 60–70 % cukraus, padidina mišinių stipri ir sausos būsenos formos kampų kietį. Magniui reagujant su mišinio drėgme gali išsiskirti vandenilis ir įvykti sprogimas. Todėl i formavimo mišinių dedama *sieros* (sieringų duju sluoksnis apsaugo lydinį nuo oksidavimosi) ir *boro rūgšties* (formų paviršiuje susidaro glazūra, kuri izoliuoja lydinį nuo formavimo mišinio).

Formavimo mišinys skirstomas:

- pagal panaudojimo charakterį – bendrasis, modelinis ir užpildantysis;
- pagal formos būvę prieš užpylimą – mišinys drėgnoms ir sausoms formoms.

Jei forma gaminama iš vieno mišinio, tai tokis mišinys vadinas *bendruoju*. Toks mišinys naudojamas mašinorio formavimo atveju. *Modelinis* formavimo mišinys naudojamas vienetinėje ir smulkiaserijinėje gamyboje. Po sutankinimo jo storis virš modelio turi būti 15–30 mm priklasomai nuo liejinio sienelių storio. Modelinis formavimo mišinys visada naudojamas su *užpildančiuoju* mišiniu, kuriuo užpildoma likusi formos dalis.

Gurgučių mišinys. Gurgučiai turi būti stipresni negu smėlio formos, nes jie yra transportuojami, dedami į formas. Po formos užpylimo gurgučiai dažniausiai būna iš visų pusų apsemti skystu metalu ir patiria didesnes apkrovas liejimo metu.

Veikiami daugiau nei pati forma tiek mechaniskai, tiek termiskai, gurgučiai:

- turi būti pakankamai atsparūs, kad atlaikytų jėgas, kurios stengiasi gurgutį išstumti iš metalo;
- turi būti ugniaatsparūs ir gerai praleisti dujas;
- turi gerai pasiduoti liejiniui traukiantis (metalas aušdamas traukiasi, todėl gurgutis suspaudžiamas);
- liejiniui sustingus turi būti lengvai išmušami.

Priklasomai nuo šių reikalavimų yra keičiamas gurgučio mišinio sudėtis. Gurgučių mišiniai ruošiami iš kvarcinio smėlio, naudoto mišinio ir įvairių jungiamųjų medžiagų: skystojo stiklo, įvairių termoreaktyviųjų dervų (fenolio formaldehidinės ir kt.), organinių rūsių iš augalinių aliejų ir naftos produktų ir jų derinių.

Pagrindinė gurgučių funkcija yra sudaryti liejinyje kiaurymę, tačiau jie naudojami ir formavimui palengvinti arba modelių konstrukcijoms supaprastinti. Jie padeda formuoti liejinyje briaunas arba įdubas, taip pat naudojami kaip paprastos formos dalys.

2.2.4. Formavimas

Formos gaminimo procesas vadinamas formavimu. Formos kokybę pirmiausia lemia jos sutankinimo būdas.

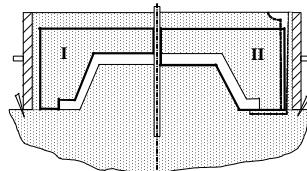
Rankinis formavimas. Rankomis gaminamos vienetinės, bandomosios ir labai didelių liejinių formos. Didžiausia liejinių dalis liejama vienkartinėse smėlio formose.

Rankinio formavimo būdai:

Formavimas dviejose (trijose) formadėžėse. Išorinės liejinio įdubos gali būti formuojamos panaudojus trečią formadėžę vietoj gurgučio. Formavimas susideda iš formavimo mišinio sutankinimo formadėžėje, liečių kanalų ir ortakių įrengimo, modelio išémimo iš formos, formos surinkimo.

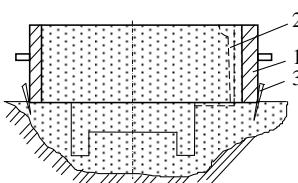
Formavimas šablonais (2.5 pav.).

Brangus modelis keičiamas šablonais, kurių profilis atitinka išorinį ir vidinį liejinio kontūrą. Šablonai skiriasi per liejinio sienelių storį. Suformuotas išorinis kontūras yra modelis viršutinei pusformei. Vidinis paviršius gaunamas antruoju šablonu. Apatinė ir viršutinė pusformė su liečių sistema sudaro formą.



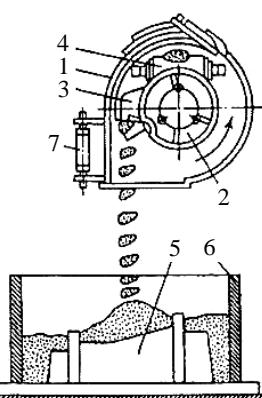
2.5 pav. Formavimas šablonais

Formavimas asloje (2.6 pav.). Formos ertmė gaunama modelių išpaudžiant į mišinį. Forma gali būti atvira, kai liejinio ertmė yra apatinėje pusformėje ir uždara. Šiuo atveju formadėžėje 1 sutankinamas mišinys ir daromas lietis 2. Išėmus modelių, pusformė grąžinama į pradinę padėtį ir fiksuojama kuoliukais 3.



2.6 pav. Formavimas asloje

Stambūs liejiniai formuojami betoninėse duobėse – kesonuose. Juose formavimo mišinys suplūkiamas smėliausvaide mašina (2.7 pav.). Mišinys vienu metu į formadėžę 6 palaipsniui suberiamas ir tolygiai sluoksniais sutankinamas rotoriaus mentės 3 išcentrine jėga. Smėliausvaidės pagrindinė dalis yra sviedimo galvutė. Ją sudaro greitai besiskantis rotorius 2, prie kurio montuojami vienas, du arba trys kaušai – mentelės 3, gaubtas 1, į kurį transporteriu 4 nenutrūkstamai tiekiamas formavimo mišinys. Galvutė gali būti paslenkama rankomis rankena 7, nuotoliniu būdu arba pagal numatytą programą.

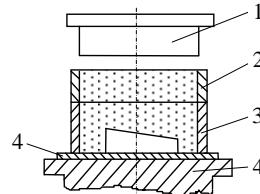


Mišinio sutankinimas formoje pagal aukštį yra beveik vienodas. Tai svarbus privalumas. Didinant atstumą tarp sviedimo galvutės ir sutankinimo plokštumos, mišinio sutankinimo laipsnis mažėja. Tai paaiškinama porcijos greičio sumažėjimu dėl oro pasipriešinimo.

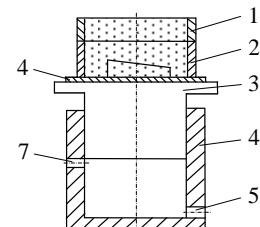
2.7 pav. Smėliausvaidis sutankinimas

Mašininis formavimas. Taikomas serijinėje ir masinėje gamyboje, nes dažnai įrengimui perderinimas užimtų daug laiko. Mašininio formavimo formose gaunami tikslesni ir glotnesni liejiniai. Formavimo mašinose mechanizuotos visos svarbiausios operacijos (formadėžės pripildymas formavimo mišiniu, jo sutankinimas, modelio išémimas iš formos), o automatinėse liejimo linijose – visos operacijos. Labiausiai paplitę šie formavimo mišiniu sutankinimo būdai: kratumas, presavimas, smėliašaudis (2.7 pav.), smėliapūtis, smėliašaudis, vakuuminis, impulsinis.

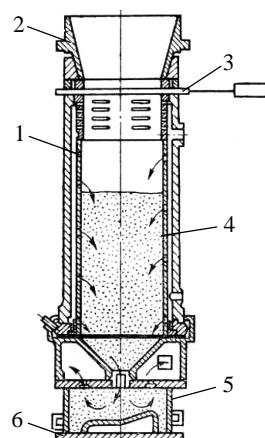
Presavimo mašinos (2.8 pav.). Jomis presuojama iš apačios arba iš viršaus. Presuojant mišinys suspaudžiamas tarp modelinės plokštės ir presavimo kolonélės (presavimo trinkelės, diafragmos ir kt.). Išorinės gnuždymo apkrovos didėja lėtai. Presavimo galvutės (arba modelinės plokštės) judėjimo greitis formadėžės atžvilgiu paprastai neviršija 0,1 m/s. Presuoti formadėžė 3 su rėmeliu 2 statoma ant modelinės plokštės 4, padėtos ant mašinos stalo 5, ir pripildoma formavimo mišiniu. Judant stalui aukštyn, mišinys sutankinamas presavimo kolonèle 1. *Trūkumas* – viršutinėje dalyje mišinio tankis didesnis nei prie modelio.



2.8 pav. Presavimo mašinos schema



2.9 pav. Kratymo mašinos schema



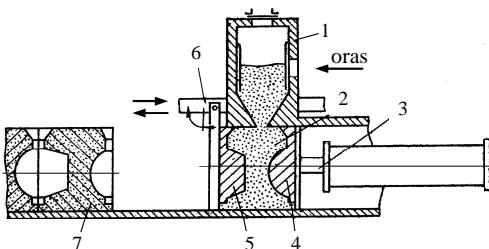
2.10 pav. Smėliašaudės mašinos schema

Kratymo mašinos (2.9 pav.). Mašinos stolas 3, ant kurio yra modelinė plokštė ir formadėžė su formavimo mišiniu, pakeliamas į 30–80 mm aukštį suslėgtu oru, patenkančiu pro angą 6. Kildamas stalas atidaro oro išėjimo angą 7, stalas su rėmeliu 1, formadėžė 2 ir juose esančiu formavimo mišiniu krinta ir atsitenkinia į korpusą 5. Ciklas kartojamas keletą kartų. Mišiniui visiškai sutankinti reikia 10–20 smūgių. Kratymu formavimo mišinys stipriau sutankinamas prie modelio. Viršutinėje dalyje mišinio tankis nepakankamas, todėl mišinys papildomai presuojamas.

Smėliašaudės mašinos. Jose suslėgtasoras „iššauna“ mišinių i formadėžę ir jį vienodai sutankina. Naudojamos nedidelėms formoms, gurgučių mišiniams sutankinti, yra našios. I kamerą 1 iš bunkerio 2 įberiama porcija mišinio, kamera uždaroma sklende 3 ir tiekiamas suslėgtasoras. Mišinys 4 „iššaunamas“ i formadėžę 5, uždėtą ant modelinės plokštės 6 (2.10 pav.).

Vakuuminiu formavimu (2.11 pav.) gaminamos formos iš smėlio be rišamujų medžiagų. Ant modelinės plokštės 3 su tuščiaviduriu modeliu 2 uždedama pašildyta polimerinė plévelė 1 ir iš po modelio pašalinamas oras. Plévelė sandariai apgaubia modelinės plokštės ir modelio paviršių. Paskui ant modelinės plokštės padedama tuščiavidurais šonais ir su skylėmis į vidų formadėžė 5. Ji pripildoma smėlio ir uždengiama plėvele 4. Vakuumuojant formadėžės ertmę, formos ertmėje su smėliu sudaromos vakumas, sutankinamas užpildas. Paruošta pusformė nuimama nuo modelinės plokštės ir sujungiamas su antraja, tokiu pat būdu pagaminta pusformė. Surinkimo, pripildymo ir liejinio kietėjimo metu pusformės yra vakuumuojamos. Liejiniui ataušus, formadėžės atjungiamos nuo vakumo šaltinio, užpildas subyra į bunkerį. Polimerinė plévelė sudega. Liejinių masė siekia 5 t ir daugiau.

Formavimas be formadėžių (2.12 pav.). Šis būdas taikomas gaminant nedidelius liejinius. Formavimo mišinys turi būti didelio stiprio ir gerai praleisti dujas.



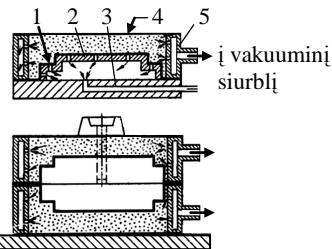
2.12 pav. Formavimas be formadėžių smėliapūčiu presavimo automatu

2.2.5. Liejinių valymas ir terminis apdorojimas

Liejinių valymas. Sukietėję ir ataušę liejiniai išimami iš formų jas suardant (rankomis arba mechanizuotai) ir vežami į valymo barą, kadangi liejinių paviršiuje lieka pridegusio formavimo ir (arba) gurgučių mišinio. Liečiai, ortakiai ir prielajos nulaužiami, numušami arba nupjaunami. Liejiniai valomi šratasraučiais įrenginiais besiskančiuose būgnuose (abrazyvinis srautinis valymas naudojant mažus metalo rutuliukus) ir kt. būdais.

Terminis apdorojimas. Liejiniai yra stambiagrūdės struktūros, turi likvacines sritis, juose netolygiai išsiskirstę nemetaliniai intarpai ir legiruojantys elementai. Dėl to liejinių mechaninės savybės yra blogesnės. Liekamiesiems įtempiams šalinti, stabiliai homogeniškai struktūrai gauti, mechaninėms ir kitoms savybėms pagerinti liejiniai atkaitinami arba normalizuojami, kartais grūdinami ir atleidžiami.

Parenkant terminio apdorojimo režimą, atsižvelgiant į liejinių medžiagą, gamybos technologiją ir taikymo sritį.



2.11 pav. Vakuuminis formavimas

Formavimo mišinys suberiamas į bunkerį 1, iš kurio suslėgtu oru įpučiamas į kamерą 2. Vienoje kameros pusėje yra judama modelinė plokštė 4, kurią stumdo stūmoklis 3, kitoje pusėje – pakeliama modelinė plokštė 5. Mišinys sutankinamas judant plokštėi 4. Paskui kartu su rėmeliu 6 nuo formos atitraukiama (išimamas modelis) ir pakeliama atraminė plokštė 5. Sutankinta pusformė 7 pristumiamā prie ankstesnės. Taip gaunama formų eilė.

2.3. Specialieji liejimo būdai

Prie specialiųjų liejimo būdų priskiriamas liejimas į kokiles ir kevalines formas, liejimas pagal išlydomuosius modelius ir slegiant, išcentrinis ir tolydusis liejimas, liejimas reguliuojant dujų slėgį ir kt. Specialiaisiais būdais nulieti liejiniai yra gana tiksliai matmenų, jų paviršius švarus. Apie 15–20 % smėlio formose lietų liejinių masės mechaninio apdirbimo metu paverčiama drožlėmis, o specialiais būdais lietų liejinių – gerokai dažiau (ne daugiau kaip 10 %). Liejimo specialiaisiais būdais technologinis procesas lengvai mechanizuojamas ir automatizuojamas.

Prieš pasirenkant liejimo būdą, reikia įvertinti detalės konstrukcijos technologiškumą, jos eksplloatacines savybes ir palyginti, kokios išlaidos bus konkrečiomis gamybos sąlygomis. Sumažinus užlaidas, sumažėja detalų savikaina, bet šiek tiek padidėja liejinių savikaina.

2.3.1. Kokilinis liejimas

Kokilė yra daug kartų naudojama metalinė forma, kuri skysto metalo pripildoma veikiant gravitacinėms jėgomis. Kokilės darbiniai paviršiai padengiami iškloja arba nudažomi termoizoliaciniiais dažais. Apsauginės dangos apsaugo formą nuo skysto metalo ir dujinės korozijos poveikio, kartu padidina jos ilgalaiškumą.

Privalumai:

- Padidėja liejimo proceso efektyvumas (dėl daugkartinio formos naudojimo 2–3 kartus padidėja darbo našumas, 20–30 % sumažėja liejinių savikaina).
- Pagerėja liejinių kokybė, nes metalas greičiau ataušta, liejiniai nepridega, tikslesni jų matmenys (liejinių tikslumo kvalitetas $IT12$ – $IT15$, šiurkštumas $R_z=80$ – $40 \mu\text{m}$).
- Nereikalingos formavimo medžiagos (išskyrus gurgučiams).

Trūkumai:

- didelė kokilių savikaina;
- nedidelis ilgalaiškumas liejant plieną ir ketų ([2.1 lentelė](#));
- sunku nulieti plonasienius liejinius;
- trukdo liejiniams susitraukti, todėl juose gali atsirasti vidinių įtempių, persimetimų ir įtrūkių.

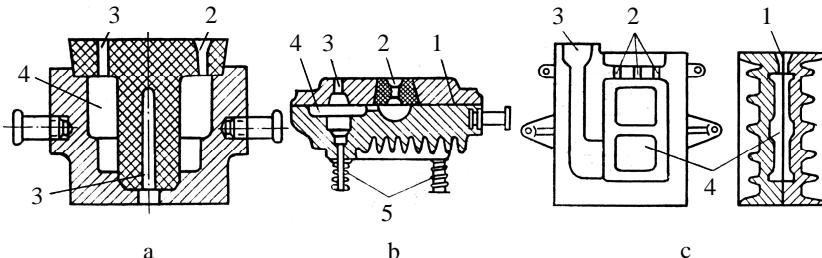
[2.1 lentelė](#). Ketinių kokilių ilgalaiškumas

Liejinių medžiaga	Liejinių dydis	Liejinių skaičius
Al , Mg , Zn lydiniai	Smulkūs Vidutiniai	20 000–50 000 10 000–20 000
Cu lydiniai	Smulkūs ir vidutiniai	5000–15 000
Ketus	Smulkūs Vidutiniai Stambūs	5000–8000 1000–5000 100–500
Plienas	Smulkūs Vidutiniai Stambūs	400–600 100–400 10–100

Pagrindinės operacijos:

1. Darbinių paviršių valymas ir dažymas (kelis kartus per pamaina).
2. Gurgučių (smėlio ar keramikos) įdėjimas ir kokilės dalių sujungimas.
3. Kokilės įkaitinimas iki 200–350 °C temperatūros (ji priklauso nuo liejamo lydinio sudėties, liejinio sienelės storio, sienelės storio ir kt.) ir užpildymas skystu metalu.
4. Kokilės atidarymas ir liejinio išémimas.
5. Gurgučių išmušimas; liečių, ortakių, prielajų nupjovimas; liejinio kokybės tikrinimas.

Visos operacijos gali būti mechanizuotos ir automatizuotos.

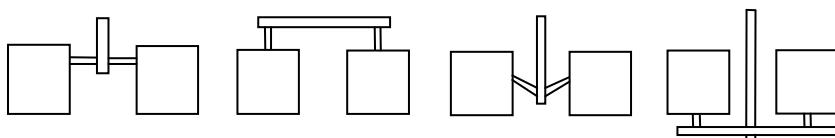


2.13 pav. Kokilės: *a* – neišardoma; *b* – su horizontaliu skyros paviršiumi; *c* – su vertikaliu skyros paviršiumi: 1 – skyros paviršius; 2 – liečių sistema; 3 – ortakis; 4 – liejimo ertmė; 5 – stūmikliai

Kokilių tipai:

- Pagal skyros plokštumos padėtį (2.13 pav.) – neišardomos (iškratomos); su horizontalia, vertikalia ir mišria skyros plokštuma.
- Pagal darbinių lizdų skaičių – vienietės ir daugia vietės.
- Pagal aušinimo būdą – aušinamos oru (natūraliai ir priverstinai), skysčiu (vandeniu, tepalu ir kt.) ir mišriai.
- Pagal darbinės sienelės medžiagą – ketinės, plieninės, alumininės, iš specialiųjų lydiniių ir sudėtiniių medžiagų.

Liečių sistema (2.14 pav.). Liečių sistemos kanalu forma, išdėstyti ir matmenys daro esminę, o kartais ir lemiamą įtaką liejinių kokybei. Praktikoje labiausiai paplitę tokios liečių sistemos, kai metalas pilamas iš viršaus. Šoninės, laiptuotos ir apatinės (sifoninės) liečių sistemas naudojamos liejant aukštus ir sudėtingus liejinius.



2.14 pav. Liečių sistemos schema, liejant kokilėse su vertikalia skyros plokštuma

2.3.2. Liejimas į kevalines formas

Kevalų gamyba. Mišinių, naudojamų kevalinių formų gamybai, sudaro ugniai atsparios medžiagos (kvarcinis smėlis ir kt.), rišiklis (termoreakcinės dervos, kurios negrižtamai kietėja didėjant temperatūrai) ir įvairūs priedai (skyrikliai, kietikliai, skiedikliai ir kt.). Pakaitintos iki tam tikros temperatūros dervos minkštėja, darosi lipnios ir, kylant temperatūrai, negrižtamai sukietėja.

Paruoštas smėlio ir dervos mišinys 2 (2.15 pav.) užberiamas ant įkaitintos iki 200–270 °C modelinės plokštės 3. Mišinyje esanti derva išsilydo ir ant modelinės plokštės greitai sukietėja 5–12 mm kevalas 4. Modelinė plokštė su bunkeriu 1 apverčiama, kad nubyrėtų nesukietėjės mišinys. Po to plokštė 1–4 min. dedama į 300–400 °C temperatūros krosnį, kurioje kevalas galutinai sukietėja. Ataušės kevalas stūmikliais 5 nuimamas nuo modelinės plokštės.

Pagamintos formos pusės sujungiamos mechaniskai (negarantuojant tikslumo, nes prispaudikliai įkaista ir keičia linijinius matmenis) arba suklijuojamos (masinėje gamyboje). Liejant

stambius liejinius, kad neprasiveržtų pilamas metalas, kevalinė forma 6 išstatoma į formadėžę 7 ir užberiama smėliu arba metaliniais šratais 8; statoma tarp plokščių ir kt.

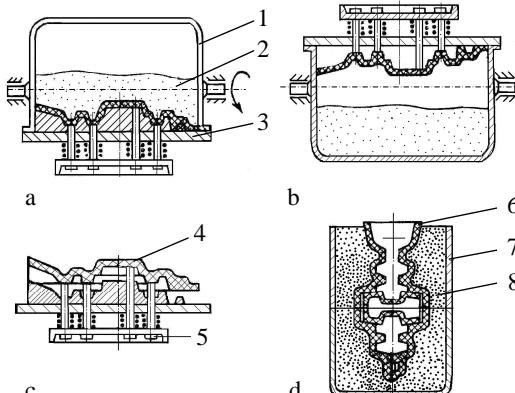
Kevalinės formos metalo priplidimos naudojant horizontalias, vertikalias arba sifonines liečių sistemas. Sukietėjus metalui, liejinys išsimamas suardžius kevalinę formą. Kevalinėse formose liejami liejiniai iš įvairių lydinių. Dažniausiai liejami 5–15 kg masės liejiniai. Kartais liejiniai masė gali siekti 200 kg. Skylės liejamos nuo 6 mm ir didesnės.

Liejimo į kevalines formas priivalumai:

- liejiniai nepridega, jų švarus paviršius, tikslūs matmenys ($IT12-IT14$, $R_z=40-20 \mu\text{m}$);
- kevalinės formos ir gurgučiai netrukdo liejiniams trauktis, nes jų stipris liejinių kietėjimo metu sumažėja;
- liejiniuose nėra nemetalinių intarpų, nes kevalinės formos ir gurgučiai yra nebirūs ir nelūžūs;
- liejimo procesą galima mechanizuoti ir automatizuoti.

Trūkumai:

- labai brangūs: įranga, įrengimai, ypač dervos;
- kevalinės pusformės ir gurgučiai gaminami naudojant karštą metalinę įrangą;
- dervoms termiškai skylant, išsisirkiria kenksmingų medžiagų.



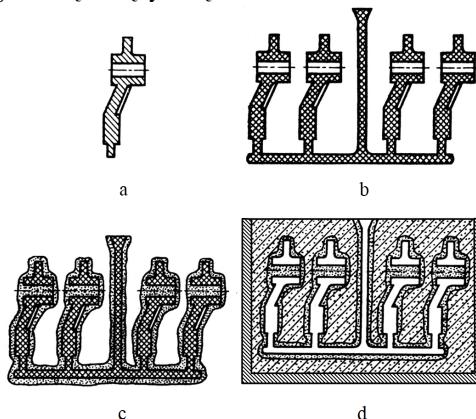
2.15 pav. Kevalinių pusformių gamyba:

- a – formavimo mišinys, užbertas ant modelio;
b – nubertas mišinio perteklius;
c – kevalo nuėmimas nuo modelio;
d – formos paruošimas priplilti

Lieti į kevalines formas ekonomiškai tikslsinga serijinėje ir masinėje gamyboje.

2.3.3. Liejimas pagal išlydomuosius modelius

Šiuo liejimo būdu liejamos skulptūros, juvelyriniai dirbiniai, dantų protezai. Šis gamybos būdas yra brangus, tačiau pateisinamas gaminant sudėtingos konfigūracijos tikslius ($IT12-IT14$, $R_z=40-20 \mu\text{m}$) liejinius, kurių neberekia arba sudėtinga mechaniskai apdirbt. Liejama iš įvairių lydinių.



2.16 pav. Liejinį liejimas naudojant išlydomus modelius: *a* – lengvai lydus modelis; *b* – lengvai lydūs modeliai su liečių sistema; *c* – pagamintas kevalas; *d* – forma dėžėje

Išlydomieji modeliai gaminami metalinėse presformose iš medžiagų, kurios lydos 50–80 °C temperatūroje (vaškas, parafinas, stearinas) ir gali ištirpti arba sudegti nepalikdamos liekanų. Pagaminti modeliai (2.16 pav., *a*) atšaldomi ir surenkami (klijuojant, lituojant ar mechaniniu būdu) į blokus su bendra liečių sistema (2.16 pav., *b*). Blokas kelioms sekundėms panardinamas į skystą formavimo mišinį, kurį sudaro maltas kvarcas, rišikliai ir priedai. Modelio paviršiuje susidaro plonas suspensijos sluoksnis, kuris ne ilgiau kaip per 10 s sustiprinamas ir pastorinamas padengiant jį ugniai atsparia medžiaga (smulkiu kvarciniu smėliu, elektrokorundu ir kt.). Šitaip modeliai padengiami 3–6 sluoksniais (kartais 20 ir daugiau). Susidaro stipri 3–8 mm storio kevalinė forma (2.16 pav., *c*). Kiekvienas sluoksnis džiovinamas ore (2–2,5 h) arba ore ir amoniako garuose (50–60 min). Iš gautos kevalinės formos modeliai pašalinami juos išlydant karštu vandeniu (85–95 °C), karštu oru, iškaitintais garais arba išdeginant krosnyje aukštesnėje nei 500 °C temperatūroje. Pašalinus modelius, kevalinės formos iškaitinamos 900–1100 °C temperatūroje (išdega liekanos, išgaruoja drėgmę).

Pagaminta ir išdžiovinta forma kartu su liečių sistema dedama į metalinę dėžę ir užpilama rupiu kvarciniu smėliu (2.16 pav., *d*) ar kt. užpildančiąja medžiaga.

Metalas liejamas ir į karštas, ką tik iš krosnies išimtas formas, ir į šaltas formas. Sustingus ir pakankamai ataušus liejiniam, formos išardomos, liejiniai atskiriami nuo liečių, nuo jų nuvalomos kevalo liekanos.

Gamyboje taikomas liejimas naudojant modelius, kurie virsta dujomis nuo išlydyto metalo šilumos.

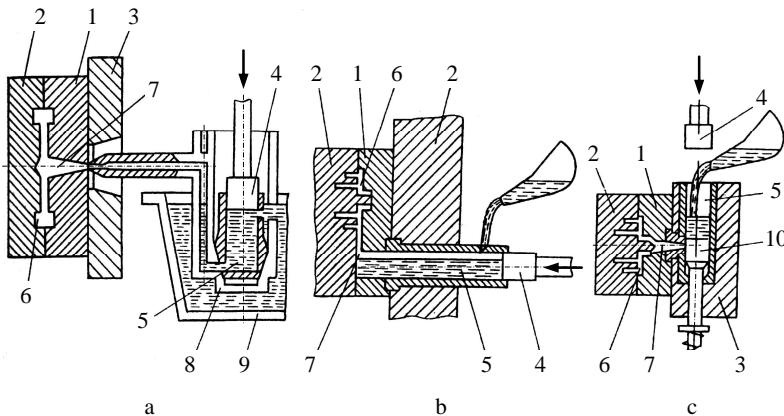
2.3.4. Liejimas slegiant

Liejimu slegiant pagerėja formos pripildymo sąlygos, todėl galima nulieti geros kokybės plonasienius sudėtingos konfigūracijos liejinius. Dėl išorinio slėgio į kietėjantį liejinį ir didelio aušimo greičio metalinėje formoje gaunama smulkiagrūdė struktūra, mažesni subėgimo defektai ir geresnės mechaninės savybės. Slėgimo būdu liejama į plienines formas (presformas). Jų konstrukcija sudėtingesnė ir tikslėsne nei kokilių, todėl jos brangesnės. Kadangi smėlio gurgučių naudoti negalima (nes metalo čiurkšlė gali juos suardyti), naudojami neišardomi metaliniai gurgučiai.

Liejinio formavimosi procesui svarbūs veiksnių:

- slėgis presavimo kameroje ir formoje;
- preso stūmoklio judėjimo greitis;
- lydalo srauto įtekėjimo į formą greitis;
- liečių ir ventiliacijos sistemų parametrai;
- pilamo metalo ir formos temperatūra;
- tepimo ir aušinimo režimai.

Liejimo slegiant efektyvumas priklauso nuo to, ar tinkamai panaudojami jo privalumai, ar atsižvelgiama į trūkumus ir ypatybes konkretiomis sąlygomis.



2.17 pav. Liejimo mašinos su karštojo (a) ir horizontaliajai (b) bei vertikaliajai (c) šaltojo presavimo kameromis schema: 1 – nejudamoji presavimo formos pusė; 2 – judamoji presavimo formos pusė; 3 – mašinos plokštė; 4 – preso stūmoklis; 5 – presavimo kamera; 6 – presavimo formos ertmė; 7 – lietus; 8 – metalo kaupiklis; 9 – tiglis; 10 – apatinis stūmoklis

Liejimo slegiant privalumai:

- galima nulieti smulkius sudėtingos konfigūracijos liejinius, kurių negalima nulieti smėlio formose ir kokilėse (liejinių iš cinko lydinių sienelės gali būti 0,5 mm storio, minimalus liejamos skylės diametras 1,5 mm, vario liejinių – 5 mm);
- liejiniai būna tikslią matmenų ir glotnūs ($IT11-IT13$, $R_a=0,32-2,5 \mu\text{m}$), jų beveik nereikia mechaniskai apdirbtis;

- labai našus liejimo procesas;
- nereikia formavimo ir gurgučių mišinių.

Liejimo slegiant trūkumai:

- gana brangi įranga;
- sunku lieti detales su sudėtingomis ertmėmis;
- liejinių masyviose dalyse būna oro ar subėgimo porų, kurios sumažina liejinių stiprių, pablogina jų plastines charakteristikas;
- dėl presavimo formos nepaslankumo liejiniuose atsiranda įtempiai;
- liejimas neekonomiškas mažų serijų gamyboje.

Slegiant daugiausiai liejamos automobilių detalės (cilindrų blokai, pavarų dėžės, krumpliaračiai, rankenėlės ir kt.), optinių prietaisų detalės (okino ir fotografijos aparatu korpusai, mikroskopų ir žiūronų dalys), sanotechnikos detalės (iš žalvario liejamos sklidės, kriauklių ir vonių vandens maišytuvai, vamzdynų armatūra) ir kt.

Liejimo mašinos gali turėti šaltojo arba karštojo presavimo kameras (2.17 pav.).

- Karštojo presavimo kamera 5 (2.17 pav., a) įrengiama metalo kaupiklyje 8. Ji panardinama į tiglyje 9 esantį metalą. Presavimo stūmokliui 4 judant žemyn, anga, kuria skystas metalas patenka į kamерą, uždaroma ir lydinys kaitinamu kaupiklio kanalu ir liečiu 7 patenka į presavimo formos ertmę 6. Mašinos trūkumai – sunkios stūmoklio darbo sąlygos (panardintas į skystą metalą); mažas presavimo slėgis (iki 30 MPa); negalima lieti lydinių, kurių lydymosi temperatūra aukštesnė kaip 500 °C ir kurie aktyviai sąveikauja su plienu.
- Mašinos su šaltojo presavimo kamera (2.17 pav., b, c) yra horizontaliosios ir vertikaliosios. Presavimo slėgis siekia 350 MPa (kai kurių mašinų net 800 MPa). Lydalas su presavimo kamera sąveikauja labai trumpai, todėl jose galima lieti didesnio tankio ruošinius, taip pat ir iš titano lydinių. I mašinas su šaltojo presavimo kameromis aluminio lydiniai pilami 650–700 °C temperatūros. Žalvario pylimo temperatūra priklauso nuo markės yra 910–960 °C.
- Mašina su horizontaliąja presavimo kamera (2.17 pav., b) skysto metalo pripildoma pro kameros 5 angą. Judant presavimo stūmokliui 4, lydalas per lietų 7 įpresuoja į presformos ertmę 6. Liejinui sukietėjus, presforma atidaroma, stūmoklis grįžta į pradinę padėtį, o stumtuvių išstumia liejinį.
- Mašinos su vertikaliajā presavimo kamera (2.17 pav., c) dugnā atstoja apatinis stūmoklis 10. Pripildžius kamерą, stūmoklis 4, leisdamas žemyn, spaudžia lydalą, stumia apatinį stūmoklį 10 žemyn ir atidaro angą liečio 7 įvorėje, pro kurią skystas metalas patenka į formos ertmę 6, sudarytą dvięs pusformių 1 ir 2. Liejinui sukietėjus, presavimo stūmoklis 4 grįžta į pradinę padėtį, apatinis stūmoklis 10 kyla ir atskiria lietų nuo presavimo likučio. Atidaroma presavimo forma ir liejinys kartu su liečiu išstumiamas.

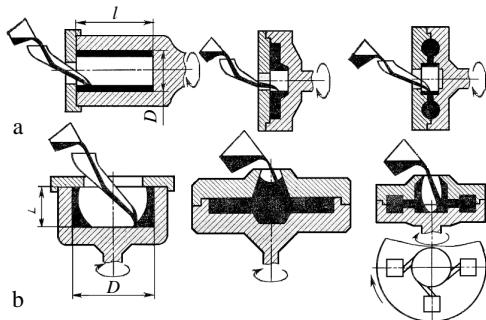
Prieš darbo pradžią formos yra kaitinamos. Kaitinama dujiniais degikliais, elektriniais kaitintuvais ir kt. Cinko lydiniams forma įkaitinama iki 120–150 °C, aluminio ir magnio lydiniams – iki 180–290 °C, vario lydiniams – iki 300–350 °C.

Formos darbinis paviršius tepamas (nuo 0,5 iki 30 µm storio sluoksniu) įvairios sudėties tepalų mišiniu (naudojamas techninis vazalinas, parafinas, sidabrinis grafitas, mašininė alyva ir kt.), tepalų ir vandens emulsijomis, kurios aušina presformas. Tepalo plėvelė apsaugo paviršių nuo lydalo cheminio, mechaninio ir šiluminio poveikio, neleidžia liejinui prisivirinti prie formos, palengvina ji išimti iš formos.

2.3.5. Išcentrinis liejimas

Liejant išcentriniu būdu į formą supiltas metalas yra veikiamas išcentriniių jėgų. Jos atsiranda pilant skystą metalą į besisukančią formą arba išukant jau pripildytą formą. Formos sukimosi greitis yra vienas svarbiausiu parametru, lemiančiu liejinio kokybę (mechaninį stiprį, nemetalinių priemaišų kiekį ir kt.). Formos sukamos, kol ataušta išcentrinėse liejimo mašinose, kurių sukimosi ašies padėtis gali būti:

1. Horizontali (2.18 pav., a). Liejami trumpi ir ilgi tuščiaviduriai sukiniai tipo liejiniai.
2. Vertikali (2.18 pav., b). Liejami trumpi ir fasoniniai sukiniai.
3. Kintamos padėties.



2.18 pav. Išcentrinis liejimas:

- a – su horizontaliaja sukimosi ašimi;
- b – su vertikaliaja sukimosi ašimi

Išcentrinio liejimo formos gali būti metalinės (plieno, ketaus), smėlio, kevalinės, grafitinės ir kt. Plieninės formos labai brangios, todėl dažniausiai gaminamos iš ketaus.

Liejant išcentriniu būdu, atliekamos tokios operacijos:

Formos paruošimas. Formos padengiamos termoizoliaciniiais dažais arba biriomis medžiagomis (sausų kvarcinių smėliu). Iš anksto įkaitinus formą (dažniausiai iki 150–250 °C temperatūros), metalas geriau pasiskleidžia formos paviršiuje, pagerėja liejinio išorinio paviršiaus kokybę.

Formos pripildymas. Prieš pripildant formą latakas įkaitinamas ir nudažomas kokiliais dažais. Po to jis įkišamas į formą ir įtvirtinamas. Skystas metalas, iš kaušo lataku supiltas į besisukančią formą, pasiskleidžia jos vidiniame paviršiuje ir, veikiamas išcentriniių jėgų, suformuoja tuščiavidurį liejinį.

Aušinimas ir liejinio išémimas. Supylus metalą, latakas ištraukiamas ir forma pradedama aušinti. Formos aušinamos oru, vandeniu arba neaušinamos. Liejiniui ataušus iki nustatytos temperatūros, išjungiamas variklis, nutraukiamas aušinimas, mašina sustabdoma. Forma atidaroma. Išimamas liejinas.

Šiuo būdu liejami vandentiekio ir kanalizacijos vamzdžiai, vidaus degimo variklių cilindrų įvorių ruošiniai, sliekračio vainikai, elektros variklių rotorai, variklių degimo kameros, laivų velenų bronziniai apvalkalai ir kiti ruošiniai.

Liejama iš ketaus, plieno, Cu, Ti, Ni ir Al lydinių ir plastiko. Ruošinių masė siekia 60 t, liejamų žiedų ir įvorių išorinis skersmuo svyruoja nuo 30 iki 4000 mm, o vamzdžių – nuo 40 iki 2600 mm; liejinių ilgis gali būti iki 12 m. Liejinių tikslumas ir paviršių šiurkštumas priklauso nuo to, kokios naudojamos formos (metalinės dažytos, metalinės su iškloja, smėlio, kevalinės).

Išcentrinio liejimo privalumai:

- tuščiaviduriai liejiniai liejami be gurgučių;
- veikiant išcentrinėms jėgomis, geriau pripildomos formos;

- kadangi sumažėja subėgimo tušumų, dujinių, šlakinių ir nemetalinių intarpų, padidėja liejinių tankis ir susmulkėja metalo struktūra;
- sumažėja skysto metalo nuostoliai;
- iš skirtingų lydinių galima lieti dvisluoksnius liejinius.

Išcentrinio liejimo trūkumai:

- reikalingos specialios mašinos;
- formos turi būti labai tikslios, stiprios ir hermetiškos, gerai centruotos;
- norint gauti reikiamaus liejinių laisvų paviršių matmenis, reikia dozuoti metalą.

3. METALŲ APDIRBIMAS SPAUDIMU

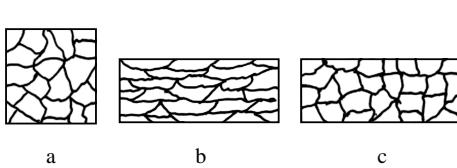
Apdirbimas spaudimu yra tokis technologinis procesas, kai detalės arba jų ruošiniai gaunami plastiškai deformuojant šaltus arba karštus metalus. Ruošiniai, skirti apdirbtį spaudimo būdu, yra plieno ir spalvotųjų metalų luitai, valcuotas rūšinis ir lakštinis metalas ir kt. Apdirbimas spaudimo būdu yra ekonomiškas ir našus medžiagų apdirbimo būdas. Svarbiausias tikslas – pasiekti, kad kaltinio forma ir matmenys būtų kiek galima artimesni būsimos detalės formai ir matmenims.

Apdirbimo spaudimui ypatumai:

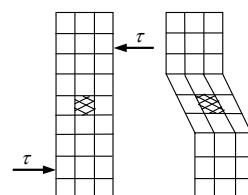
1. Dideliu greičiu iš karto apdirbtamas visas ruošinio tūris arba tam tikra jo dalis.
2. Spaudimo būdu apdirbtos detalės pasižymi geromis mechaninėmis savybėmis, todėl smūgine apkrova apkrautų detalių (automobilių, lėktuvų važiuoklių ir kt.) ruošiniai visuomet apdirbami spaudimo būdu.
3. Šaltai apdirbant spaudimui, metalas sukietinamas. Dėl to padidėja jo stipris ir kietis, tačiau sumažėja plastišumas.
4. Mažai atliekų.

3.1. Plastinis deformavimas

Apdirbant metalą spaudimu, jis plastiškai deformuojamas ir negrižtamai pakeičia savo formą ir matmenis. Plastinės deformacijos metu atomai pasislenka vienas kito atžvilgiu, nešeidami iš tarpusavio jėgų sąveikos zonos. Slydimas vyksta metalo grūdelių (kristalitų) viduje ir pagal ribas kristalografinėmis plokštumomis. Tos plokštumos turi didžiausią atomų tankį ploto vienete. Gnuždomi grūdeliai pailgėja deformavimo kryptimi (3.1 pav.) ir sudaro pluoštinę struktūrą. Plastišumo rodikliai (santykinis pailgėjimas, smūginis tąsumas ir kt.) yra geresni išilgai pluošto nei skersai.



3.1 pav. Metalo mikrostruktūra: a – iki deformavimo; b – po deformavimo; c – atkaitinus



3.2 pav. Dvilinkio deformacijos schema

Deformacija gali įvykti ir dvigubo perlinkio (dvilinkio) būdu, kai kristalitų dalys persilenka lygiagrečiose plokštumose, tangentiniams įtempiams pasukus vidurinį sluoksnį (3.2 pav.). Dvejinimosi greitis artimas 10^{-6} s.

Šaltasis deformavimas. Šaltai deformuojant metalus, keičiasi jų fizikinės, cheminės ir mechaninės savybės. Didėjant deformacijai, didėja kietis, stipris, trapumas (vyksta deformacinis sukielinimas), tačiau mažėja plastišumas, laidumas elektrai (aiškinamas gardelės iškraipymu, tarpatominiu ryšiu pasikeitimui, kristalinės sandaros netobulumu pagausėjimu ir komponentų chemine sąveika), atsparumas korozijai (suardoma oksidų plėvelė).

Daugeliui spalvotųjų metalų lydinių sukielinimas yra vienintelis sustiprinimo būdas, tačiau tolesniams deformavimui ir apdirbimui pjovimui jis nepageidautinas. Šaltai deformuoto metalo plastiškumui atstatyti (kiečiui bei stipriui sumažinti) taikomas rekrystalizacinis atkaitinimas (vietoj deformuotų ištemptų grūdelių susidaro nauji smulkūs be vidinių įtempių ir dislokacijų pertekliaus grūdeliai).

Šaltai deformuojant gaunami tikslūs matmenys ir kokybiškas paviršius.

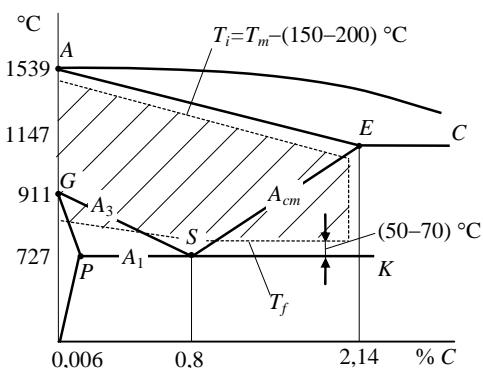
Karštasis deformavimas. Kuo pliene daugiau anglies, tuo sunkiau jį apdirbtį šaltą. Karštai deformuojančios metalas yra plastiškesnis, todėl šiuo būdu apdirbami sunkiai deformuojami, mažai plastiški metalai ir jų lydiniai bei ruošiniai iš luitų.

Trūkumai: ruošinio paviršiuje susidaro nuodegų sluoksnis, kuris deformuojant išspaudžiamas į metalo paviršių. Dėl to pablogėja paviršiaus kokybė ir matmenų tikslumas, padidėja užlaidos apdirbimui. Nuodegos yra kitesnės už karštą metalą, todėl greičiau dyla deformavimo įrankis. Nedideli ir ploni gaminiai greitai ataušta, todėl būtina palaikyti reikiama temperatūrą.

Veiksniai, turintys įtakos medžiagos plastiškumui [6].

3.2. Metalų įkaitinimas prieš apdirbant spaudimo būdu

Šaltiems metalams deformuoti reikalingi galingi įrengimai. Įkaitinus metalą iki tam tikros temperatūros, padidėja jo plastišumas ir mažiau energijos reikia jam deformuoti.



3.3 pav. Apdirbimo spaudimu temperatūrinis intervalas; T_i – pradžios, T_m – lydymosi, T_f – pabaigos temperatūra

Kiekviename metalui ar jo lydiniui nustatytais karštojo apdirbimo spaudimu temperatūrų intervalais (3.3 pav.). Bereikalingas temperatūros pakėlimas sukelia grūdelių sustambėjimą. Tai vadinama perkaitinimu. Perkaitės ruošinys po apdirbimo spaudimu yra blogesnių mechaninių savybių. Šis brokas ištisosomas termiškai (atkaitinant). Kai perkaitinto metalo grūdelių ribos oksiduoja arba net apsilydo, šis neištisosomas brokas vadinamas perdeginimu. Toks metalas perlydomas.

Karštasis apdirbimas pradedamas įkaitinus metalą iki pradžios temperatūros, kurioje jis neperkaista ir neperdega, ir baigiamas esant nustatytais pabaigos temperatūros. Kai ši temperatūra žemesnė, metalo plastišumas sumažėja ir deformuojant galimi ištrūkiai. Taip pat netikslinga apdirbimą spaudimu baigtį esant aukštai temperatūrai, kadangi gaminui auštant auga grūdeliai ir susidaro stambiagrūdė struktūra.

Labai greitai kaitinant, ruošinys gali sutrūkinėti dėl skirtingo šiluminio plėtimosi tarp netolygiai įkaitintų sluoksnių. Ilgiau kaitinant metalo paviršiuje susidaro nuodegos. Leistiną ruošinio kaitinimo greitį galima apskaičiuoti pagal empirines formules.

Gaminio kokybę priklauso ir nuo aušinimo greičio. Greitai ir netolygiai aušinant, dėl terminių įtempių detalė gali sutrūkinėti arba išskraipyti. Kuo plieno šiluminis laidumas mažesnis, gaminys stambesnis, konfigūracija sudetingesnė, tuo lėčiau aušinama. Aušinama ore arba krosnyje (legiruotasis plienas ir kt.).

3.3. Valcavimas

Tai ruošinio plastinis deformavimas tarp besisukančių valcų, siekiant sumažinti skerspjūvio plotą ir suteikti norimą formą. Yra trys valcavimo būdai:

1. Išilginis valcavimas (3.4 pav.). Valcai 1 sukasi skirtingomis kryptimis ir deformuoja judantį ruošinį 2. Valcuojant veikia dvi jėgos: trinties jėga T (itraukia ruošinį tarp valcų) ir normalinė reakcija N (deformuoja skersinius matmenis). Šių jėgų projekcija judejimo kryptimi yra *metalo griebimo valcrais salyga*

$$N_x \sin \alpha < T_x \cos \alpha. \quad (3.1)$$

Kadangi

$$T = fN, \quad (3.2)$$

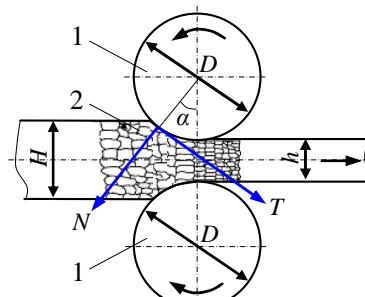
Tai

$$\sin \alpha < f \cos \alpha$$

arba

$$f > \tan \alpha, \quad (3.3)$$

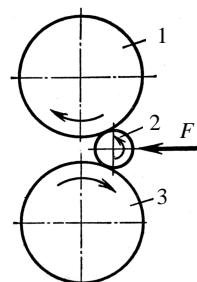
čia α – griebimo kampus ($3\text{--}4^\circ$ – šaltai valcuojant lakštus, $15\text{--}24^\circ$ – karštai valcuojant lakštus); f – trinties koeficientas.



3.4 pav. Išilginis valcavimas

2. Skersinis valcavimas (3.5 pav.).

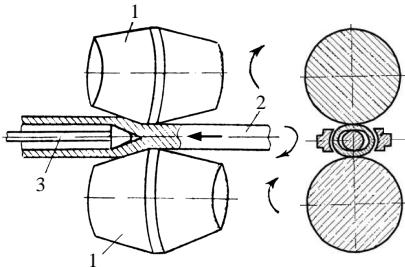
Sukdamiesi viena kryptimi lygiagretės valcai 1 ir 3 deformuoja apie savo ašį priešingą kryptimi besisukančią ruošinį 2, kuris prilaikomas specialiu įtaisu. Norimas gaminio skersmuo gaunamas keičiant atstumą tarp valcų, o skerspjūvio profilis priklauso nuo valcų profilio.



3.5 pav. Skersinis valcavimas

3. **Skersinis sraigtinis valcavimas**

(3.6 pav.). Tam tikru kampu pasukti ir viena kryptimi besisukantys su dvigubais kūgiais valcrai 1 deformuoja įkaitintą ruošinį 2, suteikdami jam sukuriamajį ir slenkamajį judesi. Ruošinį veikia dideli tempimo ir tangentiniai įtempiai, todėl yra lengviau pradurti skylę spraudikliu 3, kuris yra prieš ruošinį. Pradūrimo staklyne atsiradęs plyšys išplečiamas automatiniuose valcavimo staklynuose. Gauti besiūliai vamzdžiai tikslinami apvalcavimo ir kalibravimo staklynuose.



3.6 pav. Skersinis sraigtinis valcavimas

3.3.1. Valcuoti gaminiai

1. **Rūšiniai gaminiai** (karštai valcuoti, kalbruoti):

- paprastos geometrinės formos (kvadratas, stačiakampus, šešiakampus, skritulys);
- sudėtingos fasoninės formos (lovinės, dvitėjinės sijos, loviai, bėgiai ir kt.).

2. **Lakštai** (karštai ir šaltai valcuoti):

- folija (iki 0,2 mm lakštai);
- ploni lakštai (0,2–4 mm storio);
- stori lakštai (4–160 mm storio).

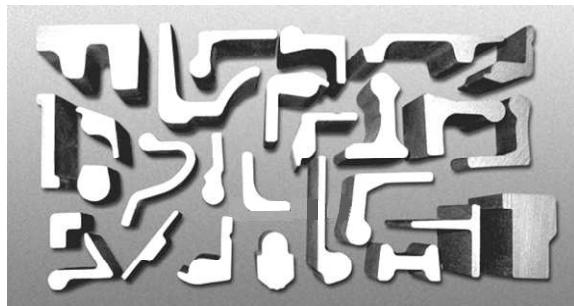
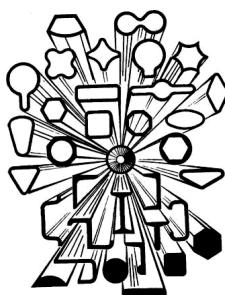
3. **Vamzdžiai**:

- besiūliai (karštai valcuoti vamzdžiai \varnothing 25–820 mm; šaltai deformuoti vamzdžiai – \varnothing 5–250 mm);
- suvirinti (tiesiasiūliai \varnothing 8–1420 mm; suvirinti pagal sraigtinę liniją).

4. **Specialieji**:

- periodinio profilio (laipuoti velenai ir kiti mašinų detalių ruošiniai);
- vienetiniai ruošiniai (vagonų ratai, ratlankiai, įvairūs žiediniai ir kt. ruošiniai).

Šių gaminiių skirtingu profilių ir matmenų visuma (3.7 pav.) vadina nomenklatura.

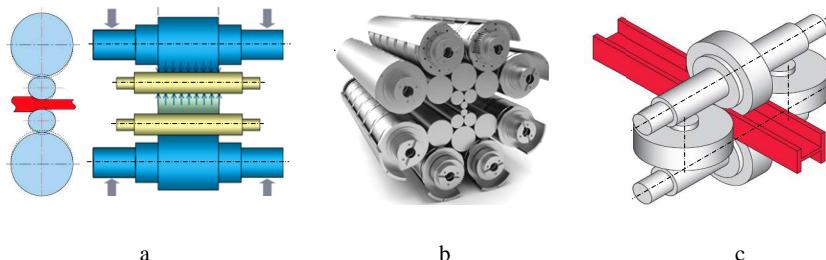


3.7 pav. Valcuoti profiliai

3.3.2. Valcavimo įrankiai ir staklynai

Lakštai valcuojami cilindriniu valcais: *truputį igaubtais* (dėl velco veleno vidurinės dalies šiluminio plėtimosi valcuojant karštai) ir *išgaubtais* (dėl velco išlinkio veikiant valcavimo jégai šaltojo deformavimo metu). Rūšiniai ir fasoniniai gaminiai valcuojami *profiliniais* valcais. Du gretimi valcų sudaro profilį, vadinančią kalibru.

Valcavimo staklynas – tai technologinių mašinų kompleksas, kuriame valcuojamas plienas ir spalvotųjų metalų bei jų lydinių ruošiniai.



3.8 pav. Valcų išdėstymas darbinėse sekcijose

Atsižvelgiant į valcų skaičių ir padėti, staklynai skirstomi:

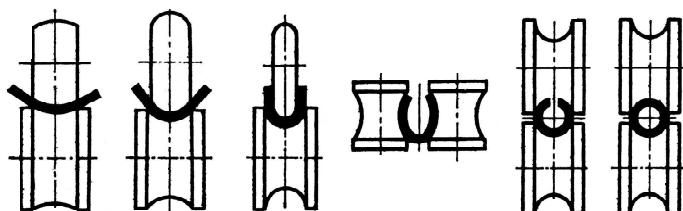
1. Dvivelenis staklynas (3.4 pav.). Ruošiniai valcuojami abiem kryptimis (reversinis) ir viena kryptimi (nereversinis). Darbinėje sekcijoje yra du valcų.
2. Keturvelenis staklynas (3.8 pav., a). Darbinėje sekcijoje yra du darbiniai varomieji ir du didesnio skersmens atraminių valcų, apsaugantys darbinius nuo išlinkio. Ši schema būdinga lakščių karštojo ir šaltojo valcavimo staklynuose.
3. Daugiaveleniai staklynai (3.8 pav., b). Naudojami 12-os ir 20-ies valcų, kuriuose du darbiniai valcų (\varnothing 3–50 mm) varomi tarpiniu atraminiu. Esant tokiai konstrukcijai, skerspjūvio plotas mažėja veikiant mažesnėms deformavimo jėgomis. Juose šaltai valcuojami platūs (200–1000 mm) ir ploni (0,02–0,2) lakštai bei juostos.
4. Universalieji staklynai (3.8 pav., c). Juose ruošinys apspaudžiamas horizontaliaisiais ir vertikaliaisiais valcais.

3.3.3. Technologinis valcavimo procesas

Luitai yra pirminiai ruošiniai valcuoti.

- **Valcuojant rūšinius profilius**, karštai plieniniai luitai apspaudžiami stambiais dviveleniais staklynais – bliumingais. Gaunami kvadratinio skerspjūvio (nuo 400×400 iki 150×150 mm) ruošiniai – bliumai. Toliau bliumai valcuojami rūšiniuose staklynuose, prieš tai sumažinus jų skerspjūvį paruošimo staklynuose.
- **Valcuojant lakštus**, karštai plieniniai luitai apspaudžiami stambiame universaliaime staklyne – sliabinge arba bliuminge. Gaunami 50–300 mm storio ir 500–1800 mm pločio ruošiniai – sliabai. Jie įkaitinami ir valcuojami į storus, po to į plonus lakštus. Labai ploni lakštai valcuojami šaltai. Jie yra aukštos kokybės ir tikslaus storio. Nuvalius nuodegas (karštai valcuojant), lakštai lyginami ir supjaustomi į gabalus.

- **Valcuojant besiūlius vamzdžius**, pirmiausiai įkaitintame ruošinyje pradūrimo staklyne praduriama skylė (3.6 pav.). Toliau valcuojama iki reikiamo skersmens ir sienelės storio automatiniuose, periodiniuose ir kt. staklynuose. Po to atliekamas vamzdžių išbaigimas (šaltasis valcavimas, pratraukimas ir kt.) ir apdaila (lyginimas, pjauystumas ir kt.).
- **Suvirinti vamzdžiai.** Tiesiasiūliai vamzdžiai formuojami iš lakštų arba kaspino (jų plotis lygus vamzdžio perimetru) ir išilgai suvirinami 5–12 sekcijų formavimo suvirinimo staklynuose (3.9 pav.). Gaminant didelio skersmens vamzdžius, naudojami du lakstai ir virinamos dvi išilginės siūlės.

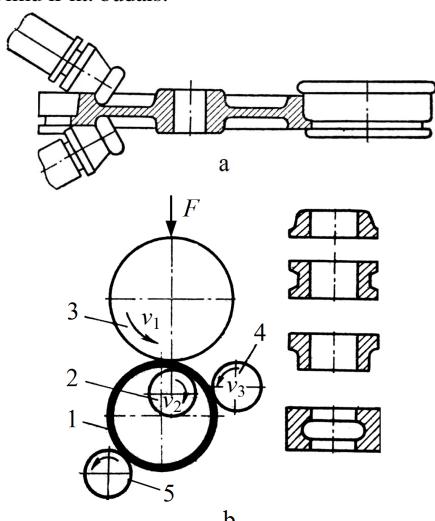


3.9 pav. Juostos susukimas į vamzdį nenutrūkstamo veikimo staklyne 6-iose darbinėse sekcijose

Suvirinti pagal sraigtinę liniją vamzdžiai gaminami iš plieninio ritininio kaspino, kuris susukamas į nepertraukiamą vamzdį ir suvirinamas.

- **Specialieji valcuoti gaminiai:**

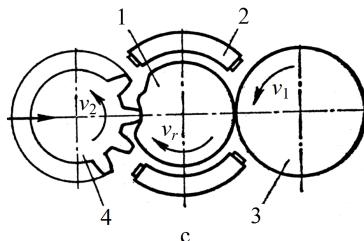
1. *Periodinio profilio ruošiniai valcuojami* skersiniu ir skersiniu sraigtiniu būdu. Gauti ruošiniai štampuojami, apdirbami pjovimu ir kt. būdais.
2. *Ivairios formos ir matmenų ratų ir ratlankių gamyba* (3.10 pav., a). Susodinamas įkaitintas ruošinis, jame padaroma skylė, presu suformuojama stebulė ir ratlankio kontūras. Jis galutinai išvalcuojamas ratų valcavimo staklyne.
3. *Žiedinių ruošinių valcavimas* (3.10 pav., b). Ruošinis 1 maunamas ant valco 2. Artėjant valcams 3 ir 2 radialine kryptimi, didėja išorinis skersmuo ir mažėja sienelės storis. Kreipiantysis ritinėlis 4 suteikia ruošiniui taisyklingą žiedo formą. Valcuojama iki susilietimo su ritineliu 5.



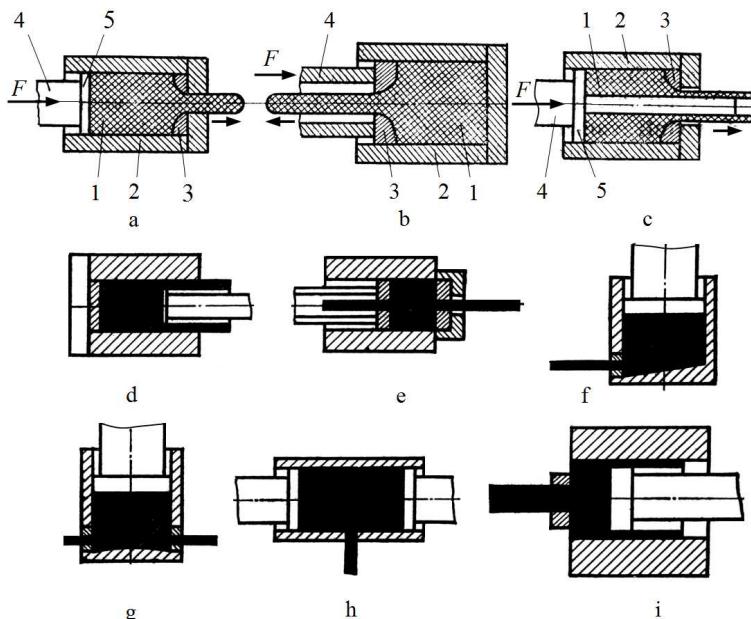
4. Krumpliaračio krumplių įvalcavimas (3.10 pav., c). Krumpliai strypiniame ruošinyje įvalcuojami skersinio valcavimo būdu, krumpliuotam valcui 4 sukantį ir judant radialine kryptimi. Ruošinio 1 paviršius įkaitinamas induktoriuje 2. Ritineliu 3 apridenamas krumplių išorinis paviršius. Įvalcavus krumplius, strypas supjaustomas į krumpliaračius.

3.4. Presavimas

Tai ruošinio 1, esančio uždaroje formos 2 ertmėje, išspaudimas pro maticos skylyę 3, veikiant puansonui 4 su presavimo žiedu 5 (3.11 pav.). Šis plastinio apdirbimo būdas taikomas deformuojant įkaitintus ir šaltus metalus ir jų lydinius (plieną, Cu, Sn, Pb, Al, Zn, Mg, Mo, W, Ni, Ta, Nb ir kt.), apdirbant miltelinės medžiagą ir plastikus. Presuojant gaminami strypai (3–250 mm), vamzdžiai (\varnothing 20–400 mm, $s = 1,5\text{--}12 \text{ mm}$), paprastos ir sudėtingos formos profiliai (3.12 pav.). Dažniausiai presuojama hidrauliniais presais.



3.10 pav. Specialiųjų gaminių valcavimas:
a – vagono rato; b – žiedo; c – krumplių



- 3.11 pav. Presavimo schemas: a – tiesioginis presavimas; b – atvirkštini presavimas; c – tiesioginis vamzdžių presavimas; d – atvirkštini vamzdžių presavimas; e, i – mišrus išspaudimas; f – šoninis išspaudimas pro vieną matricą; g – šoninis išspaudimas pro dvi matricas; h – dvigubas šoninis išspaudimas

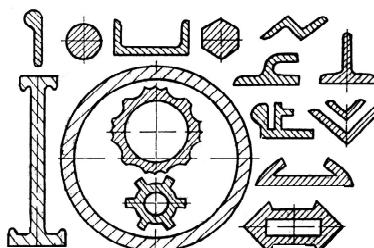
Be dažniausiai taikomo tiesioginio presavimo, naudojamas atvirkštinis būdas ir kitos išspaudimo schemas, turinčios įvairių privalumų. Pvz., esant šoniniam medžiagos išspaudimui (3.11 pav., g), gaunamas minimalus gaminio mechaninis nevienalytiškumas.

Presuojant atvirkštiniu būdu, medžiaga išspaudžiama pro judančią matricą, todėl puansonas yra tuščiaviduris. Presavimo jėga 1,5–2 kartus mažesnė nei presuojant tiesiogiai (medžiaga juda tik matricos zonoje), tačiau šis būdas nėra našus, gaunama žema paviršiaus kokybė (dėl nedidelės deformacijos gaminyje yra lietos medžiagos struktūros pėdsakų), mažesnis gaminiių assortimentas.

Privalumai: 1) presuojant susidaro netolygus triašis gnuždymo įtempių būvis, todėl šiuo būdu apdirbamos ir trapios medžiagos; 2) gaunami sudėtingo skerspjūvio gaminiai, kurie neapdirbami kitaip būda; 3) įvairūs gaminiai gaminami pastovia presavimo įranga, keičiant tik matricas; 4) aukšta gaminiių paviršiaus kokybė ir didelis matmenų tikslumas.

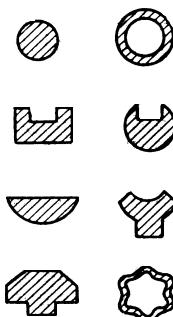
Trūkumai: 1) matricą veikia didelės jėgos ir aukšta temperatūra; 2) galimas gaminiių mechaninis nevienalytiškumas; 3) brangus presavimo įrankis; 4) daug medžiagos atliekų.

- *Gaminio kokybė priklauso nuo temperatūros, deformavimo laipsnio, presavimo greičio ir kt.*
- *Presavimui reikalinga jėga nustatoma įvertinus deformuojančios medžiagos savybes, temperatūrinį režimą, ruošinio matmenis, deformacijos greitį ir laipsnį, kontaktinės trinties reikšmę (svarbu presuojant tiesiogiai), įrankio geometriją ir kt.*



3.12 pav. Presuoti profiliai

3.5. Traukimas



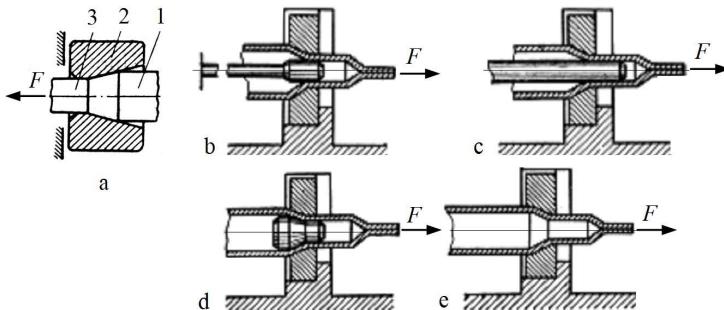
3.13 pav. Traukti profiliai

Tai valcuoto arba presuoto ruošinio pratraukimas (kalibravimas) pro mažesnio matmens skylę (filjere). Traukimo būdu gaminama viela (iki 0,02 mm skersmens ir plonesnė), įvairios geometrinės formos strypai (iki $\varnothing 150$ mm), plonasieniai vamzdžiai iš plieno, spalvotųjų metalų ir jų lydinių (3.13 pav.), besiūliai ir suvirinti vamzdžiai ir kt. Pasiekiamas aukšta paviršiaus kokybė ir matmenų tikslumas.

Traukiant vamzdžius ant trumpo nejudančio spraudiklio (3.14 pav., b) arba kartu su ilgu judančiu spraudikliu (3.14 pav., c), mažinamas skersmuo ir sielenės storis.

Naudojant plaukiojantį spraudiklį (3.14 pav., d), gaminami variniai vamzdžiai. Traukiant be spraudiklio (3.14 pav., e), sumažinamas išorinis ir vidinis skersmuo.

Įkaitinto arba turinčio mažą takumo įtempį metalo traukimas praktiškai netaikomas dėl sumažėjusio stiprio, nes veikianti traukimo jėga gali plastiškai deformuoti priekinę gaminio dalį (už filjerės) ir profilis nutrūks (kad profilis už filjerės plastiškai nesideformuotų, įtempiai neturi viršyti medžiagos takumo stiprio). Nustatyta, kad 30–50 % (80 %) traukimo jėgos sunaudojama kontaktinei trinčiai nugalėti. Trinčiai sumažinti ruošiniai ir filjerė yra teptami.



3.14 pav. Traukimo schemas: *a* – vielos traukimas; *b, c, d, e* – vamzdžių traukimas; 1 – ruošinys; 2 – filjerė; 3 – gaminys;

Siekiant mažesnės traukimo jėgos, mažesnio filjerės dilimo ir aukštos gaminijų kokybės, prieš traukiant reikalingas ruošinių terminis apdorojimas (plastinėms savybėms gerinti), nuodegų pašalinimas, paviršių paruošimas sutepti ir galio paruošimas tvirtinti. Traukimo metu metalas sukietinamas. Plastiškumui atstatyti atliekamas rekristalinizacinis atkaitinimas. Dažniausiai traukiama kelis kartus (vielą iki 17 kartų), todėl atkaitinimas pakartojamas. Pratraukti gaminiai termiškai apdorojami reikiams mechaninėms savybėms gauti.

Traukimo staklynai yra

- *su tiesiaeigiu traukiamo ruošinio judesiu* (grandininiai, krumpliastiebiniai, hidrauliniai ir kt.) įvairaus profilio strypams ir vamzdžiams traukti;
- *būgniniai*, kuriuose traukiama viela ir tuščiaviduriai profiliai vyniojami į ritinius.

3.6. Kalimas

Tai įkaitinto metalo apdirbimas spaudimu, smūgiuojant hidraulinio preso arba kalimo kūjo pentimis. Pagrindinis kalimo privalumas – stambių plieno luitų apdirbimas. Kalant keičiasi ne tik kaltinio forma, pagerėja struktūra ir mechaninės savybės, bet ištaisomi ir liejimo defektai. Kalamai turbinų rotorių ir diskų ruošiniai, bliumingų valcų ir kt. Kalimui naudojami rūšiniai valcuoti ruošiniai (kai kaltinio masė iki 40 kg), stambūs valcuoti ruošiniai (kaltinio masė 40–300 kg), luitai (kaltinio masė >300 kg). Nedideliu matmenų ruošiniai kalamai ir štampuojami, tačiau vienetinėje (smulkiaserijinėje) gamyboje taikomos kalimas.

Trūkumai: mažas medžiagos išnaudojimo koeficientas (didelės užlaidos mechaniniams apdirbimui), kadangi kaltinių forma tik artima detalės formai; nedidelis matmenų tikslumas ir našumas, palyginti su štampavimu.

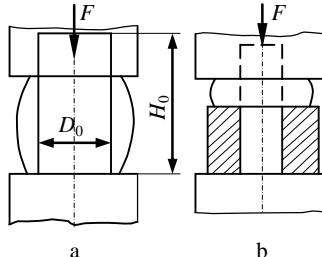
Kalimo procesą sudaro:

Pagalbinės operacijos

- prieš kalimą (ruošinio supjaustymas, paviršiaus defektų pašalinimas, įkaitinimas ir kt.);
- po kalimo (terminis kaltinio apdorojimas, tiesinimas, valymas, galvaninis padengimas, paviršiaus kokybės kontrolė ir kt.).

Pagrindinės kalimo operacijos:

1. Susodinimas (3.15 pav.) – ruošinio skerspjūvio didinimas, mažinant aukštį arba jo dalį. Naudojamas krumpiliarčiu mechaninėms savybėms gerinti (susodinant pluoštas išsidėsto beveik radialine kryptimi, todėl tempimo ir lenkimo įtempiai veikia išilgai pluošto, o kirpimo – skersai pluošto) ir kaip paruošiamoji operacija prieš pramušimą. Siekiant išvengti kludymo ir skersinio lenkimo, laikomasi santykio $H_0 \leq 2,5D_0$.

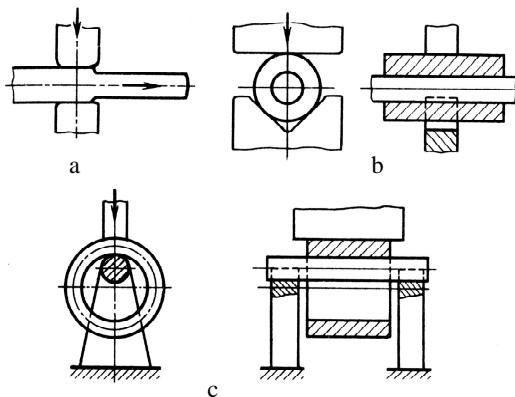


3.15 pav. Susodinimas (a) ir dalinis susodinimas (b)

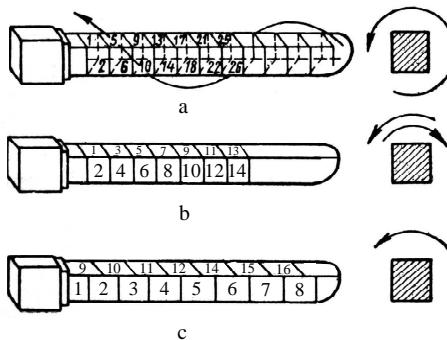
2. Ištėsimas (3.16 pav.):

- *ištėsimas plokščiomis pentimis* (ruošinio ar jo dalies ilginimas mažinant skerspjūvi);
- *ištėsimas ant spraudiklio* (tuščiavidurio ruošinio ilginimas ploninant jo sienelę);
- *valcavimas ant spraudiklio* (didinami išoriniai ir vidiniai žiedo skersmenys ploninant sienelę).

Ruošinys nuosekliai apspaudžiamas išilgai ašies ir pasukamas apie ją tam tikrame operacijos etape (3.17 pav.).

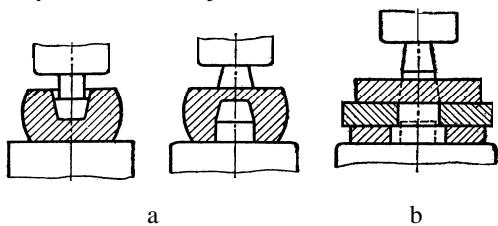


3.16 pav. Ištėsimas: a – plokščiomis pentimis; b – ant spraudiklio; c – valcavimas ant spraudiklio



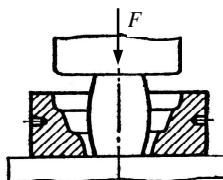
3.17 pav. Ištėsimo būdai: *a* – pasukimas pagal sraigtinę liniją; *b* – pasukimas į dvi puses; *c* – pasukimas po kraštinės ištėsimo

3. Skylių pramušimas (3.18 pav.) atliekamas po susodinimo. Gaunamos ištisinės arba aklinos skylės (idubos). Storuose kaltiniuose skylės pramušamos iš abiejų pusių, plonuose – iš vienos pusės, naudojant padéklinius žiedus. Skylės pramušamos pilnaviduriais arba tuščiaviduriais ($>\varnothing 400$ mm) pramuštuvais. Kai skylės skersmuo $d \geq 0,5D$, ruošinys labai deformuojamas.



3.18 pav. Skylių pramušimas: *a* – iš abiejų pusių; *b* – iš vienos pusės

4. Lenkimasis – tai ruošinio kampų arba naujo kontūro sudarymas. Siekiant išvengti vidinio kontūro susirauskšlėjimo ir įtrūkio išoriniame kontūre, lenkimo spindulys $r \geq 0,5H$.
5. Susukimas. Vienas ruošinio arba kaltinio galas įtvirtinamas tarp penčių, o kitas sukamas apie išilginę ašį.
6. Kirtimas – tai ruošinio dalij atskyrimas įvairiais kirstukais.
7. Štampavimas padékliniais štampais (3.19 pav.). Didesniais kiekiuose gamintinos varžtų galvutės, briaunotos įvorės ir kt. kaltiniai. Štampų forma atitinka kaltinio arba jo dalies formą.
8. Kitos kalimo operacijos: išplojimas (pločio didinimas, mažinant storį), kalviškasis suvirinimas (vamzdžiamus sujungti), iškirtimas, lyginimas, tiesinimas ir kt.



3.19 pav. Štampavimas padékliniais štampais

3.7. Karštasis tūrinis štampavimas

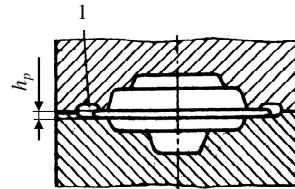
Tai įkaitinto ruošinio plastinis deformavimas štampu. Kadangi štampai naudojami konkrečiam ruošiniui apdirbtį, išlaidos jų gamybai atsiperka tik stambiaserijinės ir masinės gamybos sąlygomis, esant didesniams našumui ir štampuojančių sudėtingesnės formos bei tikslinių matmenų (palyginus su kalimu) kaltinius. Tūriniam štampavimui reikalingos didelės deformavimo jėgos, todėl daugiausia štampuojami iki 100 kg masės kaltiniai. Kartais kaltinių masė siekia 400–500 kg ir daugiau.

Ruošiniai karštajam štampavimui: rūšiniai valcuoti gaminiai, presuoti ir kalibruoti strypai, lietū ruošiniai ir skystas metalas.

Karštojo tūrinio štampavimo būdai:

1. Štampavimas atviraisiais štampais

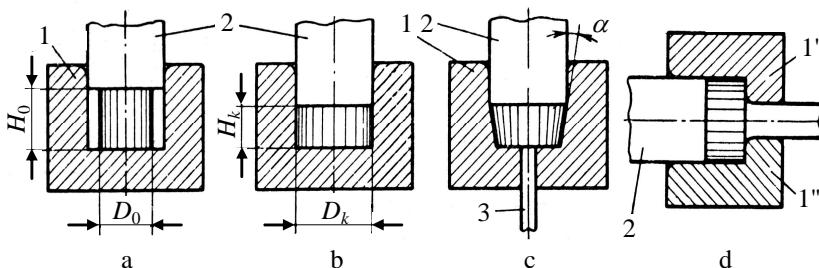
(3.20 pav.). Ruošinio tūris yra didesnis už kaltinio tūri, todėl nereikia tiksliu ruošinių. Štampų skiriamojos plokštumoje apie išorinį ertmės kontūrą yra specialus išlajos griovelis 1, skirtas metalo pertekliui (išlajai). Išlaja stabdo metalo tekejimą iš štampo ertmės, todėl ji geriau užpildoma. Po štampavimo išlajos apkertamos.



3.20 pav. Štampavimas atviraisiais štampais

2. Štampavimas uždaraisiais štampais (3.21 pav.).

Štampuojama naudojant horizontaliąias kalimo mašinas, presus ir kūjus. Ruošinys deformuoojamas matricoje, į kurią su pastoviu tarpeliu įeina puansonos (3.21 pav., a, b). Taip gaunama uždara štampo ertmė. Kaltiniai išstumiami stumtuvais, esant nedidelims štampavimo nuolydžiams (3.21 pav., c) arba naudojama judama matrica (1' ir 1" dalys) be štampavimo nuolydžių (3.21 pav., d).

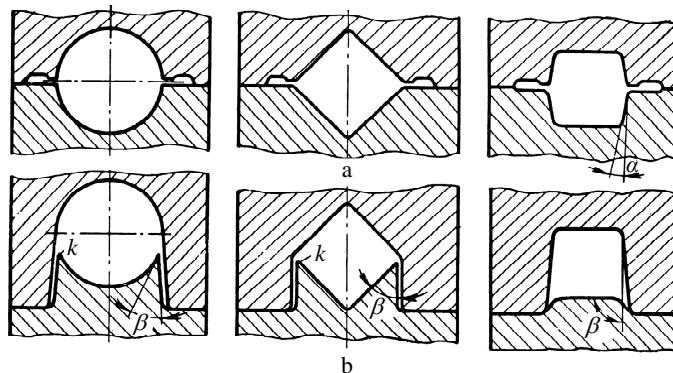


3.21 pav. Štampavimas uždaraisiais štampais

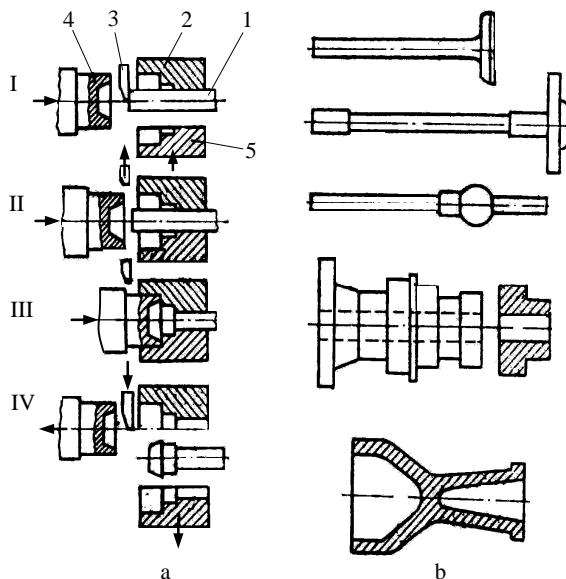
Pagrindinis reikalavimas – tikslūs ruošinio matmenys. Dėl jo paklaidų galima nedidelė išlaja (kai ruošinio tūris didesnis už kaltinio) arba nepilnai užpildyta forma (kai ruošinio tūris mažesnis).

Štampavimo uždaraisiais štampais trūkumai: nedidelis formų universalumas (3.22 pav.), dėl mažo kampo β , gaunamas nedidelis briaunos k patvarumas, reikalinga didesnė deformavimo jėga.

Privalumai – tikslesni kaltiniai; galima štampuoti mažo plastiškumo lydinius, kadangi susidaro netolygus gniuždymo įtempių būvis. Šiam štampavimui priskiriamas štampavimas išspaudžiant ir pramušant.



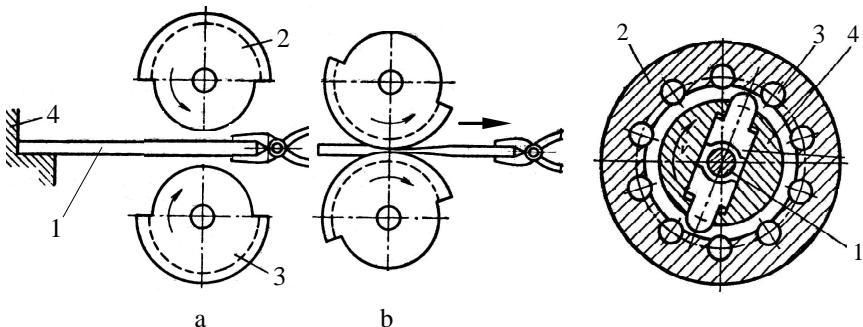
3.22 pav. Atvirujių (a) ir uždarujių (b) štampų skerspjūviai: α – štampo nuolydis; β – vidinės štampo dalies darbinės briaunos kampus; k – štampo briauna



3.23 pav. Štampavimo HKM schema (a) ir kaltiniai (b): I – ruošinio padavimas iki atramos; II – ruošinio suspaudimas; III – štampavimas; IV – kaltinio išémimas; 1 – ruošinys; 2 – nejudama matrica; 3 – atrama; 4 – puansonas; 5 – judama matrica

Deformuojamas metalas užpildo štempo ertmę, kuri vadinama lataku. Paprastos formos kaltiniai štempuojami vienalatakiais štampaais, o sudėtingos formos – daugialatakiais štampaais (2–6 latakai). Juose yra *paruošiamieji* (ištėsimo, apspaudimo, išspaudimo, lenkimo) *latakai*, kuriuose ruošinio forma priartinama prie kaltinio formos, ir *stampavimo* (rupiojo, glotniojo) *latakai*, kuriuose gaunamas baigtų formų kaltinys.

Štampavimui naudojami įrengimai: kūjai (garo, frikcinių, hidrauliniai), presai (mechaniniai, hidrauliniai, sraigtiniai), horizontalios kalimo mašinos (3.23 pav.), specialios štampavimo mašinos: kalimo valcų (3.24 pav.), rotacinės kalimo mašinos (3.25 pav.), horizontalios lenkimo mašinos, elektrinės susodinimo mašinos (3.26 pav.).

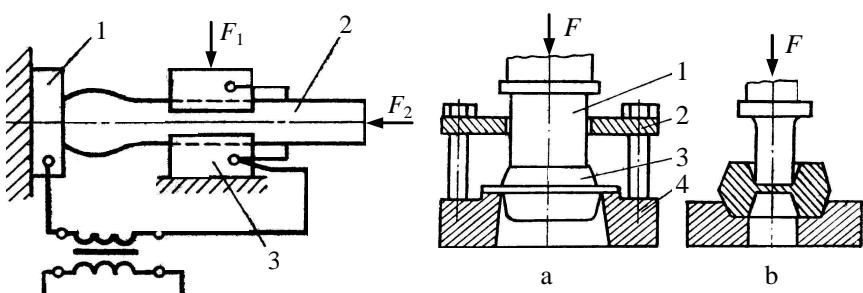


3.24 pav. Kalimo valcų veikimo schema:

- a – paduodamas ruošinys;
- b – valcavimo eiga;
- 1 – ruošinys; 2 – velenas;
- 3 – sektorinis štampas; 4 – atrama

3.25 pav. Rotacinės kalimo mašinos veikimo schema:

- 1 – ruošinys; 2 – apkaba;
- 3 – ritinėliai; 4 – sukiny; 5 – puansonas



3.26 pav. Susodinimo schema:

- 1 – atraminis kontaktas;
- 2 – ruošinys;
- 3 – gaubiantysis kontaktas

3.27 pav. Išlajos apkirtimo (a) ir pertvaros pramušimo (b) schema:

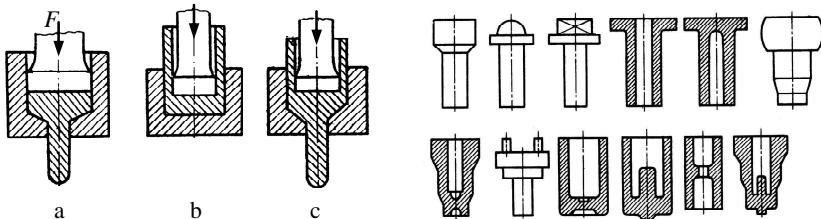
- 1 – puansonas; 2 – išlajos nuėmiklis;
- 3 – kaltinys; 4 – matrica

Pagalbinės karštojo štampavimo operacijos: išlaju apkirtimas (3.27 pav., a) ir pertvarų pramušimas (3.27 pav., b), esant karštiems arba šaltiems ruošiniams; kaltinių lyginimas (tiesinamos ašys, kurios išlinksta išsimant kaltinį iš štampo ertmės, apkerpant išlajas ir termiškai apdorojus); nuodegu valymas (valoma būgnuose, šratų srautu, įesdinant vandeniniuose rūgščių tirpaluose); kaltinių kalibravimas (siekiama kaltinio arba jo dalies matmenų tikslumo ir glotnesnio paviršiaus); kokybės tikrinimas visuose gamybos etapuose nuo ruošinio iki kaltinio.

3.8. Šaltasis štampavimas

3.8.1. Šaltasis tūrinis štampavimas

Šaltasis išspaudimas (3.28 pav.). Gaminamos detalės ir ruošiniai iš plieno, Al, Cu, Ni ir jų lydinių (3.29 pav.). Deformavimo metu metalas (strypai, viela, ląstai, juostos, vamzdžiai, periodiniai valcuoti ruošiniai ir kt.) išspaudžiamas pro matricos skylyje (tiesioginis išspaudimas) arba pro tarpelį tarp matricos ir puansono (atvirkštinis išspaudimas). Kombinuotu išspaudimo būdu metalas išspaudžiamas keliomis kryptimis.



3.28 pav. Šaltasis išspaudimas:

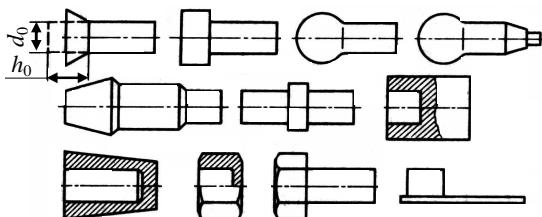
- a – tiesioginis;
- b – atvirkštinis;
- c – kombinuotas

3.29 pav. Ruošiniai, gauti šaltojo išspaudimo būdu

Šaltai išspaudžiant, kaip ir presujant, susidaro netolygus triašis gniuždymo įtempių būvis, todėl metalas pasidaro labai plastiškas. Išspaudimo metu metalas tepamas, siekiant pagerinti jo tekėjimą ir sumažinti deformavimo jėgą.

Šaltasis susodinimas.

Štampuojamos vientisos ir tuščiavidurės sukimosi kūnų tipo detalės su vietiniiais susutorėjimais (3.30 pav.) iš mažaanglio plieno, spalvotųjų metalų ir jų lydinių. Šios detalės gaminamos našiausiu šaltojo susodinimo automatais, deformuojant iki 52 mm skersmens kalibruotus strypus arba vielą. Didžiausias automatais štampuojamų detalių ilgis 200–300 mm (iki 400 mm). Paprastos formos detalės (varžtai, sraigtais, kniedės) susodinamos 1–2 perėjimais, o didelio skersmens ir



3.30 pav. Ruošiniai, gauti šaltojo susodinimo būdu

mažo ilgio arba ilgos tuščiavidurės detalės – 3–6 perėjimais. Pasiekiamas skersinių matmenų tikslumas $IT8\text{--}9$, paviršiaus šiurkštumas $R_a = 2,5\text{--}0,63 \mu m$.

Šaltasis tūrinis formavimas. Kadangi deformuojant metalas sukietėja ir sumažėja jo plastišumas, šaltai formuojamos dažniausiai nedidelės detalės iš plastiškų metalų ir jų lydinių atviraisiais štampais (3.20 pav.). Šiuo būdu gaminamos ir sudėtingos formos tuščiavidurės detalės. Šaltai formuojant dažniausiai tepama.

3.8.2. Šaltasis lakštinis štampavimas

Tai metalų ir jų lydinių lakštą, juostą, taip pat plastikų, odos, kartono ir kt. nemetalinių medžiagų deformavimas kambario temperatūroje, keičiant tam tikro elemento formą. Ruošinio storis iš esmės nesikeičia. Storesni nei 10 mm lakštais ir mažo plastiškumo lydiniai štampuojami karšti arba įkaitinti. *Privalumai:* didelis našumas, operacijų automatizavimas, tikslūs matmenys ir glotnūs paviršiai, taikomas smulkiasiųjine gamyboje.

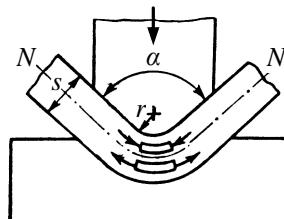
Lakštinio štampavimo operacijos skirstomos:

1. **Atskyrimo operacijos** (atliekamos pagal uždarą arba atvirą kontūrą): atkirimas (ruošinio dalies atskyrimas); išskirtimas (gaminio atskyrimas nuo ruošinio pagal išorinį kontūrą); pramušimas (medžiagos dalies pašalinimas iš atliekas štampuojant skylę); ikirtimas (dalinių ruošinio atskyrimas neprarandant sukibimo); apkirimas (nedidelės metalo dalies atskyrimas pagal ruošinio ar gaminio kraštą).
2. **Formos keitimo operacijos** (detalės formos ir matmenų pakeitimas erdvėje):

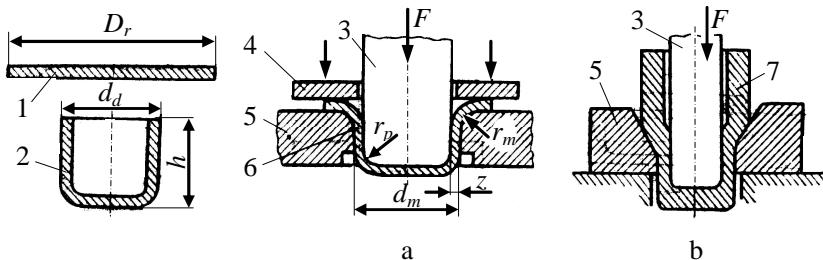
- a) Lenkimas (3.31 pav.). Lenkimo štampu keičiama ruošinio ašies kryptis. Lenkiamos medžiagos išoriniai sluoksniai yra tempiami, o vidiniai – gnuždomi. Kad lenkiamas ruošinys nesuirtų, lenkimo spindulys $r = (0,25\text{--}2,5)s$. Ruošinio matmenys yra nustatomi pagal neutralų sluoksnį $N-N$, kadangi lenkiant jo matmenys praktiškai nekinta (deformacija lygi nuliui). Šaltojo lenkimo metu plastiškai deformuojama tik su puansonu ir matrica susiliečianti ruošinio dalis.

Veikiant tampriosioms jėgomis, lenkimo kampus padidėja (lenkimo spyruokliaivimas) ir tai būtina įvertinti.

- b) Tempimas (3.32 pav.). Tuščiavidurė detalė gaunama puansonui ištūmus plokščią ruošinį į matricos skylę. Dėl radialine kryptimi veikiančių gnuždymo įtempių susidaro raukšlės. Jų išvengiama naudojant žedo tipo prispaudiklį, kuris prispaudžia ruošinį prie matricos. Kad neprakirstų lakšto, puansono briaunos suapvalinamos. Matricos ir prispaudiklio kontaktiniai paviršiai yra tepami. Operacijos metu metalas sukietinamas, todėl, ištimpiant kelias perėjimais, apdorojama termiškai (atkaitinama). Kai gaminys ištimpiamas *neploninant sienelių*, tarpas tarp puansono ir matricos $z = (1,1\text{--}1,3)s$. Kai šis tarpas mažesnis už pradinį lakšto storį, ištimpiamą *ploninant sienèles*. Taip ištimpiamos ilgos plonasienės detalės.

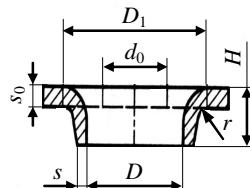


3.31 pav. Lenkimo schema



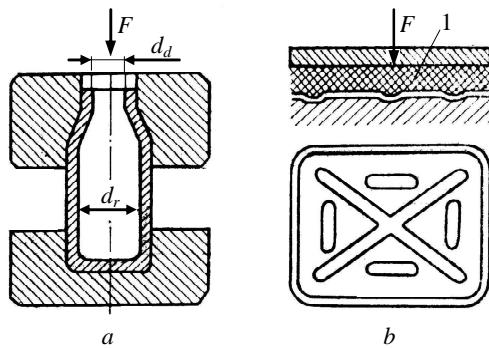
3.32 pav. Ištempimo schemas: *a* – neploninant sienelės; *b* – ploninant sienele; 1,7 – ruošinys; 2 – detalė; 3 – puansonas; 4 – prispaudiklis; 5 – matrica

- c) Atrietimas (3.33 pav.). Borteliai gaunami stumiant puansoną į ruošinio dalį su skyde. Kad skydės kraštai nejtrūktų, $D/d_0 = 1,2 – 1,8$.



3.33 pav. Atrietimas

- d) Apspaudimas (3.34 pav., *a*). Tai tuščiavidurio ruošinio galo skersmens sumažinimas matricoje. Vengiant išilginii ir skersinių raukšlių deformuojamajoje ir nedeformuojamajoje dalyje, leistinas skersmens sumažėjimas $d_d = (0,7 – 0,8)d_r$.
- e) Formavimas (3.34 pav., *b*). Ruošinyje daromos standumo briaunos, įdubos, iškylos ir kt. Deformuojama metaliniai štampais. Puansonas arba matrica gali būti ir iš gumos.



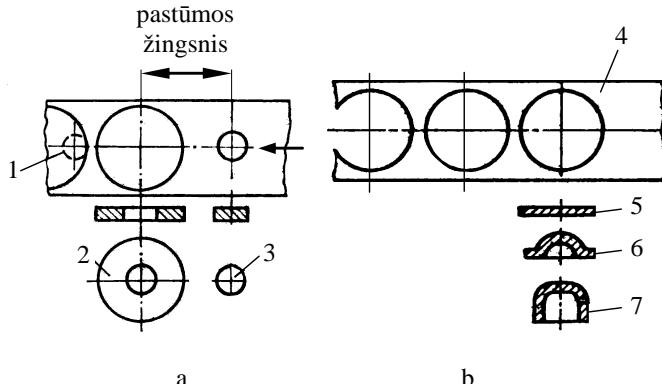
3.34 pav. Apspaudimas (*a*) ir reljefinis formavimas (*b*): 1 – guminis puansonas

3.9. Lakštinio štampavimo štampai

Vienai atskyrimo arba formos keitimo operacijai atlkti naudojami paprastojo veikimo štampai.

Vienu metu kelioms operacijoms tuo pačiu štampu (3.35 pav.) atlkti naudojami

- nuoseklaus veikimo štampai (pramušimas ir iškirtimas skirtingose pozicijose, išdėstytose pastūmos kryptimi),
- sutapdinto veikimo štampai (pramušimas ir iškirtimas, iškirtimas ir lenkimas, iškirtimas ir ištempimas ir kt. vienoje pozicijoje vienu metu).



3.35 pav. Nuoseklaus veikimo (a) ir sutapdinto veikimo (b) schema: 1 – atrama; 2, 7 – detalė; 3 – atlieka; 4 – juosta; 5 – iškirstas ruošinys; 6 – ištempimo pradžia

4. METALŲ SUVIRINIMAS

4.1. Pagrindinės žinios apie medžiagų suvirinimą

Suvirinimo proceso apibūdinimas. Suvirinimas yra technologinis procesas, kuriuo gaunamas neįšardomas detalių sujungimas. Suvirinami metalai ir jų lydiniai, stiklas, keramikos dirbinių detalių, plastikai, metalai su nemetalais ir kt. Suvirinimas yra našus, pigus ir svarbiausias technologinis procesas ištisai laivų korpusams, skysčių ir dujų rezervuarams, cisternoms, metaliniams vagonams, katilams, garo ir hidraulinėms turbinoms suvirinti. Suvirinant yra mažiau gamybos atliekų, taupiau naudojamos medžiagos, pavyzdžiuui, pakeitus kniedytas konstrukcijas suvirintomis, jų sutaupoma apie 15–20 %.

Pagal ruošinių sujungimo būdą suvirinimas skirstomas:

1. Lydomasis suvirinimas – dėl išsiskyrusios šilumos ruošinių briaunos apsilydo, susidaro bendra išlydytu medžiagų vonelė. Jai sukietėjus gaunama suvirinimo siūlė.

Suvirinant šiuo būdu, gali gerokai pasikeisti besikristalizuojančiojo siūlės metalo:

- cheminė sudėtis (suvirinimo vonelėje išlydytas metalas oksiduoja, tirpsta azotas ir išdega legiruojančios elementai),
- struktūra (susidaro dendritinė siūlė),
- mechaninės savybės (sumažėja plastiškumas ir kt.).

Lydomojo suvirinimo būdai (4.1 lentelė):

- lankinis (11, 12, 13, 14, 15, 18) – lydalo vonelė susidaro lydantis pagrindiniams metalui ir elektrodiui (ar miltelinei vielai); pagrindiniams metalui, nelydžiam elektrodiui ir pridėtiniam metalui; degant lankui tarp volframo elektrodo ir plazmotrono tūtos arba ruošinio;
 - dujinis (31) – gaminio briaunos ir pridėtinis metalas išlydomi liepsna, susidarančia degant degiuju dujų ir deguonies mišiniu;
 - elektronpluoščis (51) – ruošinys kaitinamas kinetine elektronų energija;
 - lazerinis (52) – ruošinių jungimo vieta sugeria lazerio spinduliuotę ir susilydo susidarant išlydyto metalo vonelei;
 - elektrošlakinis (72) – pagrindinis ir pridėtinis metalas išlydomi šiluma, kuri išskiria praleidžiant elektros srovę per skysto šlako vonią;
 - kt.
- Palyginti su slėginiu suvirinimu, lydomasis suvirinimas yra universalesnis.

2. Slėginis suvirinimas – dėl plastinės deformacijos gaunamas glaudus suvirinamujų paviršių kontaktas ir lietimosi vietoje (suvirinimo zonoje) vyksta atomų difuzija. Metalo plastiškumui padidinti suvirinamosios siūlės sritis dažniausiai įkaitinama. Suvirinimo zonas savybės artimos suvirinamojo metalo savybėms.

Slėginio suvirinimo būdai (4.1 lentelė):

- kontaktinis (2) – elektros srovė įkaitina suspaustų detalių sąlyčio zoną iki plastinės būsenos arba iki tol, kol apsilydo. Išjungus maitinimą ir papildomai suspaudus, detalių suvirinamos;
- ultragarsinis (41) – neįšardomas detalių sujungimas gaunamas jas veikiant ultragarsinio dažnio virpesiais ir kartu spaudžiant nedidele jėga;
- trintinis (42) – du paviršiai suvirinami įkaitę dėl trinties ir papildomo spaudimo;

- sprogimu (441) – detalės spaudžiamos didele jėga, kuri susidaro sprogstant sprogstamajam mišiniui;
- šaltasis (48) – suvirinamosios vietos plastiškai deformuojamos jų nekaitinant;
- kt.

Slėginio suvirinimo privalumai, palyginti su lydomuoju suvirinimu:

- ◊ neaukšta įkaitinimo temperatūra,
 - ◊ mažesnės deformacijos,
- tačiau mažiau universalus.

Šiam suvirinimo procesui

- * reikalinga sudėtingesnė aparatūra,
- * suvirinimo zoną reikia apsaugoti nuo oksidacijos ir užteršimo.

Pagal varto jamosios energijos rūši suvirinimas skirstomas:

- Elektrinis – elektros energija paverčiama šiluma (lankinis, elektrošlakinis, indukcinis, elektronpluoštis ir kt. suvirinimas). Jungties sritis kaitinama tol, kol išsilydo.
- Cheminis – cheminė energija paverčiama šiluma (dujinis ir kt. suvirinimas). Suvirinimo zonoje medžiagų briaunos išsilydo. Joms sustingus, gaunamas sujungimas (4.1 pav.).
- Mechaninis – sujungiami plastiškai deformuoti metalai (šaltasis, detonacinis suvirinimas, suvirinimas trintimi ir kt.).
- Elektromechaninis – ruošinių lietimosi zona įkaitinama iki plastinio būvio arba iki tol, kol apsilydo ir, papildomai paspaudus, suvirinama (kontaktinis suvirinimas ir kt.).
- Cheminis mechaninis – sujungimas gaunamas įkaitinus metalą iki plastinio būvio ir jį deformavus (dujinis slėginis ir kt. suvirinimas).



4.1 pav. Termitinis suvirinimas

4.1 lentelė. Suvirinimo procesai (EN ISO 4063:2011)

1 – LANKINIS SUVIRINIMAS (Arc welding)	
11 – Lankinis suvirinimas lydžiuoju elektrodu be dujinės apsaugos <i>(Metal arc welding without gas protection)</i>	
111 – Rankinis lankinis suvirinimas lydžiuoju elektrodu. Lankinis suvirinimas glaistytaisiais elektrodais <i>(Manual metal arc welding (MMA welding), metal arc welding with covered electrode. Shielded metal arc welding (SMAW), USA)</i>	
112 – Gravitacinis (lankinis) suvirinimas glaistytuoju elektrodu <i>(Gravity (arc) welding with covered electrode. Gravity feed welding, USA)</i>	
114 – Lankinis suvirinimas milteline savisauge elektrodine viela <i>(Self-shielded tubular cored arc welding)</i>	

4.1 lentelės tēsinys

12 – Lankinis suvirinimas po fliusu <i>(Submerged arc welding, SAW)</i>
121 – Lankinis suvirinimas po fliusu elektrodine viela <i>(Submerged arc welding with solid wire electrode)</i>
122 – Lankinis suvirinimas po fliusu juostiniu elektrodu <i>(Submerged arc welding with strip electrode)</i>
124 – Lankinis suvirinimas po fliusu su metalo miltelių priedu <i>(Submerged arc welding with metallic powder addition)</i>
125 – Lankinis suvirinimas po fliusu milteline elektrodine viela <i>(Submerged arc welding with tubular cored electrode)</i>
126 – Submerged arc welding with cored strip electrode (terminas neišverstas)
13 – Lankinis suvirinimas lydžiuoju elektrodu apsauginėse dujose <i>(Gas-shielded metal arc welding. Gas metal arc welding (GMAW), USA)</i>
131 – Lankinis suvirinimas vieliniu elektrodu inertinėse dujose <i>(MIG (Metal Inert Gas) welding with solid wire electrode. GMAW using inert gas and solid wire electrode, USA)</i>
132 – Lankinis suvirinimas milteline elektrodine viela su fliuso užpildu inertinėse dujose <i>(MIG welding with flux cored electrode. Flux cored arc welding, USA)</i>
133 – MIG suvirinimas milteline elektrodine viela su metaliniu užpildu <i>(MIG welding with metal cored electrode. GMAW using inert gas and metal cored wire, USA)</i>
135 – Lankinis suvirinimas vieliniu elektrodu apsauginėse dujose <i>(MAG (Metal active gas) welding with solid wire electrode. GMAW using active gas with solid wire electrode, USA)</i>
136 – Lankinis suvirinimas milteline elektrodine viela su fliuso užpildu apsauginėse dujose <i>(MAG welding with flux cored electrode. GMAW using active gas and flux cored electrode, USA)</i>
138 – MAG suvirinimas milteline elektrodine viela su metaliniu užpildu <i>(MAG welding with metal cored electrode. GMAW using active gas and metal cored electrode, USA)</i>
14 – Lankinis suvirinimas nelydžiuoju elektrodu apsauginėse dujose <i>(Gas-shielded welding with non-consumable electrode. Gas tungsten arc welding, USA)</i>
141 – Lankinis suvirinimas volframo elektrodu ir pridėtine medžiaga (viela / strypu) inertinėse dujose <i>(TIG welding with solid filler material (wire / rod). Gas tungsten arc welding using inert gas and solid filler material (wire / rod), USA)</i> Neišversti terminai:
142 – Autogenous TIG welding. <i>Autogenous gas tungsten arc welding using inert gas, USA</i>
143 – TIG welding with tubular cored filler material (wire / rod). <i>Gas tungsten arc welding using inert gas and tubular cored filler material (wire / rod), USA</i>

145 – TIG welding using reducing gas and solid filler material (wire / rod). <i>Gas tungsten arc welding using inert gas plus reducing gas additions and solid filler material (wire / rod), USA</i>	
146 – TIG welding using reducing gas and tubular cored filler material (wire / rod). <i>Gas tungsten arc welding using inert gas plus reducing gas additions and tubular cored filler material (wire / rod)</i>	
147 – Gas-shielded arc welding with non-consumable tungsten electrode using active gas (TAG welding). <i>Gas tungsten arc welding using active gas, USA</i>	
15 – Plazminis suvirinimas (Plasma arc welding)	
151 – Plazminis suvirinimas lydžiuoju elektroodu inertinėse dujose <i>(Plasma MIG welding)</i>	
152 – Miltelinis plazminis suvirinimas <i>(Powder plasma arc welding)</i>	
153 – Plazminis suvirinimas tiesioginio veikimo lanku <i>(Plasma arc welding with transferred arc)</i>	
154 – Plazminis suvirinimas netiesioginio veikimo lanku <i>(Plasma arc welding with non-transferred arc)</i>	
155 – Plasma arc welding with semi-transferred arc (terminas neišverstas)	
18 – Kiti lankinio suvirinimo procesai <i>(Other arc welding processes)</i>	
185 – Sandūrinis suvirinimas magnetiškai sukamu lanku <i>(Magnetically impelled arc butt welding, MIAB welding)</i>	
2 – KONTAKTINIS (VARŽINIS) SUVIRINIMAS (Resistance welding)	
21 – Taškinis suvirinimas; Kontaktinis taškinis suvirinimas <i>(Resistance spot welding, Spot welding, USA)</i>	
211 – Vienpusis taškinis suvirinimas <i>(Indirect spot welding)</i>	
212 – Dvipusis taškinis suvirinimas <i>(Direct spot welding)</i>	
22 – Kontaktinis siūlinis suvirinimas <i>(Seam welding, Resistance seam welding, USA)</i>	
221 – Užleistinis kontaktinis siūlinis suvirinimas <i>(Lap seam welding)</i>	
222 – Gniuždomasis siūlinis suvirinimas <i>(Mash seam welding)</i>	
223 – Prep-lap seam welding (terminas neišverstas)	
224 – Wire seam welding (terminas neišverstas)	
225 – Kontaktinis siūlinis sandūrinis suvirinimas, naudojant foliją <i>(Foil butt-seam welding)</i>	
226 – Kontaktinis siūlinis suvirinimas, naudojant kontaktinę juostą <i>(Seam welding with strip)</i>	

4.1 lentelės tēsinys

<p>23 – Kontaktinis reljefinis suvirinimas <i>(Projection welding)</i></p>
<p>231 – Vienpusis kontaktinis reljefinis suvirinimas <i>(Indirect projection welding)</i></p>
<p>232 – Dvipusis kontaktinis reljefinis suvirinimas <i>(Direct projection welding)</i></p>
<p>24 – Kontaktinis aplydomasis suvirinimas <i>(Flash welding)</i></p>
<p>241 – Kontaktinis aplydomasis suvirinimas pakaitinimu <i>(Flash welding with preheating)</i></p>
<p>242 – Kontaktinis aplydomasis suvirinimas be pakaitinimo <i>(Flash welding without preheating)</i></p>
<p>25 – Kontaktinis sandūrinis suvirinimas <i>(Resistance butt welding, Upset welding, USA)</i></p>
<p>26 – Kontaktinis smeigių privirinimas <i>(Resistance stud welding)</i></p>
<p>27 – Kontaktinis aukštadaznis suvirinimas <i>(HF resistance welding, High frequency upset welding, USA)</i></p>
<p>29 – Kiti kontaktinio suvirinimo procesai <i>(Other resistance welding processes)</i></p>
<p>3 – DUJINIS SUIVIRINIMAS <i>(Gas welding, Oxyfuel gas welding, USA)</i></p>
<p>31 – Dujinis suvirinimas <i>(Oxyfuel gas welding)</i></p>
<p>311 – Acetileninis deguoninis suvirinimas <i>(Oxyacetylene welding)</i></p>
<p>312 – Propaninis deguoninis suvirinimas <i>(Oxypropane welding)</i></p>
<p>313 – Vandenilinis deguoninis suvirinimas <i>(Oxyhydrogen welding)</i></p>
<p>4 – SLĖGINIS SUIVIRINIMAS <i>(Welding with pressure)</i></p>
<p>41 – Ultragarsinis suvirinimas <i>(Ultrasonic welding)</i></p>
<p>42 – Trintinis suvirinimas <i>(Friction welding)</i></p>
<p>421 – Direct drive friction welding (terminas neišverstas)</p>
<p>422 – Inertia friction welding (terminas neišverstas)</p>
<p>423 – Trintinis smeigių privirinimas <i>(Friction stud welding)</i></p>
<p>43 – Sukamasis trintinis suvirinimas <i>(Friction stir welding)</i></p>

44 – Suvirinimas didele mechanine energija <i>(Welding by high mechanical energy)</i>
441 – Suvirinimas sprogimu <i>(Explosion welding)</i>
442 – Magnetinis impulsinis suvirinimas <i>(Magnetic pulse welding)</i>
45 – Difuzininis suvirinimas <i>(Diffusion welding)</i>
47 – Dujinis sléginiis suvirinimas <i>(Oxy-fuel gas pressure welding. Pressure gas welding, USA)</i>
48 – Saltasis sléginiis suvirinimas <i>(Cold pressure welding. Cold welding, USA)</i>
49 – Karštasis sléginiis suvirinimas <i>(Hot pressure welding)</i>
5 – PLUOŠTINIS SUVIRINIMAS <i>(Beam welding)</i>
51 – Elektronpluoštis suvirinimas <i>(Electron beam welding)</i>
511 – Elektronpluoštis suvirinimas vakuumė <i>(Electron beam welding in vacuum)</i>
512 – Elektronpluoštis suvirinimas ore <i>(Electron beam welding in atmosphere)</i>
513 – Electron beam welding with addition of shielding gases (nėra vertimo)
52 – Lazerinis suvirinimas <i>(Laser welding. Laser beam welding, USA)</i>
521 – Suvirinimas kietojo kūno lazeriu <i>(Solid state laser welding)</i>
522 – Suvirinimas dujiniu lazeriu <i>(Gas laser welding)</i>
523 – Suvirinimas puslaidininkiniu lazeriu <i>(Diode laser welding. Semi-conductor laser welding, USA)</i>
7 – KITI SUVIRINIMO PROCESAI <i>(Other welding processes)</i>
71 – Termitinis suvirinimas <i>(Aluminothermic welding. Thermite welding, USA)</i>
72 – Elektrošlakinis suvirinimas <i>(Electroslag welding)</i>
721 – Elektrošlakinis suvirinimas juostiniu elektroodu <i>(Electroslag welding with strip electrode)</i>
722 – Elektrošlakinis suvirinimas elektrodine viela <i>(Electroslag welding with wire electrode)</i>

4.1 lentelės tēsinys

73 – Elektrinis dujinis suvirinimas (<i>Electrogas welding</i>)
74 – Indukcinis suvirinimas (<i>Induction welding</i>)
741 – Indukcinis sandūrinis suvirinimas (<i>Induction butt welding. Induction upset welding, USA</i>)
742 – Indukcinis siūlinis suvirinimas (<i>Induction seam welding</i>)
743 – Aukštadažnis indukcinis suvirinimas (<i>Induction HF welding</i>)
75 – Šviespluoštis suvirinimas (<i>Light radiation welding</i>)
753 – Infraraudonpluoštis suvirinimas (<i>Infrared welding</i>)
78 – Lankinis smeigių privirinimas (<i>Arc stud welding</i>)
783 – Lankinis smeigių privirinimas naudojant keraminį žiedą arba apsaugines dujas (<i>Drawn arc stud welding with ceramic ferrule or shielding gas. Arc stud welding, USA</i>)
784 – Lankinis trumpo ciklo smeigių privirinimas (<i>Short-cycle drawn arc stud welding. Arc stud welding, USA</i>)
785 – Lankinis kondensatorinis smeigių privirinimas (<i>Capacitor discharge drawn arc stud welding. Arc stud welding, USA</i>)
786 – Lankinis kondensatorinis kontaktinio sužadinimo smeigių privirinimas (<i>Capacitor discharge stud welding with tip ignition. Arc stud welding, USA</i>)
787 – Lankinis smeigių privirinimas naudojant lydyjį žiedą (<i>Drawn arc stud welding with fusible collar</i>)
8 – PJOVIMAS IR DROŽIMAS (<i>Cutting and gouging</i>)
81 – Liepsminis pjovimas (<i>Flame cutting. Oxygen cutting; oxyfuel cutting, USA</i>)
82 – Lankinis pjovimas (<i>Arc cutting</i>)
821 – Orinis lankinis pjovimas (<i>Air arc cutting. Air carbon arc cutting, USA</i>)
822 – Deguoninis lankinis pjovimas (<i>Oxygen arc cutting</i>)
83 – Plazminis pjovimas (<i>Plasma cutting. Plasma arc cutting, USA</i>)
Neišversti terminai:
831 – <i>Plasma cutting with oxidising gas</i>
832 – <i>Plasma cutting without oxidising gas</i>
833 – <i>Air plasma cutting</i>
834 – <i>High-tolerance plasma cutting</i>

84 – Lazerinis pjovimas (<i>Laser cutting. Laser beam cutting, USA</i>)
86 – Liepsninis drožimas (<i>Flame gouging. Thermal gouging, USA</i>)
87 – Lankinis drožimas (<i>Arc gouging</i>)
871 – Orinis lankinis drožimas (<i>Air arc gouging. Air carbon arc cutting, USA</i>)
872 – Deguonininis lankinis drožimas (<i>Oxygen arc gouging. Oxygen gouging, USA</i>)
88 – Plazminis drožimas (<i>Plasma gouging</i>)
9 – KIETASIS, MINKŠTASIS IR SUVIRINAMASIS LITAVIMAS (<i>Brazing, soldering and braze welding</i>)
91 – Kietasis litavimas su vietiniu šildymu (<i>Brazing with local heating</i>)
911 – Kietasis infraraudonpluoštis litavimas (<i>Infrared brazing</i>)
912 – Kietasis liepsninis litavimas (<i>Flame brazing. Torch brazing, USA</i>)
913 – Kietasis litavimas lazerio pluoštu (<i>Laser beam brazing</i>)
914 – Kietasis elektronpluoštis litavimas (<i>Electron beam brazing</i>)
916 – Kietasis indukcinis litavimas (<i>Induction brazing</i>)
918 – Kietasis varžinis litavimas (<i>Resistance brazing</i>)
919 – Kietasis difuzinis litavimas (<i>Diffusion brazing</i>)
92 – Brazing with global heating (terminas neišverstas)
921 – Kietasis litavimas krosnyje (<i>Furnace brazing</i>)
922 – Kietasis litavimas vakuumė (<i>Vacuum brazing</i>)
923 – Kietasis įmerktinis litavimas (<i>Dip-bath brazing</i>)
924 – Kietasis litavimas druskų vonioje (<i>Salt-bath brazing</i>)
925 – Kietasis litavimas fliusų vonioje (<i>Flux-bath brazing</i>)
926 – Panardinamasis litavimas (<i>Immersion brazing</i>)

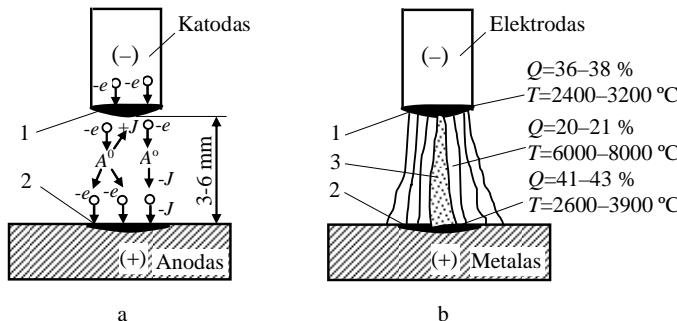
4.1 lentelės tēsinys

93 – Kiti kietojo litavimo procesai (<i>Other brazing processes</i>)
94 – Minkštasis litavimas su vietiniu šildymu (<i>Soldering with local heating</i>)
941 – Minkštasis infraraudonpluoščio litavimas <i>(Infrared soldering)</i>
942 – Minkštasis litavimas krosnyje <i>(Flame soldering. Torch soldering, USA)</i>
943 – Minkštasis litavimas lituokliu <i>(Soldering with soldering iron)</i>
944 – Minkštasis litavimas traukimu <i>(Drag soldering)</i>
945 – Minkštasis lazerinis litavimas <i>(Laser soldering)</i>
946 – Minkštasis indukcinis litavimas <i>(Induction soldering)</i>
947 – Minkštasis ultragarsinis litavimas <i>(Ultrasonic soldering)</i>
948 – Minkštasis varžinis litavimas <i>(Resistance soldering)</i>
949 – Minkštasis difuzinis litavimas <i>(Diffusion soldering)</i>
95 – Soldering with global heating (terminas neišverstas)
951 – Minkštasis litavimas lydmetalio banga <i>(Wave soldering)</i>
953 – Minkštasis litavimas krosnyje <i>(Furnace soldering)</i>
954 – Minkštasis litavimas vakuumė <i>(Vacuum soldering)</i>
955 – Minkštasis įmerktinis litavimas <i>(Dip soldering)</i>
957 – Minkštasis litavimas druskų vonioje <i>(Salt-bath soldering)</i>
96 – Kiti minkštajojo litavimo procesai (<i>Other soldering processes</i>)
97 – Suvirinamasis litavimas (<i>Weld brazing. Braze welding, USA</i>)
971 – Dujinis suvirinamasis litavimas <i>(Gas weld brazing. Gas braze welding, USA)</i>
972 – Lankinis suvirinamasis litavimas <i>(Arc weld brazing. Arc braze welding, USA)</i> Neišversti terminai:
973 – Gas metal arc weld brazing. <i>Gas metal arc braze welding, USA)</i>
974 – Gas tungsten arc weld brazing. <i>Gas tungsten arc braze welding, USA)</i>
975 – Plasma arc weld brazing. <i>Plasma arc braze welding, USA)</i>
976 – Laser weld brazing. <i>Laser braze welding, USA)</i>
977 – Electron beam weld brazing. <i>Electron beam braze welding, USA)</i>

4.2. Lankinės suvirinimasis

4.2.1. Elektros lankas ir jo savybės

Elektros lankas yra galingas stabilus elektros išlydis jonizuotų dujų terpėje tarp elektrodų. Elektrodai jungiami prie nuolatinės arba kintamosios srovės šaltinio.



4.2 pav. Suvirinimo lanko schema: a – nuolatinės srovės lanko išlydis jonizuotose dujose; b – šilumos ir temperatūros pasiskirstymas: 1 – katodinė sritis; 2 – anodinė sritis; 3 – lanko stupis; A^0 – neutralus atomas; e – elektronas; +J – teigiamas jonas; -J – neigiamas jonas

Elektros išlydis dujose galimas dėl jose esančių laisvųjų elektronų ir teigiamų bei neigiamų jonų. Procesas, kurio metu iš neutralių atomų ir molekulių susidaro teigiamai ir neigiamai jonai, vadinamas *j o n i z a c i j a*. Norint gauti elektros lanką, reikia jonizuoti tarp elektrodų esantį oro tarpą (arba kitą dujinę terpę). Kadangi metaluose yra didelė laisvųjų elektronų koncentracija, šiuos elektronus galima panaudoti duju molekulėms jonizuoti. Elektronams „ištraukti“ iš metalo reikalinga aukšta temperatūra (*termoelektroninė emisija*) ir stiprus elektrinis laukas (*autoelektroninė emisija*).

Vykstant elektronų emisijai (4.2 pav., a), elektronai, veikiami elektrinio lauko, dideliu greičiu skrieja nuo katodo link anodo. Susidurę su neutralaisiais dujų atomais A^0 , išmuša iš jų elektronus arba su jais susijungia ir taip jonizuoją dujas tarp anodo ir katodo.

- Jei elektronas, susiduręs su neutraliuoju atomu, išmuša iš jo du elektronus, susidaro *teigiamas jonas* (+J). Jis dideliu greičiu skrieja prie katodo ir išmuša iš jo naujus elektronus. Laisvieji elektronai taip pat dideliu greičiu skrieja link anodo, susiduria su juo ir savo kinetinę energiją paverčia šilumą.
- Jei elektronas, susiduręs su neutraliuoju atomu, jį prisijungia, susidaro *neigiamas jonas* (-J). Šis taip pat skrieja dideliu greičiu link anodo, su juo susiduria, ir jo kinetinė energija virsta šiluma.

Degant lankui, prie katodo (neigiamas polius) susidaro katodinė sritis 1, o prie anodo (teigiamas polius) – anodinė sritis 2. Plieninių elektrodų katodinės srities temperatūra siekia apie 2400 °C, anodinės srities – 2600–3000 °C. Suviriniant angliniu elektrodu, temperatūra katodo srityje siekia iki 3200 °C, anodo srityje – apie 3900 °C. Tarpas tarp elektrodų vadinamas *lanko stupu* 3 (4.2 pav., b). Temperatūra šioje zonoje siekia 6000–8000 °C.

Praktika rodo, kad 65–75 % lanko šilumos tenka metalui įkaitinti ir išlydyti. Likusi šiluma išspinduliuojama į aplinką, pasišalina su garais ir įkaituomis dujomis.

Suvirinant nuolatine srove,

daugiausia šilumos išsiskiria anodo srityje (42–43 %). Skirtinga katodo ir anodo zonų temperatūra taikoma technologiniams uždaviniams spręsti:

- Kai teigiamas polius (anodas) yra detalė, o neigiamas polius (katodas) – elektrodas, gaunamas tiesioginio poliarumo lankas. Suvirinimo briaunos labiau įkaitinamos.
- Kai neigiamas polius (katodas) yra detalė, o teigiamas polius (anodas) – elektrodas, gaunamas priešingo poliarumo lankas. Tuomet mažiau įkaista suvirinamoji detalė, bet greičiau lydosi elektrodas ir daugiau išsiskiria šilumos. Naudojamas plonasienėms ar plonalakštėms konstrukcijoms, taip pat nerūdijančiajam, atspariam kaitrai, labai anglingam ir kt. plienui suvirinti.

Suvirinant kintamaja srove,

katodo ir anodo zonų temperatūra ir išsiskirančios šilumos kiekis suvienodėja, kadangi katodinė ir anodinė sritys periodiškai keičiasi dažniu, lygiu srovės dažniui.

Per tam tikrą laiką įtampa ir srovė periodiškai keičiasi nuo nulinės vertės iki didžiausios. Keičiantis įtampai ir srovei,

- keičiasi lanko temperatūra,
- keičiasi jonizacijos laipsnis lanko zonoje,
- nestabiliai dega lankas.

Kai įtampa lygi nuliui, srovė lanke nutrūksta ir lankas gėsta. Kad lankas degtų, reikalinga didesnė įtampa.

Metalai ir nemetalai suvirinami, apvirinami ir pjaustomi rankiniu lankiniu būdu glaistytaisiais elektrodais (*MMA welding – manual metal arc welding*), lankiniu būdu vieliniu elektrodu inertinėse dujose (*MIG welding – metal inert gas welding*), lankiniu būdu nelydžiuoju volframo elektrodu inertinėse dujose (*TIG welding – tungsten inert gas welding*), lankiniu būdu lydžiuoju elektrodu po fliusu (*SAW – submerged arc welding*), lankiniu būdu lydžiuoju elektrodu aktyviose dujose (*MAG welding – metal active gas welding*).

Kai suvirinama lydžiuoju elektrodu, elektros lankui sužadinti

- elektrodo galas trumpai priliečiamas prie suvirinamosios detalės ir įvyksta trumpas jungimas (reikalingas elektrodo galui ir su juo kontaktuojančio ruošinio zonai įkaitinti);
- kontakto vietoje išsiskiria daug šilumos, tarp abiejų paviršių išsilydo nelygumai, metalas lydosi;
- tolinan elektrodą nuo detalės (3–6 mm), skystas lydalas tista (susidaro lydalo kaklelis), mažėja jo skerspjūvis, dėl to padidėja srovės tankis (elektros varža), lydalas įkaista iki virimo temperatūros ir išgaruoja;
- aukštoje temperatūroje ionizuojasi metalo garai ir tarp elektrodių esančios dujos;
- susidariusioje ionizuotoje aplinkoje vyksta elektros išlydis (dega lankas);

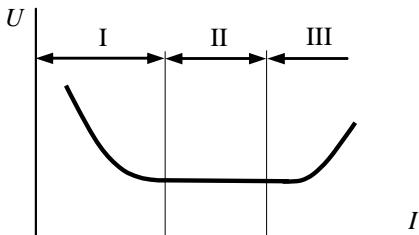
Lanko sužadinimo procesas trunka sekundės dalis.

Įtampa lankui sužadinti priklauso nuo srovės rūšies (nuolatinė ar kintamoji), elektrodo ir suvirinamuųjų medžiagų, elektrodo glaisto ir kt.

Stabilus lanko degimas priklauso nuo jo srovės stiprio ir įtampos tarpusavio priklausomybės. Ši priklausomybė vadinama lanko statine voltamperine charakteristika (4.3 pav.).

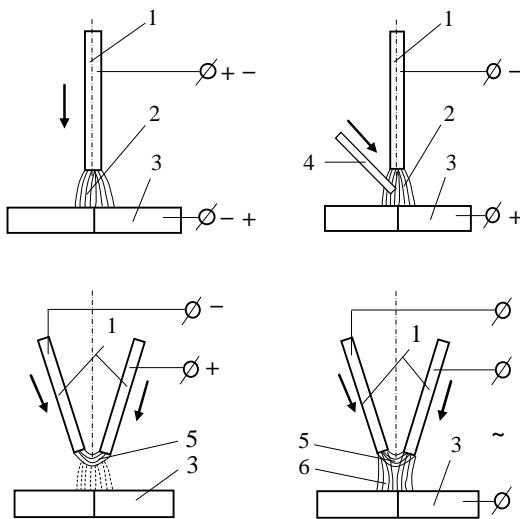
Charakteristiką galima suskirstyti į 3 zonas:

- I – *Krintančioji charakteristika.* Elektros lankas nėra pakankamai stabilus, todėl taikomas ribotai.
- II – *Kietoji charakteristika.* Įtampa beveik nepriklauso nuo srovės. Šios charakteristikos lankas tinka suvirinti rankiniu lankiniu būdu, automatais po fliusu ir apsauginėse dujose nelydžiuoju elektrodu.
- III – *Kylančioji charakteristika.* Elektros lankas pritaikytas lankiniams suvirinimui lydžiuoju elektrodu apsauginėse dujose, taip pat automatiškai suvirinti po fliusu.



4.3 pav. Statinė voltamperinė suvirinimo lanko charakteristika:
I – krintančioji; II – kietoji;
III – kylančioji

Pagal darbo principą lankas yra *tiesioginio, netiesioginio* ir *kombiniuoto* veikimo.



4.4 pav. Suvirinimo lankas: a – tiesioginis (svirinama lydžiuoju elektrodu); b – tiesioginis (svirinama nelydžiuoju elektrodu); c – netiesioginis; d – mišrusis; 1 – elektrodas; 2, 5, 6 – elektros lankas; 3 – suvirinamas ruošinys; 4 – pridėtinis metalas

Tiesioginis lankas 2 dega tarp elektrodo 1 (lydžiojo arba nelydžiojo) ir ruošinio 3 (4.4 pav., a). Suvirinant nelydžiuoju elektrodu, ruošiniai sujungiami išlydžius ruošinio metalą 3 ir pridėtinį metalą 4 (4.4 pav., b).

Netiesioginis lankas 5 dega tarp dviejų, dažniausiai nelydžiuų, elektrodų 1, kai ruošinys 3 iškaista ir lydosi veikiant elektros lanko stulpą silumai (4.4 pav., c).

Trifazis lankas 5–6 (vartojama trifazė srovė) dega tarp elektrodo 1 ir tarp kiekvieno elektrodo ir ruošinio 3 (4.4 pav., d).

4.2.2. Suvirinimo lanko maitinimo šaltiniai

Maitinimo šaltiniams keliami reikalavimai. Suvirinant rankiniu būdu, trumpai prilietus elektrodą prie ruošinio (lankui uždegti) arba elektrodo metalui susilietus su ruošinio metalu (suvirinimo metu), lanko įtampa krinta iki nulio. Po to lankas vėl užsidega, trumpėja ir t. t. Vykdant suvirinimo grandinėje trumppiesiems jungimams, susidaro didelio stiprio srovės (trumpojo jungimo srovės), dėl ko gali perdegti srovės šaltinio laida ir apvijos. Stabiliam suvirinimo procesui gauti lanko maitinimo šaltiniai turi atitikti šiuos reikalavimus:

1. Tuščiosios eigos įtampa turi būti pakankama lankui sužadinti, tačiau ne didesnė už leistinąjį saugiam darbui užtikrinti, t. y. kintamosios srovės šaltiniams tuščiosios eigos įtampa turi būti ne didesnė kaip 80 V, nuolatinės srovės šaltiniams – iki 110 V.
2. Geros dinaminės savybės. Kuo greičiau atsikuria įtampa po trumpojo jungimo, tuo geresnės srovės šaltinio dinaminės savybės (ivykus trumpajam jungimui, įtampa nuo 0 iki 30 V turi atskurti greičiau kaip per 0,05 s).
3. Trumpojo jungimo srovė turi būti didesnė už suvirinimo srovę 1,25–2 kartus.
4. Galimių reguliuoti suvirinimo srovę reikiamose ribose. Tuomet galima naudoti skirtingo skersmens elektrodus ruošiniams suvirinti.
5. Srovės šaltinis turi būti pakankamos galios suvirinimo darbams atlikti.

Maitinimo šaltinio išorinės charakteristikos. Išorine (voltamperine) charakteristika vadinama maitinimo šaltinio išėjimo gnybtų įtampos ir srovės grandinėje tarpusavio priklausomybė. Dažniausiai naudojami šaltiniai, kurių išorinė charakteristika yra krintančioji 1, nuožulniai krintančioji 2, mažo nuolydžio 3 ir kylančioji 4 (4.5 pav.). Jos parenkamos pagal suvirinimo būdą.

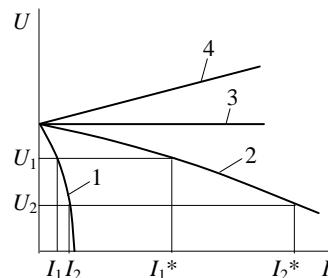
Srovės šaltiniai su krintančiomis išorinėmis charakteristikomis dažniausiai naudojami suvirinti rankiniu būdu, nes įtampos svyravimai dėl suvirintojo kaltės, suvirinamujų ruošinių paviršiaus nelygumų ir kt. nesukelia esminią suvirinimo srovės pakitimą, t. y. lankui sutrumpėjus (lanko įtampa U_1 sumažėjus iki U_2), srovė padidėja labai mažai (nuo I_1 iki I_2) ir suvirinimo režimas iš esmės nesikeičia.

Nuožulniai krintančiosios charakteristikos šaltinis dažniausiai naudojamas virinti automatais ir pusautomačiais po fliusus, kai nereikia rankomis reguliuoti lanko ilgio. Truputį pakitus įtampai (nukritus iki U_2), padidėja srovė (iki I_2^*), elektrodinė viela lydosi greičiau ir lanko ilgis atkuriamas. Jei įtampa padidėja per daug, suvirinimo srovė gerokai sumažėja ir viela lydosi lėčiau. Lankas atsikuria savaimė.

Mažo nuolydžio ir kylančiosios charakteristikos suvirinimo srovės šaltiniai naudojami virinti lydzaisiais elektrodais apsauginėse dujose.

Visų maitinimo šaltinių pagrindinis parametras yra suvirinimo srovė.

Degant elektros lankui, įtampa tarp elektrodo ir ruošinio yra 18–30 V. Tuščiosios eigos metu įtampa siekia 60–80 V.



4.5 pav. Suvirinimo šaltinių išorinės charakteristikos:

1 – krintančioji; 2 – nuožulniai krintančioji; 3 – mažo nuolydžio; 4 – kylančioji

Suvirinimo lankui maitinti naudojami šaltiniai:

1. Kintamosios srovės (suvirinimo transformatoriai).

2. Nuolatinės srovės (suvirinimo keitikliai, lygintuvai ir kt.).

Kintamosios srovės suvirinimo šaltiniai. Suvirinimo transformatoriai naudojami 380 V tinklo įtampai pažeminti iki suvirinimo lankui reikalingos įtampos, reikiama išorinei charakteristikai gauti ir suvirinimo srovei reguliuoti. Kintamosios srovės šaltiniai yra paprastos konstrukcijos ir ekonomiškesni už nuolatinės srovės šaltinius. Jų ilgesnis tarnavimo laikas, didelis naudingumo koeficientas (η iki 0,85). Tačiau, suvirinant silpna srove glaistytaisiais elektrodais ar po flusu, nestabiliai dega lankas (kas 0,01 s srovė ir įtampa lygi nuliui, todėl nutruksta lanko tarpo ionizacija).

Nuolatinės srovės suvirinimo šaltiniai. Kai kurie metalai, jų lydiniai (spalvotieji metalai, nerūdijantysis plienas ir kt.) ir plonaseniai ruošiniai suvirinami nuolatine srove. Technologiniai privalumai – stabilesnis lanko degimas, geresnės suvirinimo sąlygos įvairiose erdvinėse padėtyse, galima suvirinti tiesioginio arba priešingo poliarumo (aukštesnė elektrodo temperatūra) srove ir kt.

Suvirinimo keitiklių sudaro suvirinimo generatorius ir elektros arba vidaus degimo (benzininis, dyzelinis) variklis.

Suvirinimo lygintuvai kintamają srovę paverčia reikiamas išorinės charakteristikos nuolatine. Lygintuvai patikimi, pigūs, juose nėra sukamuų darbinių dalių, jų didelis naudingumo koeficientas, mažesnė energijos nuostoliai tuščiosios eigos metu. Lygintuvą sudaro trifazis įtampa žeminantis transformatoriaus, suvirinimo srovės regulatoriaus, seleno arba silicio ventilių blokas ir paleidimo bei apsauginė aparatura. Transformatoriaus išorinė charakteristika yra krintančioji. Keičiant atstumą tarp ričių (artinant apvijas vieną prie kitos), varža mažėja, o srovė stipréja, ir atvirkščiai. Taip tolygiai reguliuojama suvirinimo srovė. Transformatoriaus tuščiosios eigos įtampa šiek tiek priklauso nuo atstumo tarp ričių: ji sumažinus įtampa paaugštėja. Transformatorų aušina ventiliatorius.

Suvirinimas be suvirinimo aparato (4.6 pav.). Panaudojus specialius suvirinimo elektrodus, galima virinti, lituoti ir pjaustyti be papildomo energijos šaltinio visų rūšių plieną ir ketų, privirinti vario kontaktą prie plieninės plokštelynės ar strypo, virinti varį ir jo lydinius ir kt. Suvirinimo elektrodą sudaro specialaus termitinio mišinio (su flusais) pripildytas cilindrinis apvalkalas ir antgalis laikikliui išstatyti. Elektrodai uždegami kelių degtukų arba žiebtuvėlio liepsna per 4–5 s.

Plienui ir ketui virinti naudojamų elektrodų degančio mišinio temperatūra siekia 1700–1800 °C. Šiai elektrodai galima suvirinti 0,3–6 mm storio metalus.

Pjaustyti skirtų elektrodų degančio mišinio temperatūra siekia 2800 °C. Elektrodais galima pjaustyti 22–25 mm skersmens metalinius strypus ir 6–8 mm storio lakštus. Vidutiniškai pjovimo ilgis sudaro apie 50 % elektrodo ilgio.

Elektrodų trūkumas – jų negalima panaudoti dar kartą; reikia leisti jiems sudegti arba gesinti smėlyje (žemėje); draudžiama naudoti esant mechaniniams elektrodo pažeidimams; netinka aliuminiui ir plastikams virinti, ribotai – variui ir jo lydiniams.



4.6 pav. Suvirinimas elektrodu nenaudojant energijos šaltinio

4.2.3. Suvirinimo medžiagos

Elektrodinė viela. Siūlės metalas turi būti stiprus, plastiškas, ne prastesniu savybių už pagrindinį metalą. Virinama apsauginėse dujose ir jų mišiniuose įvairiose padėtyse, po fliusu ir kt.

Suvirinti ir aplydinti gaminama plieninė šaltai traukta apvalaus skerspjūvio viela:

- 0,3–3 mm skersmens viela suvirinama apsauginėse dujose ir jų mišiniuose (*MIG, MAG* suvirinimas);
- 1,6–6 mm skersmens viela naudojama elektrodų strypams gaminti (*MMAW*);
- 2–8 mm skersmens viela – apvirinti.

Vielos paviršius turi būti lygus, glotnus, švarus, neriebaluotas, be rūdžių.

Elektrodinės vielos cheminė sudėtis dažniausiai artima suvirinamojo plieno sudėčiai. Viela, naudojama kaip elektrodas ar kaip pridėtinis metalas suvirinant kitais būdais, turi turėti mažiau priemaišų. Nelegiruotoje vieloje leistinas sieros ir fosforo kiekis neviršija 0,03 %, kitaip suvirintoje siūlėje gali atsirasti plyšių. Kad plienas siūlės metale neužsigrūdintų ir būtų plastiškas, ribojamas anglies kiekis (0,03–0,15 % C). Tik apvirinimo elektroduose, kai norima gauti atsparą dilimui paviršių, anglies vieloje gali būti daugiau. Siūlės metalo stipri, atsparumą korozijai, oksidacijai ir kt. didina legiruojančių elementų suvirinant išdega.

Elektrodinės vielos žymėjimo pavyzdžiai duoti [4.2 lentelėje](#).

4.2 lentelė. Elektrodinės vielos, juostelių ir strypelių žymenos

Žymuo	Pavadinimas
<u>LST EN ISO 14341:2011</u>	<u>Nelegiruotojo ir smulkiagrūdžio plieno lankinio suvirinimo apsauginėse dujose elektrodinės vielos ir prilydomieji metalai</u>
ISO 14341-A – G 46 5 M21 3Si1	ISO 14341-A – tarptautinės standartizacijos organizacijos standartas, kai siūlės metalas klasifikuojamas pagal takumo stipri ir 47 J smūginio suardymo energiją;
ISO 14341-B – G 49A 6 M21 S3	ISO 14341-B – klasifikacija pagal tempimo stipri ir 27 J smūginio suardymo energiją; G – lankinis suvirinimas elektrodine viela apsauginėse dujose; A standartas; * – B standartas: 46; 49A* – siūlės metalo stiprio (takumo, tempimo) ir santykinio pailgėjimo žymuo 5 – siūlės metalo smūginio suardymo energijos žymuo (47 J, -50 °C temperatūroje); 6* – siūlės metalo smūginio suardymo energijos žymuo (27 J, -60 °C temperatūroje); M; M21* – apsauginių dujų rūšis; 3Si1; S3* – vielos cheminės sudėties žymuo
<u>LST EN ISO 14343:2010</u>	<u>Nerūdijančiojo ir kaitrai atsparaus plieno lydomojo suvirinimo elektrodinės vielos ir juostelės, vielos ir strypeliai</u>
ISO 14343-A – G 20 10 3 ISO 14343-A – S 20 10 3 ISO 14343-B – SS308Mo*	
ISO 14343-A – G 19 12 3 L Si ISO 14343-B – SS316LSi*	
ISO 14343-A – B 23 12 2 L ISO 14343-B – BS309LMo	

4.2 lentelės tēsinys

Žymuo	Pavadinimas
ISO 14341-A – W 20 10 3 ISO 14341-B – SS308Mo	
ISO 14343-A – siūlės metalas klasifikuojamas pagal vardinę sudėti; ISO 14343-B – klasifikacija pagal lydinio tipą; <u>A standartas:</u> G – lankinis suvirinimas elektrodine viela apsauginėse dujose; S – lankinis suvirinimas elektrodine viela po fliusu; B – lankinis suvirinimas elektrodine juosta po fliusu; W – lankinis suvirinimas volframo strypeliu apsauginėse dujose; 20 10 3; 19 12 3 L Si; 23 12 2 L – siūlės metalo cheminės sudėties žymuo (A standarto); <u>B standartas:</u> SS – nerūdijančiojo ir kaitrai atsparaus plieno elektrodinės vielos žymuo; BS – nerūdijančiojo ir kaitrai atsparaus plieno elektrodinės juostos žymuo; 308Mo; 316LSi; 309LMo – siūlės metalo cheminės sudėties žymuo	
<u>LST EN ISO 18273:2004</u> Vientisa viela ISO 18273 – S Al 4043 Vientisa viela ISO 18273 – S Al 4043 (AlSi5)	<u>Aliuminio ir aliuminio lydinių</u> suvirinimo elektrodinės vielos, vielos ir strypai
S – lankinis suvirinimas vientisa viela apsauginėse dujose; Al 4043 – suvirinamosios medžiagos cheminės sudėties skaitmeninis žymuo; AlSi5 – neprivalomas suvirinamosios medžiagos cheminio simbolio žymuo	
<u>LST EN ISO 24373:2009</u> Vientisa viela ISO 24373 – S Cu 6560 Vientisa viela ISO 24373 – S Cu 6560 (CuSi3Mn1)	<u>Vario ir vario lydinių</u> lydomojo suvirinimo vientisos vielos ir strypai
S – lydomasis suvirinimas vientisa viela apsauginėse dujose; Cu 6560 – suvirinamosios medžiagos cheminės sudėties skaitmeninis žymuo; CuSi3Mn1 – neprivalomas suvirinamosios medžiagos cheminio simbolio žymuo	
<u>LST EN ISO 18274:2011</u> ISO 18274 – S Ni 6625 ISO 18274 – S Ni 6601 (NiCr22Mo9Nb) ISO 18274 – B Ni 6625 ISO 18274 – B Ni 6625 (NiCr22Mo9Nb)	<u>Nikelio ir nikelio lydinių</u> lydomojo suvirinimo ištisiniai vieliniai ir juostiniai elektrodai, ištisinės vielos ir ištisiniai strypai
S – lankinis suvirinimas vientisa viela apsauginėse dujose; B – lankinis suvirinimas juostiniu elektrodu po fliusu; Ni 6601; Ni 6625 – suvirinamosios medžiagos cheminės sudėties skaitmeninis žymuo; NiCr23Fe15Al; NiCr22Mo9Nb – neprivalomas cheminio simbolio žymuo	
<u>LST EN ISO 24034:2011</u> Vientisa viela ISO 24034 – S Ti 6402 Vientisa viela ISO 24034 – S Ti 6402 (TiAl6V4B)	<u>Titano ir titano lydinių</u> lydomojo suvirinimo vientisos vielos elektrodai, vientisos vielos ir strypeliai
S – lydomasis suvirinimas vientisos vielos elektrodu;	
Ti 6400 – suvirinamosios medžiagos cheminės sudėties skaitmeninis žymuo; (TiAl6V4) – neprivalomas cheminės sudėties žymuo	

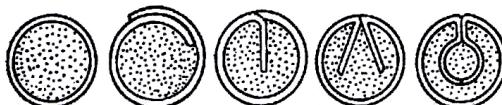
4.2 lentelės tēsinys

Žymuo	Pavadinimas
<u>LST EN ISO 1071:2004</u>	Lydomojo <u>ketaus liejinių suvirinimo</u> glaistytieji elektrodai, vielos, strypai ir miltelinės elektrodinės vielos
Elektrodinė viela ISO 1071 – S C NiFe-2	S – lankinis suvirinimas elektrodine viela apsauginėse dujose; C – lydinio tipas (ketui virinti); NiFe-2 – elektrodinės vielos cheminės sudėties žymuo
<u>LST EN ISO 14171:2011</u>	<u>Nelegiruotojo ir smulkiagrūdžio plieno</u> lankinio suvirinimo <u>po fliusu</u> vientisos ir miltelinės vielos elektrodai, elektrodo ir fliuso deriniai
ISO 14171-A – S2Mo ISO 14171-B – SU2M3	ISO 14171-A – tarptautinės standartizacijos organizacijos standartas, kai siūlės metalas klasifikuojamas pagal takumo stiprį ir 47 J smūginio suardymo energiją; ISO 14171-B – klasifikacija pagal tempimo stiprį ir 27 J smūginio suardymo energiją; S – lankinis suvirinimas elektrodine viela po fliusu; S2Mo; SU2M3* – vielos cheminės sudėties žymuo (* – B standartas)
<u>LST EN 14700:2005</u>	Kietinamojo apvirinimo medžiagos
Vientisa viela EN 14700 S Fe7	
Vientisa viela EN 14700 R Fe6	
S – lankinis suvirinimas vientisa viela po fliusu; R – lietas strypas; Fe7; Fe6 – kietinamojo apvirinimo medžiagos žymuo	

Miltelinė viela. Gamyboje plačiai taikoma miltelinė elektrodinė viela, kurią sudaro plieninis vamzdelis, pripildytas dujas ir šlaką sudarančių medžiagų, ferolydinių ir metalo miltelių (4.7 pav.). Miltelinės vielos skersmuo 0,8–4 mm.

Miltelių sudėtis parenkama tokia, kad sustinges skystasis lydinas atitinku siūlės metalui nustatytas savybes. Miltelinė viela naudojama įvairiems metalams suvirinti ir apvirinti (4.3 lentelė). Ja suvirinama po fliusu arba apsauginėse dujose (virinant milteline viela su rutiliniu užpildu, papildomai naudojama anglies dioksido apsauga). Dažniausiai suvirinamas mažaanglis ir mažai legiruotas konstrukcinis, armatūrinis plienas. Ketus, spalvotieji metalai ir ju lydiniai virinami rečiau.

Miltelinė viela nuo oro poveikio apsaugo išlydytą metalą, tačiau į siūlės metalą patenka azoto. Tai priklauso nuo užpildo kiekio, tipo ir virinimo režimo. Užpildas lydos lėčiau negu apvalkalėlis, todėl neįsilydžiusios dalelės patenka į vonelę ir ją užteršia nemetaliniais intarpais. Kad užpildas lydytusi greičiau, reikia naudoti miltelinę vielą su didesniu geležies miltelių kiekiu.



4.7 pav. Miltelinės vielos vamzdelių formos

4.3 lentelė.

Miltelinės vielos žymenys

Žymuo	Pavadinimas
<u>LST EN ISO 17632:2004</u>	
ISO 17632-A – T46 3 1Ni B M 1 H5*¹	<u>Nelegiruotojo ir smulkiagrūdžio plieno lankinio suvirinimo apsauginėse dujose</u> ir be jų elektrodinės miltelinės vielos
ISO 17632-B – T554T5-1MA-N2-UH5*²	
ISO 17632-A – T3T Z R C 3 H10*³	
ISO 17632-B – T49T2-0CS-H10*⁴	
ISO 17632-A – standartas, kai siūlės metalas klasifikuojamas pagal takumo stipri į 47 J smūginio suardymo energiją;	
ISO 17632-B – klasifikacija pagal tempimo stipri į 27 J smūginio suardymo energiją; T – lankinės suvirinimų milteline viela apsauginėse dujose;	
<u>A standartas:</u>	
46* ¹ ; 3T* ³ – siūlės metalo stiprio (takumo, tempimo) ir santiokinio pailgėjimo žymuo;	
3* ¹ – siūlės metalo smūginio suardymo energijos žymuo (47 J, -30 °C temperatūroje);	
Z* ³ – smūginio suardymo energijos vertei nėra reikalavimo;	
1Ni* ¹ – siūlės metalo cheminės sudėties simbolis;	
B* ¹ ; R* ³ – miltelinės vielos užpildo rūšis (B – bazinis; R – rutilinis);	
M* ¹ ; C* ³ – apsauginių dujų rūšis;	
1* ¹ ; 3* ³ – virinimo padėtis;	
H5* ¹ ; H10* ³ – vandenilio kiekis siūlės metale (ml/100 g)	
<u>B standartas:</u>	
55* ² ; 49* ⁴ – siūlės metalo stiprio (takumo, tempimo) ir santiokinio pailgėjimo žymuo;	
4* ² – siūlės metalo smūginio suardymo energijos žymuo (27 J, -40 °C temperatūroje);	
T5* ² , T2* ⁴ – taikomumas (apsauginės dujos; srovės rūšis, užpildo rūšis, kt.);	
1* ² ; 0* ⁴ – virinimo padėtis;	
M* ² ; C* ⁴ – apsauginių dujų rūšis;	
A* ² – nurodytos minimalios siūlės metalo savybės po suvirinimo;	
S* ⁴ – vieno ėjimo technologija;	
N2* ² – siūlės metalo cheminės sudėties simbolis;	
U* ² – tenkinama 47 J smūginio suardymo energijos minimali vidutinė vertė nurodytoje temperatūroje	
<u>LST EN ISO 17633:2011</u>	<u>Nerūdijančiojo ir kaitrai atsparaus plieno lankinio suvirinimo apsauginėse dujose arba be jų elektrodių miltelinės vielos ir strypeliai su užpildu</u>
ISO 17633-A – T 19 12 3 L R M21 3	
ISO 17633-B – TS 316L-F M21 0	
<u>A standartas; * – B standartas:</u>	
T – lankinės suvirinimų milteline viela apsauginėse dujose;	
TS* – lankinės suvirinimų milteline nerūdijančiojo plieno viela apsauginėse dujose;	
19 12 3L; 316L* – siūlės metalo cheminės sudėties simbolis;	
R – miltelinės vielos užpildo rūšis (rutilinis);	
F* – miltelinės elektrodinės vielos žymuo (miltelinė viela su fliuso užpildu);	
M21* – apsauginių dujų rūšis;	
3; 0* – virinimo padėtis	

4.3 lentelės tēsinys

Žymuo	Pavadinimas
<u>LST EN ISO 18276:2006</u>	<u>Stipriojo plieno lankinio suvirinimo apsauginėse dujose arba be ju</u>
ISO 18276-A – T62 5 Mn1,5Ni B M 1 H5	<u>elektrodinės miltelinės vielos</u>
ISO 18276-B – T695T5-1MA-N3M1-UH5	
T – lankinis suvirinimas milteline elektrodine viela apsauginėse dujose; <u>A standartas:</u> 62 – siūlės metalo stiprio (takumo, tempimo) ir santykinio pailgėjimo žymuo; 5 – siūlės metalo smūginio suardymo energijos žymuo (47 J, -50 °C temperatūroje); Mn1,5Ni – siūlės metalo cheminės sudėties žymuo;	
B – miltelinės vielos užpildo rūšis (bazinis); M – apsauginių dujų rūšis; 1 – virinimo padėtis; H5 – vandenilio kiekis siūlės metale (5 ml/100 g).	
<u>B standartas:</u> 69 – siūlės metalo stiprio (takumo, tempimo) ir santykinio pailgėjimo žymuo; 5 – siūlės metalo smūginio suardymo energijos žymuo (27 J, -50 °C temperatūroje); T5 – taikomumas (apsauginės dujos; srovės rūšis, užpildo rūšis, virinimo padėtys, kt.); 1 – virinimo padėtis; A – minimalios siūlės metalo savybės po suvirinimo; N3M1 – siūlės metalo cheminės sudėties žymuo; U – minimali vidutinė 47 J smūginio suardymo energijos vertė bandymo temperatūroje	
<u>LST EN 1071:2004</u>	<u>Lydomojo ketaus liejinį suvirinimo glaistytieji elektrodai, vielos, strypai ir miltelinės elektrodinės vielos</u>
Miltelinė elektrodinė viela ISO 1071 – T C NiFe-1 M	
T – lankinis suvirinimas milteline viela apsauginėse dujose; C – lydinio tipas (ketui virinti); NiFe-1 – siūlės metalo cheminės sudėties žymuo; M – apsauginių dujų rūšis	
<u>LST EN 14700:2005</u>	Kietinamojo apvirinimo medžiagos
Miltelinė viela EN 14700 T Fe9	
T – miltelinė viela su fliuso užpildu; Fe9 – kietinamojo apvirinimo medžiagos žymuo	
<u>LST EN ISO 14171:2011</u>	<u>Nelegiruotojo ir smulkiagrūdžio plieno lankinio suvirinimo po fliusu vientisos ir miltelinės vielos elektrodai, elektrodo ir fliuso deriniai</u>
ISO 14171-A – S 42 2 AB T3Mo ISO 14171-B – S49A2U AB SU41	
S – lankinis suvirinimas miltelinės vielos elektrodu po fliusu; AB – fliuso rūšies žymuo; <u>A standartas:</u> * – <u>B standartas:</u> 42; 49A* – stipruminių savybių žymuo; 2; 2U* – smūginio suardymo energijos žymuo; T3Mo; SU41* – siūlės metalo cheminės sudėties žymuo	

Elektrodai ir jų glaistai. Gaminama labai daug įvairios paskirties elektrodų. Pasirinkti tinkamiausią savybių elektrodą nėra lengva, nes reikia įvertinti suvirinamosios medžiagos ir elektrodo cheminę sudėtį, siūlės metalo mechanines savybes, suvirinimo būdą, suvirintojo gaminio eksplotavimo sąlygas, elektrodot kainą ir kt.

Rankinio lankinio suvirinimo ir apvirinimo elektrodai klasifikuojami pagal paskirtį (plienui, ketui, aliuminiui ir kt. suvirinti), glaisto rūšį, siūlės metalo fizikines, chemines, mechanines savybes ir kt.

Suvirinama lydžiaisiais ir nelydžiaisiais elektrodais.

- **Nelydieji elektrodai** naudojami tik lankui sužadinti ir jo degimui palaikyti. Gaminami iš volframo, volframo su torio, lantano, cerio, cirkonio, itrio ir kt. oksido priemaišomis (iki 2,2 %), elektrotechninės anglies ir sintetinio grafito.

Dažniausiai naudojami volframo elektrodai (gryno volframo ar volframo su sunkiai lydžiomis priemaišomis), pvz.:

WP (99,8 % W, kt. priemaiš $\leq 0,2\%$. Elektrodo galas žalias spalvos);

WL20 (1,9–2,1 % La_2O_3 , kt. priemaiš $\leq 0,2\%$, likęs W, %; elektrodo galas mėlynas);

WT20 (1,7–2,2 % ThO_2 , kt. priemaiš $\leq 0,2\%$, likęs W, %. Elektrodo galas raudonas);

WC20 (1,8–2,2 % CeO_2 , kt. priemaiš $\leq 0,2\%$, likęs W, %. Elektrodo galas pilkas);

WZ8 (0,7–0,9 % ZrO_2 , priemaiš $\leq 0,2\%$, likęs W, %. Elektrodo galas Baltas).

Jų skersmuo (0,5–10 mm) priklauso nuo srovės stiprio.

Grafitiniai ir angliniai elektrodai nelabai laidūs šilumai. Jų skersmuo 4–18 mm. Grafitiniai elektrodai laidesni elektrai ir atsparesni karščiui nei angliniai.

Siūlės metalui sudaryti naudojamas pridėtinis strypas arba viela. Jų skersmuo parenkamas pagal suvirinamojo metalo storij ir virinimo būdą.

- **Lydieji elektrodai** – naudojami strypai su glaistu arba suvirinimo viela.

Pagal glaisto tipą lydieji elektrodai yra:

- * **Neglaistytieji elektrodai.** Suvirinant tokiais elektrodais, siūlė neapsaugota nuo oro poveikio ir greitai ataušta. Jos metale lieka deguonies ir azoto, nemetalinių priemaišų ir duju pūslelių, kurios nespėja iškilti. Todėl iš esmės negalima gauti kokybiškos siūlės.

- * **Glaistytieji elektrodai.** Tai tam tikro ilgio (dažniausiai iki 450 mm) ir skersmens elektrodinės vielos strypai, padengti 0,1–3 mm glaisto sluoksniu.

Elektrodų glaistas gali būti plonas (stabilizuojantis arba jonizuojantis) ir storas.

- **Plonas glaistas** ($D/d \leq 1,2$ mm, čia D – elektrodo su glaistu skersmuo; d – strypo skersmuo) skirtas lanko stabilumui padidinti. Šis glaistas sudarytas iš kreidos ($CaCO_3$) ir skystojo kalio arba natrio stiklo (dažniausiai naudojamas natrio silikatas [$Na_2(SiO_2)_{ml}$]). Kreidoje esantys kalcio jonai lengvai išgaruoja lanko plazmoje ir lankas dega stabiliu. Tačiau plonas glaistas neapsaugo išsilydžiusio metalo siūlės, dėl to suvirinant jis oksiduoja ir nitruoja, išdega anglis, manganas, silicis. Siūlė yra trapi, porėta, su įvairiais nemetaliniais intarpais. Plonai glaistytisiais elektrodais suvirinamos tik nesvarbios siūlės.
- **Storai glaistytoju elektrodu** ($D/d \geq 1,5$) gaunama aukštos kokybės suvirintoji jungtis.

Nuo glaisto savybių priklauso prilydyto (siūlės) metalo stipris, santykinis pailgėjimas, smūginio suardymo energija, cheminė sudėtis, vandenilio kiekis, srovės rūšis, prilydymo koeficientas, virinimo padėtys. Keičiant glaisto medžiagas ir jų kiekį, galima gauti didelę elektrodo glaistų įvairovę.

Glaisto sudėtyje yra *lanko degimą stabilizuojančiuų* (kreida, natrio ir kalio silikatai, potašas, marmuras, maži geležies oksido kiekiai), *jomizuojančiuų* (titano dioksidas), *dujinančiu* (celiuliozė, krakmolas, kreida, magnezitas), *šlaką sudarančiuų* (mangano rūda, marmuras, rutilas, lauko špatas), *deoksiduojančiuų* (feromanganas, ferosilicis), *legiruojančiuų* (ferochromas, feromolibdenas, ferotitanas ir kt.) ir *glaisto medžiagas rišančiuų* komponentų. Rišiklis sujungia miltelinius komponentus į glaisto masę, o išdžiovinus ir pakaitinus, elektrodų glaistas tampa pakankamai tvirtas.

Legiravimo elementų (*Ni*, *Cr*, *Mo* ir kt.) patekimas iš glaisto į siūlės metalą priklauso nuo oksiduojančiosios šlako gebos. Metalurgines šlako rūšių savybes lemia jų klampis, dujų pralaidumas, kristalizacijos temperatūra ir greitis. Kai šlakas labai klampus, metale ištirpusios dujos sunkiai pašalinamos iš suvirinimo vonelės. Siūlės metalą gerai formuoja tik greitai metalo paviršiuje stingstantis šlakas.

Vandenilis siūlės metale atsiranda iš suvirinimo medžiagų, kuriose yra vandenilio ir gali būti įtrūkių ir kitų defektų susidarymo suvirintojoje jungtyje priežastis. Pagrindinis vandenilio šaltinis virinant glaistytaisiais elektrodais yra glaisto drėgmė (leistinas drėgmės kiekis yra 0,4–0,7 %), todėl būtina laikytis elektrodų gamintojų rekomendacijų dėl elektrodų laikymo, džiovinimo ir gabemimo sąlygų.

Suvirinama rūgštinių (*A*), bazinių (*B*), celiuliozinio (*C*), rutilinio (*R*), rutilinio rūgštinių (*RA*), rutilinio bazinių (*RB*), rutilinio celiuliozinio (*RC*) ir rutilinio storo (*RR*) glaisto elektrodais:

A – rūgštinius glaistas. Jį sudaro silicis, manganas ir geležies oksidai. Prilydyto metalo negalima daug legiruoti, nes legiravimo priedai greitai išdega. Elektrodai su šiuo glaistu naudojami angliniam ir mažai legiruotam plienui virinti. Rūgštinius glaistas išskiria nuodingų mangano junginių.

B – bazinius glaistas. Jį sudaro kalcio ir magnio karbonatai, kalcio fluoridas, feromanganas, ferosilicis, ferotitanas. Šlakuose daugiausia yra kalcio fluorido, kalcio oksido, kurie redukuoja vonelės lydalą, nes iš jų patenka daug legiravimo elementų. Virinant žemoje temperatūroje, siūlės metalas būna švarus, susidaro mažiau įtrūkių, prilydytame metale vandenilio kiekis neviršija leistinos ribos (15 ml/100 g). Bazinio glaisto elektrodais galima virinti priešingojo poliarumo nuolatine srove visose padėtyse, išskyrus stačiąją, kai virinama iš viršaus į apačią.

C – celiuliozinis glaistas. Degant lankui, dujinančios medžiagos saugo išsilydžiusi metalą nuo oro poveikio, sulaiko šlaką virinant stačiojoje padėtyje.

R – rutilinis glaistas. Jį sudaro rutilas (titano dioksidas), silicio dioksidas, kalio ir kalcio karbonatai, feromanganas. Rutiliniu glaistu glaistytais elektrodais virinama kintamaja ir nuolatine srove visose padėtyse, išskyrus stačiąją, kai virinama iš viršaus į apačią. Virinimo lankas dega tolygiai, ataušęs šlakas gerai atsiskiria.

RA – rutilinis rūgštinius glaistas. Rutilo tame yra daugiau nei geležies oksido. Elektrodai tinkamai virinti visose padėtyse, išskyrus stačiąją, kai virinama iš viršaus į apačią.

RB – rutilinis bazinis glaistas pasižymi geromis mechaninėmis savybėmis. Šiuo glaistu glaistytais elektrodais virinama visose padėtyse, išskyrus stačiąją, kai virinama iš viršaus į apačią.

RC – rutilinis celiuliozinis glaistas. Jame daugiau celiuliozės, todėl tinkamai virinti stačiojoje padėtyje iš viršaus į apačią.

Elektrodų glaisto rūšies parinkimas priklauso nuo suvirinamosios medžiagos.

Elektrodų žymėjimo pavyzdžiai duoti [4.4 lentelėje](#). Siekiant palengvinti elektrodo žymenų standarto taikymą, žymenys skirstomi į privalomają (nurodomi elektrodo tipo, cheminės sudėties ir glaisto simboliai) ir neprivalomąją dalis.

4.4 lentelė. Glaistytųjų elektrodų žymenys

Žymuo	Pavadinimas
<u>LST EN ISO 2560:2010</u>	
ISO 2560-A – E – 46 3 1Ni B 5 4 H5	Rankinio lankinio suvirinimo glaistytieji elektrodai <u>nelegiruotajam ir smulkiagrūdžiam plienui</u> suvirinti
ISO 2560-B – E5518-N2 A U H5	
<u>ISO 2560-A standartas:</u>	
E – rankinis lankinis suvirinimas glaistytuoju elektrodu (glaistyojo elektrodo žymuo);	
46 – siūlės metalo stiprio (takumo, tempimo) ir santykinio pailgėjimo žymuo;	
3 – minimali Šarpio smūginio suardymo energijos vertė (47 J, -30 °C temperatūroje);	
1Ni – siūlės metalo cheminės sudėties žymuo;	
B – elektrodo glaisto rūšis (B – bazinis glaistas);	
5 – vardinis elektrodo lydymo našumas, % ($125 < \eta \leq 160$, kai žymens simbolis 5) ir srovės rūšies žymuo (a. c. ir d. c. – kintamoji ir nuolatinė srovė);	
4 – virinimo padėties žymuo (4 – žemutinė sandūrinė siūlė, žemutinė kampinė siūlė);	
H5 – vandenilio kiekis siūlės metale (5 ml/100g).	
<u>ISO 2560-B standartas:</u>	
55 – siūlės metalo tempimo stiprio žymuo;	
18 – glaisto rūšies, suvirinimo srovės ir padėties žymuo;	
N2 – siūlės metalo cheminės sudėties žymuo;	
A – minimalios siūlės metalo savybės po suvirinimo;	
U – minimali smūginio suardymo energijos vertė 47 J bandymo temperatūroje	
<u>LST EN ISO 3581:2012</u>	
ISO 3581-A – E 19 12 2 R 3 4	Rankinio lankinio suvirinimo glaistytieji elektrodai <u>nerūdijančiam ir karščiu atspariam plienui</u> suvirinti
ISO 3581-B – ES316-26	
<u>ISO 14343-A standartas</u> – klasifikacija pagal vardinę sudėtį:	
E – glaistyojo elektrodo žymuo;	
19 12 2 – siūlės metalo cheminės sudėties žymuo;	
R – elektrodo glaisto rūšis (R – rutilinis glaistas);	
3 – vardinis elektrodo lydymo našumas, % ($105 < \eta \leq 125$, kai žymens simbolis 3) ir srovės rūšies žymuo (a. c. ir d. c. – kintamoji ir nuolatinė srovė);	
4 – virinimo padėties žymuo.	
<u>ISO 14343-B standartas</u> – klasifikacija pagal lydinio tipą:	
ES – nerūdijančiojo ir karščiu atsparaus plieno glaistyojo elektrodo žymuo;	
316 – siūlės metalo cheminės sudėties žymuo;	
2 – virinimo padėties žymuo;	
6 – elektrodo glaisto rūšis	
<u>LST EN ISO 3580:2011</u>	<u>Valkšnumui atsparaus plieno</u> rankinio
ISO 3580-A – E CrMo1 B 4 4 H5	lankinio suvirinimo glaistytieji
ISO 3580-B – E 5518-1CM H5	elektrodai
ISO 3580-A – klasifikacija pagal cheminę sudėtį;	
ISO 3580-B – klasifikacija pagal tempimo stipri ir cheminę sudėtį;	

4.4 lentelės tēsinys

Žymuo	Pavadinimas
<u>LST EN ISO 18275:2012</u>	
ISO 18275-A – E 62 7 Mn1Ni B 3 4 H5	Glaistytieji elektrodai <u>stipriajam plienui</u> suvirinti rankiniu lankiniu būdu
ISO 18275-B – E 6918-N3M2 A H5	
ISO 18275-A – E 89 5 Z B 3 4 H5	
ISO 18275-B – E8318-G A H5	
<u>ISO 18275-A standartas</u> – siūlės metalas klasifikuojamas pagal takumo stiprį ir 47 J smūginio suardymo energiją; 89 – siūlės metalo stiprio (takumo, tempimo) ir santykinio pailgėjimo žymuo; 5 – siūlės metalo tempimo stiprio žymuo; Z – smūginio suardymo energijos vertė nenurodyta; B – elektrodo glaisto rūšies žymuo; 3 – vardinis elektrodo lydymo našumo ir srovės rūšies žymuo; 4 – virinimo padėties žymuo; H5 – vandenilio kiekis siūlės metale (5 ml/100g).	
<u>ISO 18275-B standartas</u> – klasifikacija pagal tempimo stiprį ir 27 J smūginio suardymo energiją; 83 – siūlės metalo tempimo stiprio žymuo; 18 – glaisto rūšies, suvirinimo srovės ir padėties žymuo; G – kitokia siūlės metalo cheminė sudėtis; A – minimalios siūlės metalo savybės po suvirinimo	
<u>LST EN ISO 14172:2009</u>	
Glaistytasis elektrodas ISO 14172 – E Ni 6182 (NiCr15Fe6Mn)	Nikelio ir nikelio lydinių rankinio lankinio suvirinimo glaistytieji elektrodai
Ni 6182 – siūlės metalo cheminės sudėties skaitmeninis žymuo; NiCr15Fe6Mn – neprivalomas glaistytotojo elektrodo cheminio simbolio žymuo	
<u>LST EN ISO 1071:2004</u>	
Glaistytasis elektrodas ISO 1071 – E C NiFe-1 3	Lydomojo <u>ketaus liejinių</u> suvirinimo glaistytieji elektrodai, vielos, strypai ir miltelinės elektrodinės vielos
E – rankinis lankinis suvirinimas glaistytuoju elektrodu; C – lydinio tipas (ketui virinti); NiFe-1 – siūlės metalo cheminės sudėties žymuo; 3 – vardinis elektrodo lydymo našumo ir srovės rūšies žymuo	
<u>LST EN 14700:2005</u>	
Glaistytasis elektrodas EN 14700 – E Fe9	Kietinamojo apvirinimo medžiagos
E – glaistytasis elektrodas; Fe9 – siūlės metalo cheminės sudėties žymuo	

Suvirinimo fliusai saugo suvirinimo zoną nuo oro poveikio ir naudojami siūlės metalui legiruoti reikalingais priedais. Suvirinimo metu tarp išsilydžiusio fliuso ir skystojo metalo vyksta sąveika (redukuojamai oksidai), todėl cheminė metalo sudėtis ir mechaninės savybės labai priklauso nuo naudojamo fliuso cheminės sudėties.

Fliusas ant siūlės metalo sudaro šlako plutelepę, dėl to metalas lėčiau aušta, lengviau šalinamos dujos ir priemaišos, gaunama tanki, kokybiška siūlė. Šlako plutelepė lengvai atskiriama nuo siūlės metalo. Fliusas taip pat stabilizuoją lanko degimo procesą.

Fliuso dalelių dydis yra 2,5–0,1 mm ir mažiau.

Suvirinant spalvotuosius metalus (varį, aliuminij) nelydžiuoju elektrodu arba dujomis, fliusas sunkiai lydžius oksidus (jais padengtas metalo paviršius) paverčia lengvai lydžiu šlaku, kuris iškyla į vonelės paviršių ir apsaugo vonelę nuo oksidacijos.

Fliusai klasifikuojami (4.5 lentelė):

Pagal paskirtį (numeracija atitinka fliuso klasę):

1. Nelegiruotajam ir smulkiagrūdžiam, valkšnumui atspariam plienui ir stipriojo plieno rūšims suvirinti.
2. Nerūdijančiajam ir karščiui atspariam plienui, nikeliui ir nikelio lydiniam suvirinti (2B klasė – apvirinimas juostiniu elektrodu).
3. Kietinamasis apvirinimas.
4. Kitos medžiagos (vario ir kt. lydiniam suvirinti).

4.5 lentelė. Suvirinimo fliusai

Fliuso žymuo ISO 14174:2012	Cheminė sandara	Riba, %	Fliuso žymuo ISO 14174:2012	Cheminė sandara	Riba, %
MS Mangano silikato	$MnO+SiO_2$ CaO	≥ 50 ≤ 15	RS Rutilo silikato	TiO_2+SiO_2 TiO_2	≥ 50 ≥ 20
CS Kalcio silikato	$CaO+MgO+SiO_2$ $CaO+MgO$	≥ 55 ≤ 15	AR Aliuminio rutilo	$Al_2O_3+TiO_2$	≥ 40
CG Kalcio magnio	$CaO+MgO$ CO_2 Fe	$5-50$ ≥ 2 ≤ 10	BA Bazinis aluminio	$Al_2O_3+CaF_2+SiO_2$ CaO SiO_2	≥ 55 ≥ 8 ≤ 20
CB Kalcio magnio bazinis	$CaO+MgO$ CO_2 Fe	$30-80$ ≥ 2 ≤ 10	AAS Rūgštinis aluminio silikato	$Al_2O_3+SiO_2$ CaF_2+MgO	≥ 50 ≥ 20
CG-I Kalcio magnio su geležimi	$CaO+MgO$ CO_2 Fe	$5-45$ ≥ 2 $15-60$	AB Aliuminio bazinis	$Al_2O_3+CaO+MgO$ Al_2O_3 CaF_2	≥ 40 ≥ 20 ≤ 22
CB-I Kalcio magnio bazinis su geležimi	$CaO+MgO$ CO_2 Fe	$10-70$ ≥ 2 $15-60$	AS Aliuminio silikato	$Al_2O_3+SiO_2+ZrO_2$ CaF_2+MgO ZrO_2	≥ 40 ≥ 30 ≥ 5
GS Magnio silikato	$MgO+SiO_2$ Al_2O_3 $CaO+CaF_2$	≥ 42 ≤ 20 ≤ 14	AF Aliuminio fluorido	$Al_2O_3+CaF_2$	≥ 70
ZS Cirkonio silikato	ZrO_2+SiO_2+MnO ZrO_2	≥ 45 ≤ 15	FB Fluorido bazinis	$CaO+MgO +$ $+ CaF_2+MnO$ SiO_2 CaF_2	≥ 50 ≤ 20 ≥ 15
Z – kitokio tipo					

4.6 lentelė. Suvirinimo fliusų žymenys (LST EN ISO 14174:2012)

Žymuo	Pavadinimas
ISO 14174 – S F CS 1 67 AC H10 ISO 14174 – S F CS 1 (privalomi žymenys) S – lankinio suvirinimo fliusas; F – fliuso gamybos būdas (lydytasis); CS – fliuso rūšis (CaO , MgO , SiO_2); 1 – fliuso klasės numeris pagal paskirtį (nelegiruotajam ir smulkiaigrūdžiam, valkšnumui atspariam plienui ir stipriajam plienui suvirinti); 67 – metalurginis poveikis (padidėjęs Si ir Mn kiekis siūlės metale, %); AC – srovės rūšies žymuo (a. c. – kintamoji srovė); H10 – vandenilio kiekis siūlės metale (10 ml/100g)	
ISO 14174 – S A AF 2 56 44 DC ISO 14174 – S A AF 2 (privalomi žymenys) A – aglomeruotasis fliusas; AF – fliuso rūšis (Al_2O_3 , CaF_2); 2 – fliuso klasės numeris pagal paskirtį; 56 – metalurginis poveikis (padidėjęs C ir Si kiekis siūlės metale, %); 44 – metalurginis poveikis (išdegęs Cr ir Nb kiekis, %); DC – srovės rūšies žymuo (d. c. – nuolatinė srovė)	Lankinio suvirinimo po fliusu ir elektrošlakinio suvirinimo fliusai
ISO 14174 – ES A AF 2B 56 54 DC ISO 14174 – ES A AF 2B (privalomi žymenys) ES – elektrošlakinio suvirinimo fliusas; 2B – fliuso klasės numeris pagal paskirtį (apvirinimas juostiniu elektrodu)	
ISO 14174 – S A ZS 3 C3 Cr20 DC ISO 14174 – S A ZS 3 (privalomi žymenys) ZS – fliuso rūšis (ZrO_2 , SiO_2); 3 – fliuso klasės numeris pagal paskirtį; C3 – padidėjęs anglies kiekis 3 %; Cr20 – padidėjęs chromo kiekis 20 %; DC – nuolatinė srovė (d. c.)	

Pagal gamybos būda:

- Lydytieji (F) – gaunamas sulydžius komponentus (SiO_2 , MnO , CaF_2 , CaO , MgO , Al_2O_3 , ZnO_2 ir kt.) elektrinėse arba liepsninėse krosnyse. Išlydytas ir tekančiu vandeniu atšaldytas fliusas sutrūkinėja į smulkias daleles. Po to jis džiovinamas 300–350 °C temperatūroje ir sijojamas sietais. Suvirinat po lydytuoju fliusu, siūlės metalo sudėties priklauso nuo pridėtinio metalo sudėties ir tik šiek tiek nuo fliuso.
- Aglomeruotieji (A) – komponentai (ivairūs oksidai, ferolydiniai, metalų milteliai) smulkiai sumalami ir sumaišomi su skystuoju stiklu. Gauta masė granuliujama, gautos dalelės iškaitinamos. Naudojant aglomeruotąjį fliusą, siūlės metalas legiruojamas fliuso elementais.

- Mišiniai (*M*) – gaunami sumaišius fliusus po lydymo arba aglomeravimo su vienu ar keliais priedais ar fliusais.

Pagal rūšį (4.5 lentelė). Fliusų savybės aprašytos standarte **LST EN ISO 14174**.
Fliusų žymėjimo pavyzdžiai duoti [4.6 lentelėje](#).

Apsauginės dujos ir jų mišiniai. Lydomo metalo vonelei apsaugoti nuo oro poveikio ir neleisti jam oksiduotis naudojamos:

Inertinės dujos (argonas, helis) chemiškai nereaguoja su išlydytu metalu ir nesudaro su juo junginių.

- Argonas** nedega ir nespogsta. Tai bespalvės, bekvapės, nenuodingos ir 1,38 karto sunkesnės už orą dujos. Jose turi būti ne daugiau kaip $0,04 \text{ g/m}^3$ drėgmės.
 - ◊ *Grynas argonas* (99,9–99,99 % Ar) naudojamas svarbioms siūlėms, labai legiruotam plienui, titanui, aliuminiui, magnui ir jų lydiniam suvirinti.
 - ◊ *Techninis argonas* (83,3 % Ar, iki 16 % N_2 , 0,4 % O_2 , 0,3 % CO_2) naudojamas mažiau svarbioms siūlėms ir variui suvirinti.
- Helis** lengvesnis už orą, sunkiau apsaugo vonelę nuo oro poveikio, todėl tenka jo sunaudoti daugiau. Šios brangios dujos daugiausia naudojamos specialiemis suvirinimo darbams. Helis yra labai grynas ir techninis.

Aktyviosios dujos (anglies dioksidas, azotas, vandenilis, deguonis) reaguoja su išlydytu metalu. Dažniausiai suvirinti naudojamas anglies dioksidas.

- Anglies dioksidas** (CO_2) yra aktyvus, todėl naudojamas virinti tik lydžiuoju elektrodu. Tai bespalvės, bekvapės, nenuodingos, 1,52 karto sunkesnės už orą, dujos. Anglies dioksidas yra maistinis, techninis ir suvirinimo.
- Azotas**, išskyrus variui virinti, beveik nenaudojamas, nes netirpsta išlydytame metale.
- Vandenilis** naudojamas kaip antioksidantas arba apsauginių duju priedas, gerinantis išvirkimą.

Duju mišiniai:

- argonas+ CO_2 ; argonas+ O_2 ; argonas+ CO_2+O_2 ; CO_2+O_2 ;
- suskystintas argonas ir azotas juodiesiems ir spalvotiesiems metalams suvirinti ir pjauti.

Pagal **EN ISO 14175** standartą suvirinti naudojamos dujos, atsižvelgiant į jų sudėti, komponentų rūšį ar reakcijas suvirinimo metu, skirstomos į pagrindines grupes:

- * **I** – inertinės dujos ar inertinių duju mišiniai;
- * **M1, M2 ir M3** – oksiduojančių duju mišiniai, kuriuose yra O_2 arba CO_2 duju kartu;
- * **C** – labai oksiduojančiosios dujos ir labai oksiduojančių duju mišiniai;
- * **R** – redukuojančių duju mišiniai;
- * **N** – mažai reaktyvios dujos arba redukuojančių duju mišiniai, kuriuose yra N_2 ;
- * **O** – deguonis;
- * **Z** – specialios sudėties duju mišiniai.

Lydomojo suvirinimo apsauginių duju klasifikavimas duotas [4.7 lentelėje](#), žymėjimo pavyzdžiai – [4.8 lentelėje](#).

4.7 lentelė. Lydomojo suvirinimo ir panašių procesų dujų ir jų mišinių klasifikavimas

Žymuo	Grupė Pogrūpis	Komponentas, %						Panaujojimas	Grynumas, %			
		Oksiduojantysis	Inertinis	Redukojuojantysis	Mažai reaktyvus	CO_2	O_2	Ar	He	H_2	N_2	
I	1	—	—	100	—	—	—	—	—	—	<i>MIG, MAG, plazminis</i>	99,99
	2	—	—	—	100	—	—	—	—	—		
	3	—	—	* 0,5–95	—	—	—	—	—	—		
M1	1	0,5–5	—	*	—	0,5–5	—	—	—	—	<i>MAG</i>	99,9
	2	0,5–5	—	*	—	—	—	—	—	—		
	3	—	0,5–3	*	—	—	—	—	—	—		
	4	0,5–5	0,5–3	*	—	—	—	—	—	—		
M2	0	5–15	—	*	—	—	—	—	—	—	<i>MAG</i>	99,9
	1	15–25	—	*	—	—	—	—	—	—		
	2	—	3–10	*	—	—	—	—	—	—		
	3	0,5–5	3–10	*	—	—	—	—	—	—		
	4	5–15	0,5–3	*	—	—	—	—	—	—		
	5	5–15	3–10	*	—	—	—	—	—	—		
	6	15–25	0,5–3	*	—	—	—	—	—	—		
M3	7	15–25	3–10	*	—	—	—	—	—	—	<i>TIG, plazminis</i>	99,9
	1	25–50	—	*	—	—	—	—	—	—		
	2	—	10–15	*	—	—	—	—	—	—		
	3	25–50	2–10	*	—	—	—	—	—	—		
	4	5–25	10–15	*	—	—	—	—	—	—		
C	5	25–50	10–15	*	—	—	—	—	—	—	<i>TIG, plazminis</i>	99,8
	1	100	—	—	—	—	—	—	—	—		
R	2	*	0,5–30	—	—	—	—	—	—	—	<i>TIG, plazminis</i>	99,95
	1	—	—	*	—	0,5–15	—	—	—	—		
N	2	—	—	*	—	15–50	—	—	—	—	<i>TIG, plazminis</i>	99,9
	1	—	—	—	—	—	—	100	—	—		
	2	—	—	*	—	—	—	—	0,5–5	—		
	3	—	—	*	—	—	—	—	5–50	—		
	4	—	—	*	—	—	0,5–10	—	0,5–5	—		
O	5	—	—	—	—	—	0,5–50	—	*	—		
Z	Specialiosios sudėties dujų mišiniai											
	* – kita dujų dalis											

Argono mišiniuose su deguonimi (2–5 % O_2) ar anglies dioksidu (10–20 % CO_2) metalas šiek tiek oksiduojasi, tačiau ištaškytojo metalo lašeliai neprisivirina prie pagrindinio metalo ir lengviau nuvalomi.

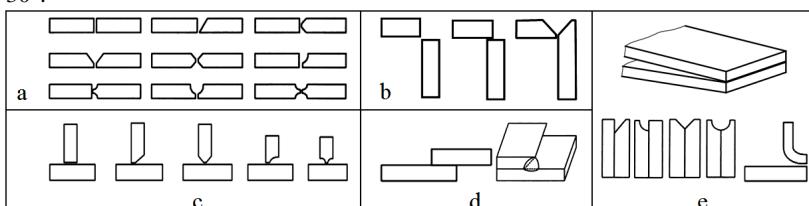
4.8 lentelė. Lydomojo suvirinimo apsauginių dujų ir jų mišinių žymenos

Žymenos LST EN ISO 14175:2008	
ISO 14175 – M25	ISO 14175 – M12
ISO 14175 – M25-ArCO-6/4	ISO 14175 – M12-HeArC-7,5/2,5
Dujų mišinys M25, kuriame yra 6 % CO_2 , 4 % O_2 , kita dujų mišinio dalis – Ar	Dujų mišinys M12, kuriame yra 7,5 % Ar , 2,5 % CO_2 , kita dujų mišinio dalis – He
ISO 14175 – I3	ISO 14175 – Z
ISO 14175 – I3-ArHe-30	ISO 14175 – Z-ArO-0,05
Dujų mišinys I3, kuriame yra 30 % He , kita dujų mišinio dalis – Ar	Specialiosios sudėties dujų mišinys Z, kuriame yra 0,05 % O_2 , kita dalis – Ar
ISO 14175 – R1	ISO 14175 – Z
ISO 14175 – R1-ArH-5	ISO 14175 – Z-Ar+Xe-0,05
Dujų mišinys R1, kuriame yra 5 % H_2 , kita dujų mišinio dalis – Ar	Specialiosios sudėties dujų mišinys Z, kuriame yra 0,05 % Xe , kita dalis – Ar

4.2.4. Suvirintosios jungtys ir siūlės

Suvirintoji jungtis yra kelių detalių neišardomas sujungimas. Konstrukcijose naudojamos pagrindinės suvirintosios jungtys (detaliau EN ISO 17659 ir EN ISO 9692):

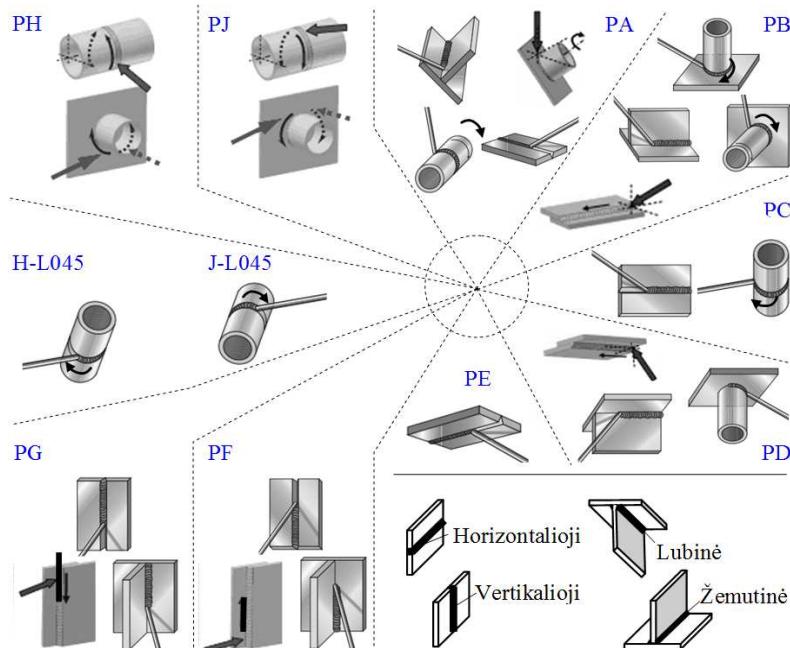
1. Sandūrinė (4.8 pav., a) – jungiamieji elementai yra vienoje plokštumoje. Pagal briaunų paruošimą elementai yra nenusklembti ir tiesiai arba kreivai, iš vienos arba abiejų pusių, simetriškai ir nesimetriškai nusklembtomis briaunomis. Tai priklauso nuo suvirinamojo metalo storio, konstrukcijos paskirties ir kt.
2. Kampinė (4.8 pav., b) – du jungiamieji elementai liečiasi briaunomis ir dažniausiai sudaro statų kampanę. Detalių briaunos (nenusklembtos arba nusklembtos) suvirinamos iš vienos arba abiejų pusių. Kampinės jungtys naudojamos rezervuarams, įvairiomis talpomis ir kt. suvirinti.
3. Téjinė (4.8 pav., c) – prie vieno elemento šoninio paviršiaus statmenai jungiamas kitas elementas ir privirinamas jos galas. Pagal briaunų paruošimą elementai yra be nuosklembų ir nusklembtomis briaunomis (iš vienos ar abiejų pusių).
4. Užleistinė (4.8 pav., d) – suvirinamos detalės išdėstyotos lygiagrečiai ir viena dengia dalį kitos. Briaunoms nuosklembos nedaromos. Sujungimai yra vienpusiai ir dvipusiai. Jie blogiau atlaiko kintamas ir dinamines apkrovos nei sandūriniai, sunkiau rasti jų defektus. Naudojami statybinėms konstrukcijoms suvirinti.
5. Briauninė (4.8 pav., e) – du elementai liečiasi briaunomis, kampas tarp jų yra iki 30°.



4.8 pav. Pagrindiniai suvirintųjų jungčių tipai ir jungčių briaunų paruošimas:
a – sandūrinė; b – kampinė; c – téjinė; d – užleistinė; e – briauninė

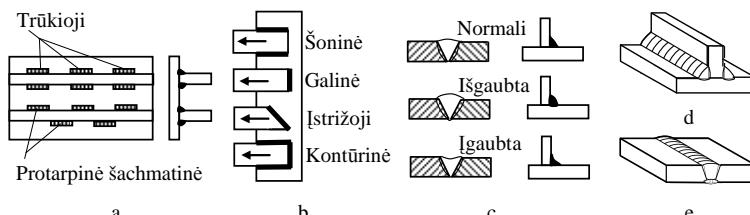
Suvirinimo siūlės klasifikuojamos

- Pagal padėtį erdvėje (4.9 pav.) – horizontaliosios, vertikaliosios, lubinės, žemutinės.



4.9 pav. Pagrindinės suvirinimo padėtys (EN ISO 6947:2011): *PA* – žemutinė; *PB* – horizontalioji žemutinė; *PC* – horizontalioji; *PD* – horizontalioji lubinė; *PE* – lubinė; *PF* (*PH*) – vertikalioji aukštynkryptė; *PG* (*PJ*) – vertikalioji žemynkryptė; *J-L045* – pasviroji žemynkryptė; *H-L045* – pasviroji aukštynkryptė (čia *L* – posvyrio kampas)

- Pagal vientisumą (4.10 pav., a) – ištisinės, trūkiosios.



4.10 pav. Suvirinimo siūlių klasifikavimas: *a* – pagal vientisumą; *b* – pagal padėti apkrovos atžvilgiu; *c* – pagal paviršiaus formą; *d, e* – pagal įlydymo gylį

- *Pagal padėti veikiančios jėgos atžvilgiu (4.10 pav., b)* – priekinės, šoninės, galinės, ištrižosios, kontūrinės.
- *Pagal paviršiaus formą (4.10 pav., c)* – normalios, išgaubtos (yra didesnio skerspjūvio, todėl vadinamos sustiprintosiomis), īgaubtos (mažesnė įtempių santalka jungties siūlėje).
- *Pagal įlydymo gylį* – dalinio įvirinimo (4.10 pav., d), visiškai įvirintos: vienpusės, vienpusės su šaknies pavirinimu (4.10 pav., e), abipusės.
- *Pagal virinimo kryptį* – išilginės, skersinės.
- *Pagal prilydomo metalo sluoksnų skaičių (4.16 pav.)* – vienasluoksnės (suformuotos vienu ėjimu), daugiasluoksnės (suformuotos keliais ėjimais).
- *Pagal suvirinimo būdą* – sandūrinės (naudojamos sandūriniam sujungimams), kampinės (naudojamos kampinėms, téjinėms, užleistinėms jungtims). Konstruojant virintines jungtis, reikėtų vengti kampinių siūlių, kurių statinio aukštis daugiau kaip 20 % viršija plonesnio iš jungiamųjų elementų storij.

Tinkamai padarytose *sandūrinėse jungtyse* yra labai nedidelė įtempių santalka. Jungties paruošimas turi nedidelį poveikį statiskai apkrautų jungčių laikomajai galiai. *Kampinės jungties* su *U* ar *J* nuosklemba paruošimas dėl mažesnio išlydyto metalo kiekiej leidžia labiau sumažinti suvirinimo deformacijas nei *V* ar pusinės *V* jungties paruošimas. Abipusis jungties paruošimas, siekiant sumažinti liekamasias deformacijas, yra pranašesnis nei vienpusis. *Užleistinėse jungtyse* nenaudojamas briaunų paruošimas. Palyginti su sandūrinėmis jungtimis, jose atsiranda daug didesnė įtempių santalka.

4.2.5. Metalurginiai suvirinimo procesai

Suvirinimo proceso ypatumai. Aukštoje temperatūroje metalas garuoja, taškosi, lanko zonoje esančios medžiagos išdega. Lydantis elektrodai ir suvirinamo ruošinio briaunoms, susidaro skysto metalo vonelė. Glaiste esančios medžiagos apsaugo elektrodinio metalo lašą ir suvirinimo vonelę nuo oro deguonies ir azoto poveikio, deoksiduoja vonelės metalą, legiruoja siūlēs metalą. Dalis deguonies, azoto ir vandenilio molekulių lanko zonoje skylla į atomus, kurie reaguoja su išlydytu metalu ir Jame ištirpsta, sudarydami trapų ataušusį metalą.

Dėl mažo metalo vonelės tūrio ir palyginti žemos suvirinamojo metalo temperatūros siūlė greitai stingsta, cheminės reakcijos tarp išsilydžiusio metalo ir šlako vyksta labai sparčiai ir nepasiekia pusiausvyros. Siūlės metalas greitai kietėja ir kristalizuoja, todėl pasikeičia jo cheminė sudėtis, struktūra ir mechaninės savybės (vonelei greitai auštant, netirpūs junginiai, turintys deguonies, azoto, vandenilio, sieros ir fosforo, kurie patenka iš oro arba iš suvirinamuų medžiagų, gali likti siūlėje ir sudaryti oksidus, nitridus, dujas, sulfidus, fosfidus ir kt.). Nuo metalo lydymosi pradžios iki jo sostingimo praeina kelios sekundės.

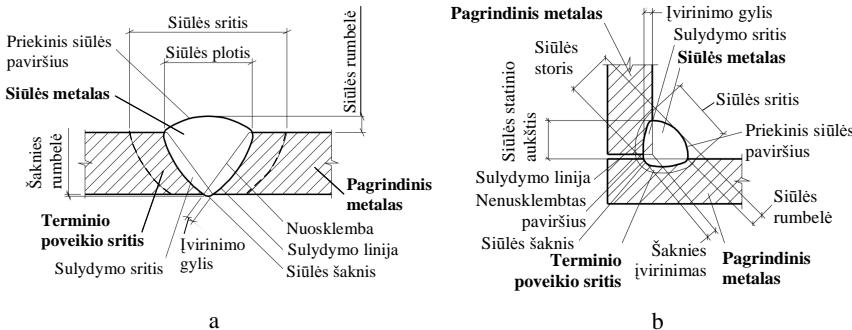
Kokybiškai suvirinimo siūlei gauti (apsaugoti nuo deguonies, azoto, vandenilio ir kt.), virš skysto metalo vonelės sudaroma dujinė aplinka ir šlako sluoksnis. Ši apsauga nepakankama, todėl metalas yra deoksiduojamas (iš metalo pašalinami susidarę oksidai). Tam naudojami *Al*, *Ti*, *Si*, *C*, *Mn*, ferolydiniai (*FeMn*, *FeSi*, *FeTi* ir kt.), rūgštieji oksidai (*SiO₂* ir kt.) ir kt.

Norint gauti pradinės cheminės sudėties metalą arba pagerinti siūlės metalo mechaninės savybes, prilydomas metalas yra legiruojamas elektrodo metalu, elektrodot glaisto priedais arba fluisais. Legirujantieji komponentai yra ferosilicis, feromanganas, ferochromas, ferotitanas, ferovanadis, feromolibdenas ir kt.

Suvirinimo metu plienui greitai kaistant ir auštant, siūlės ir šalia siūlės esančios srities metale dažnai atsiranda įtrūkių dėl siūlės metale ištirpusio vandenilio ir dėl siūlės metalo dujinio akytumo (4.10 poskyris). Plyšiai būna *kristalizaciniai* (įtrūkiai siūlėje), *karštieji* (siūlės ir pagrindinio metalo sulydymo ir terminio poveikio srityje), *sluoksniniai* (terminio poveikio srityje), *šaltieji* (terminio poveikio srityje) ir *pakartotinio jungties kaitinimo* (siūlėje ir terminio poveikio srityje).

Suvirintosios jungties struktūra. Jungties struktūrą sudaro (4.11 pav.):

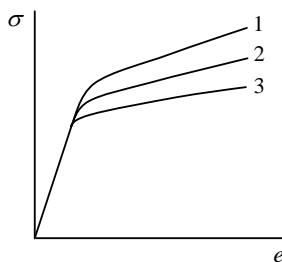
1. Siūlės metalas – pagrindinio ir pridėtinio arba tik pagrindinio metalo lydinas.
2. Terminio poveikio sritis – pakitusios struktūros ir savybių neišsilydžiusi pagrindinio metalo dalis (dėl aukštos lanko temperatūros).
3. Pagrindinis metalas – suvirinamujų ruošinių metalas.



4.11 pav. Suvirintosios jungties sritys: a – sandūrinė siūlė; b – kampinė siūlė

Suvirintosios jungties atskirų sričių (siūlės metalas, terminio poveikio sritis) mechaninės savybės yra geresnės arba prastesnės už pagrindinio metalo savybes, todėl jungtis yra mechaniskai nevienalytė. Šis mechaninis nevienalytiškumas (4.12 pav.), jau pasireiškiantis esant statiniam apkrovimui, dar labiau pastebimas ciklinio apkrovimo metu, kai atskiro srities medžiagos yra skirtinę ciklinių savybių (stipréja, silpnėja).

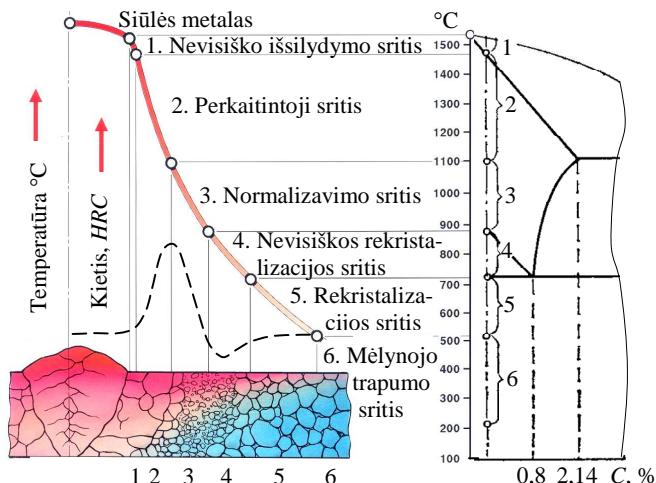
Dažniausiai deformavimo diagramos skiriasi tik tamprai plastinėje srityje (mechaninis nevienalytiškumas), o tamprai deformuojama jungtis dirba kaip viena detalė. Tačiau, viršijus medžiagos proporcingumo ribą, siūlėje kaupiasi plastinės deformacijos, formuojas triašis įtempių būvis ir atsiranda reiškinys, panašus į įtempių koncentraciją. Esant cikliniam apkrovimui, gerokai sumažėja suvirintosios jungties stipris ir ilgalaikišumas. Todėl būtina taip parinkti suvirinamąsias medžiagas ir suvirinimo technologiją, kad atskirų jungties zonų medžiagų deformavimo diagramos skirtuvių kuo mažiau.



4.12 pav. Suvirintosios jungties deformavimo diagrama esant cikliniam apkrovimui: 1 – pagrindinis metalas; 2 – terminio poveikio sritis; 3 – siūlės metalas

Terminio poveikio sritių sudaro (4.13 pav.):

1. *Nevisiško išsilydymo sritis*. Šioje zonoje (labai siaura, matuojama mikrometrais) susidaro metalinis ryšys tarp siūlės ir ruošinio metalo. Jei grūdeliai bus pasidengę oksidų plėvele arba tarp jų pateks duju, tuomet nebus tvирто metalinio ryšio, gali atsirasti įtrūkių.
2. *Perkaitintoji sritis*. Metalas yra įkaitęs iki artimos lydymuisi temperatūros (1100–1450 °C). Šiai zonai būdinga stambiagrūdė struktūra. Dėl perkaitinimo gaunamos prastesnės mechaninės savybės (plastišumas, tašumas). Perkaitintas metalas yra silpniausia suvirinimo vieta, todėl dažniausiai šioje zonoje trūksta.



4.13 pav. Mažaanglio plieno terminio poveikio srities struktūra virinant rankiniu lankiniu būdu

3. *Normalizavimo sritis* (900–1100 °C temperatūra). Šioje zonoje įkaitus ir ataušus metalui gaunama smulkiagrūdė struktūra, todėl metalas yra gerų mechaninių savybių.
4. *Nevisišlos rekrystalizacijos sritis* (720–900 °C temperatūra). Šioje zonoje yra stambių ir smulkesnių grūdelių. Mechaninės savybės patenkinamos, kadangi gaunama mišri struktūra.
5. *Rekrystalizacijos sritis* (450–723 °C temperatūra). Šioje zonoje nevyksta jokių struktūrinių metalo pokyčių, jei metalas prieš suvirinimą nebuvvo apdirbtas spaudimu. Jei prieš suvirinimą metalas buvo plastiškai deformuotas, tuomet atsistato pradinė metalo grūdelių forma ir matmenys.
6. *Mėlynojo trapumo sritis* (iki 450 °C temperatūros). Metalo struktūra nesiskiria nuo pagrindinio metalo, tačiau metalas šioje zonoje yra mažesnio plastiškumo ir tašumo.

Virinant rankiniu lankiniu būdu, terminio poveikio sritis siekia 5–6 mm, automatiškai po fliusu – 0,5–10 mm (tai priklauso nuo metalo storio ir virinimo režimo – srovės rūšies ir poliarumo, elektrodinės vielos skersmens ir jos pastūmos greičio, įtampos, suvirinimo srovės stiprio ir kt.), virinant dujomis – apie 25 mm.

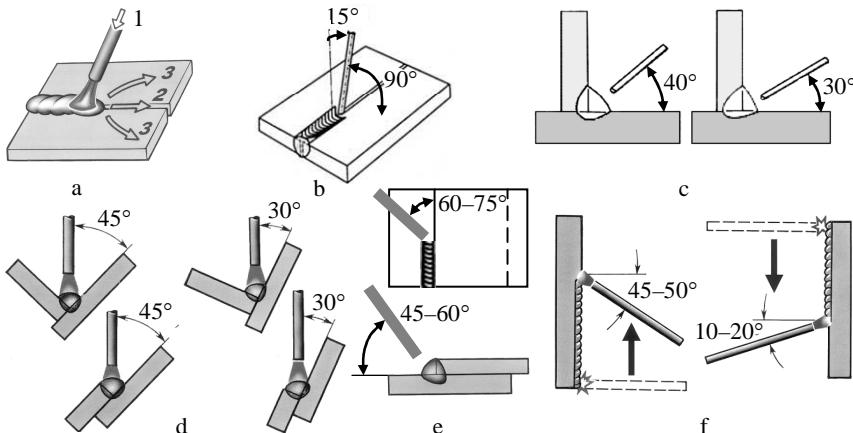
4.2.6. Jungčių suvirinimas

Lankas sužadinamas dviem būdais:

1. Palietus suvirinamajį gaminį elektrodo galu ir jį atitraukus nuo gaminio paviršiaus 2–4 mm. Liesti reikia labai trumpai, kitaip elektrodas „philips“ prie paviršiaus.
2. Palietus gaminį greitu šoniniu elektrodo judesiui (degtuko uždegimo metodas) ir atitraukus nuo paviršiaus tokiu pat atstumu.

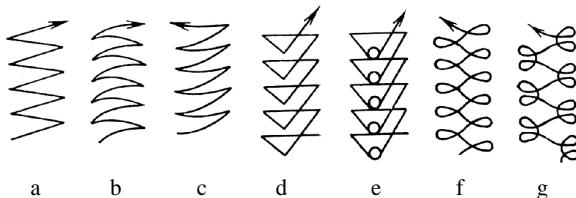
Lydantis elektrodui ir pagrindiniam metalui, susidaro lydalo vonelė. Lanko ilgis turi būti 0,5–1,1 elektrodo skersmens ir vienodas. *Trumpas lankas* (2–4 mm) dega stabiliai ir ramiai. Suvirinus gaunama kokybiška siūlė, nes išsilydės elektrodo metalas greitai laša lanko tarpeliu ir mažiau oksiduoja ir nitruoja. *Kai lankas ilginamas*, mažėja jo stabilumas ir pagrindinio metalo įvirinimo gylis, padidėja elektrodo nuostoliai (nuodegos, tyška purslai, nelygus siūlės paviršius, siūlės metale yra daug oksidų ir kt.).

Suvirinimo kryptis yra išilgai elektrodo ašies, išilgai ir statmenai siūlės ašies (4.14 pav., a). Elektrodo posvyrio į gaminio plokštumą kampus priklauso nuo suvirinimo padėties, metalo storio ir cheminės sudėties, elektrodo skersmens, glaisto rūšies, jo storio ir kt. Elektrodas pakreipiamas į siūlės ašį ruošinio metalui kuo giliau įsivirinti. Virinant sandūrines siūlės, elektrodo posvyris nuo vertikalės suvirinimo kryptimi sudaro 15–20° kampą (4.14 pav., b). Tuomet geriau formuojama siūlė, lėčiau stingsta vonelės lydalas, siūlėje išvengiama karštuju plyšių. Virinant kampines siūlės, elektrodo posvyrio kampus tarp horizontaliosios plokštumos yra 30–40° (4.14 pav., c, d), tarp vertikaliosios – 70–80°. Virinant užleistines jungtis, elektrodo posvyrio kampus priklauso nuo ėjimų skaičiaus: virinant vienasluoksnę įvairaus storio siūlę, posvyrio kampus tarp horizontaliosios plokštumos yra 45–60° (4.14 pav., e), virinant daugiasluoksnę siūlę, antrojo ir trečiojo ėjimo elektrodo posvyrio kampus yra 30°. Vertikaliosios siūlės suvirinamos iš apačios į viršų arba atvirkščiai (4.14 pav., f).



4.14 pav. Elektrodo judesiai (a) ir posvyris virinant: b – sandūrinę siūlę; c, d – kampines siūlės žemutinėje padėtyje; e – kampinę siūlę vienu ėjimu žemutinėje padėtyje; f – sandūrinę ir kampinę siūlę vertikalioje padėtyje

Stumiant elektrodą išilgai jungties (be skersinių judesių), siūlės plotis lygus 0,8–1,5 elektrodo skersmens. Tokios siūlės naudojamos plonam metalui (4–8 mm) suvirinti arba pirmajam sluoksnui sudaryti daugiasluoksnęje siūlėje. Platesnei siūlei gauti atliekami skersiniai judesiai (4.15 pav.). Dažniausiai suvirinamos 1,5–4 elektrodo skersmenų siūlės. Skersai vedžiojant, lėčiau stingsta prilydytas metalas, lengvai išsiskiria dujos ir šlakai, geriau susilydo pagrindinis metalas su elektrodo metalu, gaunama aukštesnės kokybės siūlė. Kilpiniai judesiai atliekami, kai reikia gerai įkaitinti metalą siūlės kraštose. Vietoje kilpinų galimi pusmėnulio formos judesiai.

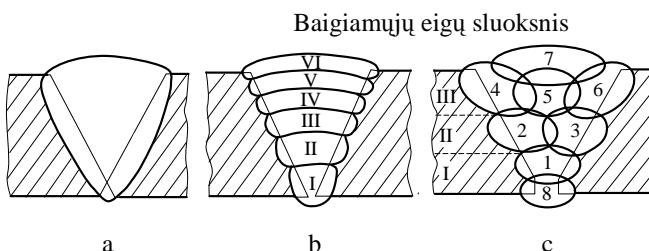


4.15 pav. Pagrindiniai elektrodo skersiniai judesiai: a, b, c, d – suvirinant paprastas siūlės, e, f, g – suvirinant siūlės, kai briaunos papildomai įkaitinamas

Elektrodas nuo gaminio neatitraukiamas tol, kol pailgėjės lankas užgėsta. Užgesus lankui arba keičiant elektrodą, lankas sužadinamas ant dar neišsilydžiusio pagrindinio metalo ir perkeliamas į kraterį (negili įduba siūlės paviršiuje). Per lėtai stumiant elektrodą, lankas metalą išlydo giliai, gali jį pradeginti. Kad gaminys nepradegtu, naudojami padėklai iš šilumai ir elektrai laidžios ar sunkiai lydžios medžiagos.

Pagal atlikimo būdą siūlės skirstomos:

- vienasluoksnės (4.16 pav., a);
- daugiasluoksnės, kurių sluoksniai skaičius lygus ėjimų skaičiui (4.16 pav., b);
- daugiasluoksnės, kurių kai kurie sluoksniai sudaryti keliais ējimais (4.16 pav., c).



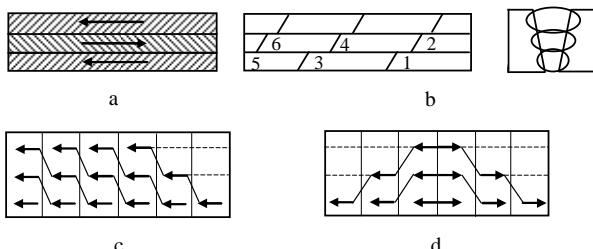
4.16 pav. V sandūrinė siūlė: a – vienpusė visiškai įvirinta; b – daugiasluoksnė vieno ējimo (dažniausia sandūrinėse jungtyse); c – daugiasluoksnė kelių ējimų su šaknies įvirinimu (dažniausia kampinėse ir téjinėse jungtyse); 1–8 – siūlių sudarymo eiliškumas, I–VI – sluoksniai sudarymo eiliškumas

Storas metalas suvirinamas keliais ējimais. Pirmuoju sluoksniu (2–3 mm skersmens elektrodais) įvirinama siūlės šaknis. Baigiamasis (atkaitinamas) sluoksnis sudaromas virinant 200–300 A srove 4–6 mm skersmens elektrodais.

Kad tolygiau įkaistų visos siūlės metalas, siūlės suvirinamos:

- Pakopomis dvigubo sluoksnio būdu (4.17 pav., a, b) – antrasis sluoksnis užvirinamas ant dar neataušusio pirmojo, nuvalius nuo jo šlaką. Kai suvirinamas 15–20 mm storio ir 200–400 mm ilgio metalas, siūlė formuojama vedant elektrodą atgaline kryptimi. Taip išvengiama karštuųjų ištrūkių.
- Kaskadomis (4.17 pav., c) – antrasis sluoksnis virinamas ant nesustingusio ankstesniojo sluoksnio.
- Kalneliu (4.17 pav., d) – kaskadinio metodo variantas. Dažniausiai virinama nuo siūlės vidurio į kraštus.

Kaskadomis ir kalneliu suvirinamujų metalo lakštų storis yra 20–25 mm ir didesnis.

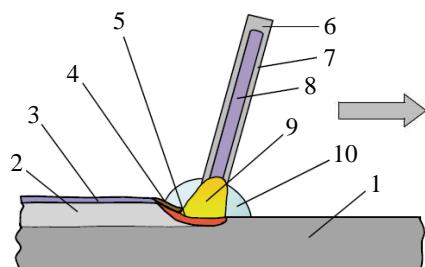


4.17 pav. Daugiasluoksnės siūlės pripildymo schemas:
a, b – pakopomis; c – kaskadomis; d – kalneliu

4.2.7. Rankinis lankinių suvirinimas

Suvirinant rankiniu lankiniu būdu (4.18 pav.) lydžiuoju elektrodu, visus judesius elektrodiui suteikia suvirintojas. Elektrodas traukiamas išilgai siūlės.

Suvirinimo procese, degant elektros lankui 8, lydosi pagrindinio metalo 1 briaunos, elektrodo strypas 7 ir elektrodo glaistas 5. Apsilydžius gaminio briaunoms, susidaro skysto metalo vonelė 10, kurią papildo išsilydžiusio elektrodo 6 metalo lašai. Lydantis glaistui, išsiškiria dujos 4. Jos aplink elektros lanką sudaro apsauginę terpę. Taip pat susidaro skystas šlakas 9, kuris skystą siūlės metalą apsaugo nuo oro poveikio, oksiduoja, išvalo kenksmingąsias priemaišas, legiruoja. Esant šlako ir lėčiau auštant siūlės metalui, gaunama geresių savybių siūlė. Nutolus elektros lankui, skysto metalo vonelė sustingsta, susidaro suvirinimo siūlė 2, padengta kietu šlaku 3, kuris yra trapus, dėl to lengvai pašalinamas nuo gaminio.



4.18 pav. Rankinio lankinio suvirinimo schema: 1 – pagrindinis metalas; 2 – siūlė; 3 – kietas šlakas; 4 – skystas šlakas; 5 – prilydytojo metalo vonelė; 6 – elektrodas; 7 – glaistas; 8 – elektrodo strypas; 9 – elektros lankas; 10 – dujų apsauga

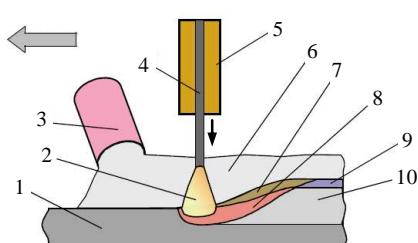
Suvirinant lankiniu būdu, vyksta sudėtingi metalurginiai procesai: metalas greitai įkaitinamas iki lydymosi temperatūros, mažas išlydyto metalo tūris, didelis kristalizacijos greitis. Skystas metalas būna trumpą laiką, cheminės reakcijos nepasiekia pusiausvyros. Suvirinimo zonas temperatūra yra labai aukšta, todėl skystame metale intensyviai vyksta fizikiniai ir cheminiai procesai: disocijuoja dujos, metalas oksiduoja ir redukuojasi, legiruojamas. Metalurginiai procesai labai priklauso nuo skystojo šlako sudėties ir dujų. Šlako cheminė sudėtis nusakoma glaisto sudėtimi ir šlaku virstančiais nemetaliniais junginiais, kurie susidaro metalui reagujant su jį supančiomis dujomis ir kitais elementais.

4.2.8. Lankinis suvirinimas po fliusu

Rankinio lankinio suvirinimo procesas nėra našus, suvirintojai turi būti aukštos kvalifikacijos (net ir to paties suvirintojo suvirintos siūlės savybės skirtingose zonose yra nevienodos). **Suvirinimo po fliusu ypatumai:**

- suvirinama neglaistyta elektrodine viela;
- elektros lankas ir suvirinimo vonelė apsaugota fliuso sluoksniu, todėl geresnė suvirintų sujungimų kokybė (geresnės prilydyto metalo mechaninės savybės);
- vielos vertikalioji ir išilginė pastūma yra reguliuojamos ir mechanizuotos;
- naudojant fliusą ir 1,2–2 mm skersmens elektrodinę vielą, virinama 100–200 A/mm² tankio srove. Padidinus srovės tankį, kyla lanko temperatūra, didėja įvirinimo gylis ir elektrodo lydymo našumas: suvirinant plonus gaminius, našumas padidėja apie 5 kartus, suvirinant storus gaminius, – 10–30 kartų (palyginti su rankiniu suvirinimu);
- sutaupoma suvirinimo vielos, nes nėra atliekų (suvirinant rankiniu būdu, esanti laikiklyje elektrodo dalis nepanaudojama);
- suvirinami storesni kaip 2 mm ruošiniai (priešingo poliarumo nuolatine srove 1,2–2 mm skersmens viela galima virinti 1 mm storio metalą);
- iki 30 mm storio metalą vienu ėjimu galima virinti be nuosklembų, nes naudojama labai stipri suvirinimo srovė.

Automatiškai suvirinant po fliusu, elektrodinės vielos 4 (4.19 pav.) pastūma lanko link ir lanko 2 stūmimas išilgai siūlės yra mechanizuoti. Praleidžiant elektros srovę elektrodine viela per kontaktą 5, užsidega lankas (kai viela slinkdama paliečia pagrindinį metalą 1). Lydantis ruošinio briaunoms, elektrodienei vielai ir fliusui 6 (viela slenka vienodu greičiu), susidaro prilydytojo metalo vonelė 8, padengta skystu šlaku 4 (šlakas apsaugo siūlės vonelę nuo oro poveikio). Auštant vonelės metalui, susiformuoja siūlė kieta šlako pluta, kuri lengvai pašalinama. Suvirinimo procese fliusas visą laiką byra iš bunkerio. Dalis fliuso išsilydo, o neišsilydęs fliusas grąžinamas atgal į bunkerį.



4.19 pav. Automatinio lankinio suvirinimo po fliusu schema:

- 1 – pagrindinis metalas; 2 – lankas;
3 – fliuso bunkeris; 4 – elektrodinė viela;
5 – kontaktinis vamzdėlis; 6 – fliusas;
7 – skystas šlakas; 8 – prilydytasis metalas;
9 – kietas šlakas;
10 – siūlė

Virinant po fliusu galima naudoti du ir daugiau suvirinimo lankų, neišsitaško metalas. Mažinant elektrodo iškyšą, didinama suvirinimo srovė ir įvirinimo gylis. Prilydytas metalas yra stipresnis ir atsparesnis tarpkristalinei korozijai, nes virinant siūlēs metalas legiruojamas elektrodine viela ir fliusu. Po fliusu suvirinama gulsčioje padėtyje.

Po fliusu suvirinamas nelegiruotas ir legiruotas plienas, varis, aluminis ir jų lydiniai. Automatinio suvirinimo būdas taikomas katilų gamyboje, skysčių ir duju rezervuarams, laivų korpusams, tiltų sijoms, tiesioms ir spiralinėms vamzdžių siūlēms ir kt. gaminiams suvirinti.

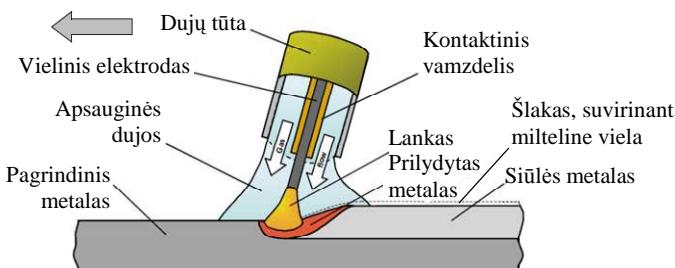
Pramonėje naudojama daug įvairių bendrosios paskirties ir specializuotų suvirinimo automatų, kurie klasifikuojami pagal įvairias savybes. Automatų būna savaeigū, kurie suvirinimo procese slenka gaminio paviršiumi, ir nesavaeigū (pakabinamųjų). Be to, automatai gali būti pritaikyti suvirinti lydžiuoju arba nelydžiuoju elektrodu. Gaminami taip pat automatai, skirti suvirinti apsauginėse dujose ir kt.

Pusiau automatinio suvirinimo procese elektrodinę vielą išilgai siūlēs stumia suvirintojas. Mechanizuota tik vienos pastūma lanko link. Pusautomaciais suvirinamos kreivos siūlēs įvairoje padėtyse (to neįmanoma padaryti automatais). Suvirinimo srovė 200–650 A, todėl yra didelis našumas. Suvirinant šiuo būdu, negalima stebeti ir tikrinti suvirinimo eigos, todėl per visą ilgį gaunama nevienodos kokybės suvirintoji siūlē. Pusiau automatinis suvirinimo būdas nepaplito.

4.2.9. Lankinis suvirinimas apsauginėse dujose

Apsauginės dujos plačiai naudojamos siūlēs metalui apsaugoti nuo oro poveikio. *Suvirinimo apsauginėse dujose ypatumai:* didelis našumas, galima suvirinti visose erdinėse padėtyse, procesą lengva mechanizuoti ir automatizuoti, gera siūlēs kokybė, geros darbo salygos.

Apsauginės dujos tiekiamos degiklyje specialiais kanalais (4.20 pav.) į suvirinimo zoną, išstumia orą ir taip išlydytą metalą apsaugo nuo kenksmingo atmosferos deguonies ir azoto poveikio.



4.20 pav. Suvirinimas apsauginėse dujose *MIG / MAG* būdu

Suvirinti dažniausiai naudojamos:

- inertinės dujos (*argonas, helis ir jų mišiniai*) – suvirinti *MIG* arba *TIG* būdu;
- aktyviosios dujos (*anglies dioksidas*) – suvirinti *MAG* būdu.

Argono dujose suvirinama *lydžiuoju* ir *nelydžiuoju* elektrodu. Suvirinimas nelydžiuoju elektrodu dažniausiai taikomas 0,1–6 mm storio ruošiniams suvirinti, lydžiuoju elektrodu – 2 mm ir storesniems. Dažnai labai stori ruošiniai suvirinami taip pat nelydžiuoju elektrodu daugiasluoksne siūle. Argonolankinio suvirinimo būdas taikomas lengvoms konstrukcijoms (iš aluminio, magnio), sunkiai lydiems metalams (titanui, niobiui, vanadžiui, cirkoniui) ir jų lydiniam, konstrukciniam legiruotajam plienui suvirinti.

Anglies diokside suvirinama tik lydžiuoju elektrodu priešingo poliarumo nuolatine srove ([4.2.1 poskyris](#)), nes, esant tiesioginiams poliarumui, lankas dega nestabiliai. Anglies dioksono aplinkoje daugiausiai suvirinamos nelegiruotojo ir mažai legiruotojo plieno konstrukcijos (dujotiekiai, naftotiekiai, laivų korpusai ir pan.). Šiuo atveju dažniausiai naudojamas CO_2 dujų mišinys, kuriame yra 10 % ir daugiau O_2 .

Azotas ir vandenilis suvirinant retai naudojami. Azote suvirinamas varis, nes vario atžvilgiu azotas yra inertinės dujos.

Suvirinimo MIG/MAG būdu ypatumai:

- didelis našumas;
- galima virinti įvairiose padėtyse;
- nereikia naudoti fliusų;
- viela (vientisa arba miltelinė) tolygiai tiekiama į suvirinimo vonelę;
- virinant išsitaško daug elektrodinės vielos;
- negalima virinti lauke, kai pučia vėjas, nes nupučiamos apsauginės dujos.

Pagrindiniai suvirinimo parametrai:

- *elektrodinės vielos skersmuo* – vielos skersmuo (0,5–2,5 mm) priklauso nuo virinamosios medžiagos storio (0,6–18 mm);
- *srovės stipris*;
- *vielos tiekimo greitis*;
- *lanko įtampa* – jeigu lanko įtampa tinkama, metalo išsitaško mažiau, jeigu lanko įtampa sumažėja arba viela tiekiama per greitai, ji panyra į lydalą. Kai lanko įtampa per didelę, o viela tiekiama per lėtai, taip pat išsitaško daug metalo, o prilydytas metalas gali oksiduotis;
- *suvirinimo greitis* – priklauso nuo metalo storio: kai suvirinimo greitis per didelis, vonelės lydalo apsauginės dujos neapsaugo, kai per mažas – metalas pradega.

Papildomi parametrai:

- *srovės rūšis*;
- *poliarumas*;
- *elektrodinės vielos iškyša* (priklause suvirinimo našumas ir siūlės kokybė – pailginus iškyšą, lankas yra ne toks stabilus, metalo išsitaško daugiau);
- *atstumas tarp degiklio tūtos ir gaminio* (jei tarp degiklio tūtos ir gaminio atstumas yra per didelis, į suvirinimo sričių patenka deguonies, azoto ir vandenilio, siūlė tampa koryta);
- *degiklio posvyrio kampas* (kuo didesnis kampus, tuo metalas daugiau įkaista, siūlės išgauba ir plotis mažėja, o įvirinimo gylis didėja);
- *apsauginių dujų debitas*;
- *išankstinio pakaitinimo temperatūra*.

Suvirinimas milteline viela *MIG/MAG* būdu yra labai našus suvirinimo būdas. Siūlės pasižymi geromis mechaninėmis savybėmis, yra be defektų. Tačiau virinant išskirkia nuodingujų medžiagų. Virinant svarbias konstrukcijas naudojamos inertinės arba aktyviosios dujos. Dažniausiai suvirinama tiesioginio poliarumo nuolatine srove. Virinti galima lauke įvairiomis padėtimis.

Suvirinimo TIG būdu ypatumai:

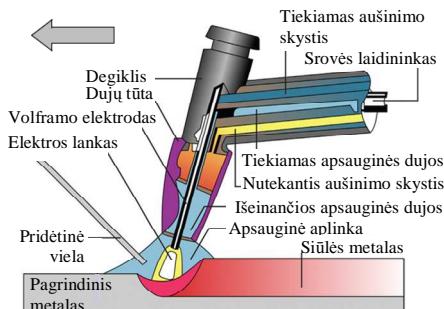
- suvirinimo lankas dega tarp volframo elektrodo ir pagrindinio metalo (4.21 pav.);
- suvirinimo vonelė apsaugoma inertinėmis dujomis (inertinėse dujose: argone, helyje ir jų mišiniuose – virinami nerūdijantysis plienas, aluminis, varis, titan, nikelis ir jų lydiniai);
- siūlės metalą sudaro pridėtinis strypelis;
- metalas nesitaško; neišskirkiria dūmų ir šlako;
- virinama įvairose padėtyse;
- galima virinti $\geq 0,03$ mm storio metalą;
- negalima virinti nešvarių, drėgnų ir dažytų paviršių;
- virinant lauke reikia specialios uždangos;
- pridėtinė medžiaga tiekiamā ranka;
- iki 4 mm storio plieno lakštai suvirinami be nuosklembų.

Pagrindiniai suvirinimo parametrai:

- *volframo elektrodo skersmuo;*
- *srovės stipris;*
- *lanko įtampa;*
- *suvirinimo greitis;*
- *pridėtinio strypelio skersmuo.*

Papildomi parametrai:

- *srovės rūšis;*
- *poliarumas;*
- *volframo elektrodo iškyša;*
- *atstumas tarp degiklio tūtos ir gaminio;*
- *tūtos skersmuo;*
- *apsauginių dujų debitas;*
- *išankstinio pakaitinimo temperatūra;*
- *degiklio ir pridėtinio strypelio posvyrio kampus* – tarp degiklio ašies ir gaminio turi būti $60\text{--}80^\circ$ kampus; tarp gaminio ir pridėtinio strypelio turi būti $10\text{--}20^\circ$ kampus;



4.21 pav. TIG suvirinimo schema

Suvirinimo lankas uždegamas aukštojo dažnio aukštosios įtampos srovės kibirkštini (tuo metu elektrodas nesusiliečia su detale). Virinant plonas medžiagas naudojama >3 A nuolatinė ir >10 A kintamoji srovė. Volframo elektroodu suvirinama:

- tiesioginio poliarumo nuolatine srove – lankas dega tolygiai, lanko ilgis 1–2,5 mm.
- priešingojo poliarumo nuolatine srove – lankas dega netolygiai, elektrodas apdega, garuoja.

Virinant sudurtines jungtis, tarp volframo elektrodo ir tūtos galo nuopjovos atstumas turi būti 5–6,5 mm, virinant kampines jungtis – 3–5 mm. Pridėtinis strypelis į suvirinimo vonelę tiekiamas periodiškai, juo negalima liesti lanko liepsnos. Pridėtinio strypelio galas turi būti apsauginėse dujose. Virinant pridėtinis strypelis neturi liesti volframo elektrodo, nes įvyks trumpasis jungimas ir apsilydys elektrodo galas.

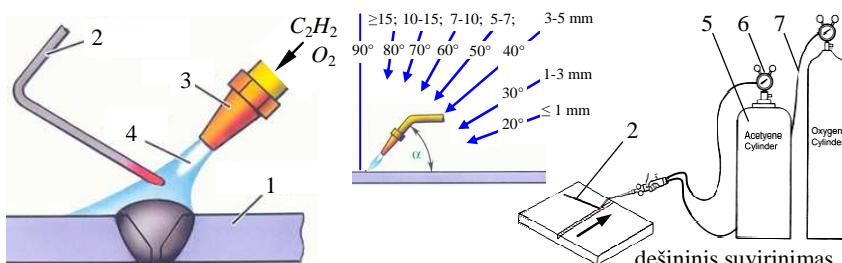
4.3. Dujinės suvirinimas

Dujinės suvirinimas – tai lydomojo suvirinimo procesas, kuriame suvirinimo zona įkaitinama iki išsilydymo degant degiųjų dujų ir techniškai gryno deguonies mišiniui. Suvirinamą ruošinį 1 briaunos išsilydo kaitinant dujų liepsna 4, o tarpelis tarp jų užpildomas pridėtiniu metalu 2 (4.22 pav.).

Dujomis suvirinami plieno (dažniausiai iki 6 mm storio), ketaus, vario, aliuminio ir jų lydiniai ruošiniai, kurių storis 10–15 mm (rečiau 40–50 mm), taip pat 0,5–3 mm konstrukcijos. Dažniausiai suvirinamos sandūrinės jungtys. Užleistinės ir téjinės jungtys virinamas rečiau, nes jose atsiranda vidinių įtempių. Virinant vamzdžius, pirmiausia įvirinama šaknis, paskui sudaroma sustiprintoji siulė.

Posvyrio kampus tarp degiklio antgalio ir metalo, pridėtinės vielos ir metalo priklauso nuo suvirinamojo metalo storio ir virinimo krypties (dešinė, kairinė). Jungčių briaunų paruošimas priklauso nuo suvirinamojo metalo storio:

- iki 2 mm storio metalas dažniausiai virinamas be nuosklemب ir pridėtinio metalo;
- virinant 2–4 mm storio metalą be nuosklemب, tarp briaunų paliekamas tarpelis;
- didesnio kaip 4 mm storio metalo briaunos nusklembiamos iš vienos ar abiejų pusių.



4.22 pav. Dujinio suvirinimo schema: 1 – ruošinys; 2 – pridėtinis metalas; 3 – degiklio antgalis; 4 – dujų liepsna; 5 – dujų balionai; 6 – suslėgtų dujų balionų reduktoriai; 7 – dujų žarnos;

4.3.1. Dujiniam suvirinimui naudojamos medžiagos

Deguonis. Deguonis yra bespalvės, bekvapės dujos, nedega, bet aktyviai palaiko degimą. Suvirinimo darbams naudojamas dujinis deguonis, kuris gaunamas atšaldžius orą arba elektrolizės būdu iš vandens. I vartojimo vietą jis tiekiamas suslėgtas iki 15 (20) MPa plieniniuose balionuose. Eksplauojant deguonies balionus, būtina griežtai laikytis darbų saugos reikalavimų. Deguonis yra chemiškai aktyvus elementas ir jungiasi beveik su visais metalais. Alyva ir riebalai deguonyje intensyviai oksiduoja, dėl to išsiskiria šiluma. Vienas deguonis nei dega, nei sprogsta, tačiau, esant didelei deguonies koncentracijai, daugelis medžiagų, pvz., paprastos dulkių, purvas ar tepalas, lengvai užsidega ar sprogsta. Todėl, dirbant su deguonimi, reikia žiūrėti, kad ant baliono ir aparatūros nepatektų tepalu ir riebalų ir deguonis nenutekėtų. Nuo atvirų kaitinimo įrenginių balionai statomi ne arčiau kaip per 5 m. Išeinančių iš baliono dujų slėgiui sumažinti ir pastoviam darbiniam slėgiui palaikyti naudojami dujiniai reduktoriai.

Degiosios dujos. Acetilenas (C_2H_2) yra svarbiausios degiosios dujos, naudojamos suvirinti, nes acetileno ir deguonies mišinio degimo temperatūra yra aukščiausia (apie 3200 °C). Techninis acetilenas yra bespalvės, aštraus kvapo, lengvesnės už orą dujos. Kvapą skleidžia sieros ir fosforo vandenilis, amoniakas ir kitos priemaišos, esančios acetilene. Ilgiau pakvpėpavus acetileno dujomis ima pykinti, galima net apsinuoduti.

Liečiantis drėgnam acetilenui su variu ir sidabru, susidaro lengvai sprogus junginys. Todėl acetilenui naudojamą aparatūrą leidžiama gaminti iš vario lydinių, kuriuose yra ne daugiau kaip 70 % Cu. Acetileno savaiminio užsiliespnojimo temperatūra (240–630 °C) priklauso nuo slėgio, taip pat nuo medžiagų, esančių jo aplinkoje.

Techninis acetilenas gaunamas iš kalcio karbido CaC_2 (suvirinant plačiausiai naudojamas), maišant su vandeniu acetileno generatoriuose, arba iš angliavandenilių, kuriu yra gamtinėse dujose, naftoje ir kitur.

Kai nereikia labai aukštos temperatūros, vietoje acetileno naudojamas propanas, butanas ar jų mišinys (liepsnos temperatūra 2400 °C), gamtinės (metano ir deguonies mišinio temperatūra yra 2100–2200 °C) ir kt. dujos.

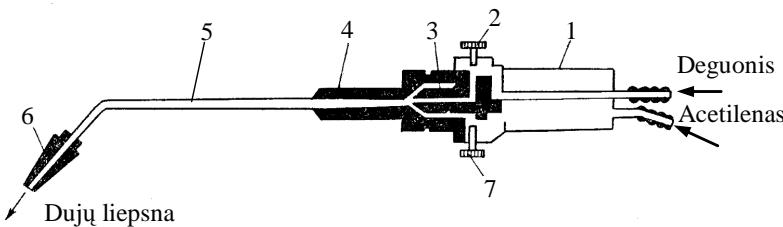
Suvirinimo vielė. Pridetinio metalo cheminė sudėtis turi būti artima pagrindinio metalo sudėčiai. Plienui suvirinti naudojama apvali suvirinimo vielė, kurios skersmuo apskaičiuojamas pagal suvirinamojo metalo storį arba suvirinimo būdą: $d = a/2(+1)$, čia d – vielos skersmuo; a – suvirinamojo metalo storis, mm; $+1$ – virinant kairiniu būdu.

Suvirinimo vielos paviršiuje negali būti rūdžiai, dažų ir kt. nešvarumų. Viela turi lydytis tolygiai, nesitaškydama tankiai ir be defektu siūlei gauti.

Flusai. Nelegiruotajam plienui suvirinti flusai nenaudojami, nes lengvai besilydantys geležies oksidai iškyla į vonelės paviršių. Suvirinant vari, aluminij, magnij ir jų lydinius be flusu, susidaro oksidai, kurių lydymosi temperatūra aukštesnė už pagrindinio metalo. Todėl šiemis metalams gerai suvirinti reikalingi flusai. Išsilydę flusai padengia skystą metalą plonu šlako sluoksniu, apsaugo siūlę nuo oksidavimosi, redukuoja oksidus, susidarančius virinamujų metalų paviršiuje.

4.3.2. Dujinio suvirinimo įrenginiai

Degikliai. Juose sumaišomas deguonis ir degiosiomis dujos, reguliuojamas jų santykis, formuojama liepsna. Skirstomi į injekcinius ir neinjekcinius, universaliosius ir specialiosius. Dažniausiai naudojami injekciniai degikliai (4.23 pav.). Jais dirbant naudojamas žemo ir vidutinio slėgio acetilenas.



4.23 pav. Injekcinio degiklio schema: 1 – rankena; 2 – deguonies čiaupas; 3 – injektorius; 4 – maišymo kamera; 5 – dujų mišinio vamzdelis; 6 – antgalis; 7 – acetileno čiaupas

Injekciniai degiklyje deguonis 0,1–0,3 MPa slėgiu per vamzdelį ir reguliuojamajį čiaupą 2 patenka į injektorių 3. Ištekėdamas dideliu greičiu iš injektoriaus korpuse esančio siauro kanalo, deguonis sudaro didelį išretėjimą kameroje ir įsiurbia degasišias dujas. Maišymo kameroje 4 (difuzorius) susidaro degusis mišinys. Per duju mišinio vamzdelį 5 jis patenka į antgalį 6 ir jo gale degdamas sudaro liepsną. Tokio tipo degikliai turi keičiamus antgalius, kurių injektoriaus ir antgalio išėjimo skylių skersmenys skiriasi. Todėl to galima reguliuoti acetileno deguonies liepsnos galia.

Neinjekciniai degiklyje deguonis ir acetilenas į cilindrinę maišymosi kamerą patenka vienodo slėgio (0,01–0,1 MPa). Jame pastovi mišinio sudėtis.

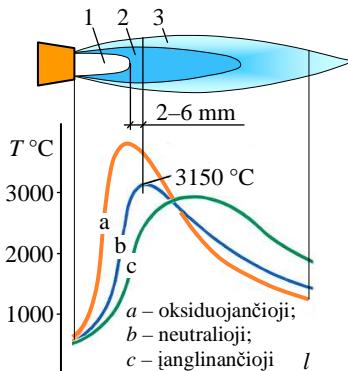
Dujų balionai. Juose laikomos ir transportuojamos dujos ar jų mišinai: *deguonis* (baliono ar jo viršutinės dalies spalva yra balta), *acetilenas* (baliono spalva kaštoninė), *propano butano mišinys* (baliono spalva raudona), argonas (spalva tam siai žalia) ir kt.

Dujų balionų reduktoriai. Suslėgtų duju balionų reduktoriai mažina duju i degiklį slėgi ir palaiko nustatytą pastovų darbinį slėgį virinant. Apsauginis vožtuvas apsaugo balioną nuo atgalinio deguonies ir acetileno liepsnos smūgio iš degiklio.

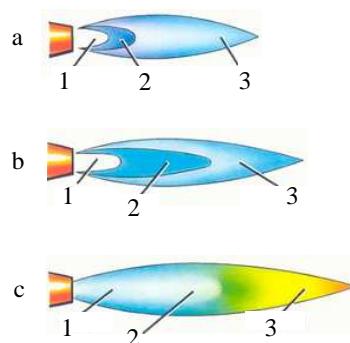
Duju žarnos. Jomis tiekiamos dujos į degiklį ar pjoviklį. Žarnų ilgis – 3–20 m.

4.3.3. Dujinio suvirinimo liepsna ir technologija

Acetileno ir deguonies liepsna yra karščiausia, palyginti su kitų duju liepsna. Dujinio suvirinimo liepsna susidaro degant išėjusiam iš degiklio acetilenui, tam tikra proporcija sumaišytam su deguonimi. Acetileno ir deguonies liepsnų sudaro trys sritys: liepsnos branduolys 1, vidurinė (virinimo) sritis 2 ir liepsnos fakelas 3 (4.24 pav.).



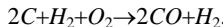
4.24 pav. Dujinio suvirinimo liepsna:
1 – branduolys; 2 – suvirinimo sritis; 3 – liepsnos fakelas; l – liepsnos ilgis



4.25 pav. Acetileno ir deguonies mišinio liepsnos rūšys: a – oksiduojančioji; b – neutralioji; c – įanglinančioji;
1 – branduolys; 2 – redukuojančioji sritis; 3 – fakelas

Kadangi liepsna ašies ir skersine kryptimi yra nevienalytė, atskirose jos srityse susidaro temperatūros skirtumai. Aukščiausia temperatūra yra vidurinėje liepsnos srityje (2–6 mm nuo branduolio), todėl degiklis laikomas taip, kad liepsnos branduolys būtų 2–3 mm atstumu nuo metalo paviršiaus.

Branduolių sudaro labai įkaitusio deguonies ir disocijuoto acetileno $2C + H_2 + O_2$ mišinys. Branduolys ryškiai švyti. Mišinys pradeda degti branduolio išorėje ir toliau dega 2-oje srityje vykstant reakcijai



Anglis sudega ne visa. Vandenilis šioje zonoje nesioksiduoja.

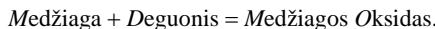
Visa anglis sudega ir vandenilis intensyviai dega zonoje 3 kartu su oro deguonimi vykstant reakcijai



Anglies dioksidas ir vandens garai, esant aukštai temperatūrai, oksiduoja geležį, todėl ši zona vadinama oksiduojančiaja.

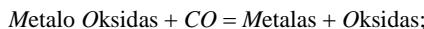
Prilydyto metalo kokybė ir suvirintojo sujungimo stipris priklauso nuo suvirinimo liepsnos sudėties. Keičiant acetilenu ir deguonies santykį, liepsna (4.25 pav.) gali būti:

- Oksiduojančioji (su deguonies perteklumi, t. y. $O_2/C_2H_2 > 1$). Suvirinant oksiduojančiąją liepsna, vonelėje vyksta oksidacijos reakcijos. Pavyzdžiu, suvirinant plieną, intensyviai oksiduojasi Fe, Si, Mn, C ir kt. elementai:



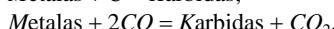
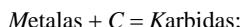
Medžiagų oksidai teršia siūlės metalą ir blogina jo mechanines savybes. Besiskiriančios CO dujos ištaško nemažai metalo. Oksiduojančiaja liepsna suvirinamas žalvaris. Šiuo atveju perteklinis deguonis su žalvaryje esančiu cinku sudaro sunkiai lydžius oksidus. Susidarius ZnO plėvelei mažiau išgaruoja cinko.

- Neutralioji (dujų santykis $O_2/C_2H_2 \approx 1$). Metalai dažniausiai suvirinami neutraliaja liepsna. Suvirinant vonelėje vyksta atstatomosios reakcijos:



todėl siūlės metalas yra vienodas. Jame nėra dujų porų ir metalo oksidų intarpų, geros jo mechaninės savybės.

- Langlinančioji (su acetileno perteklumi, t. y. $O_2/C_2H_2 < 1$). Suvirinant langlinančiąją liepsna, metalas prisotinamas anglies:



Suvirinimo vonelės prisotinimas karbidais padidina suvirinimo siūlės stiprį, tačiau labai sumažina plastiškumą. Langlinančiąja liepsna suvirinamas ketus. Branduolys yra neryškus, su žalia aureole.

Efektinė liepsnos galia (šilumos kiekis, perduodamas metalui per laiko vienetą) priklauso nuo tiekiamo į degiklį dujų kiekiečio, degiklio liepsnos posvyrio kampo į metalo paviršių, degiklio vedimo greičio, degiųjų dujų ir deguonies santykio (kuo daugiau deguonies, tuo aukštesnė liepsnos temperatūra). Liepsnos temperatūra turi būti aukštesnė už metalo lydymosi temperatūrą ne mažiau kaip 250–300 °C.

4.4. Kontaktinis suvirinimas

Kontaktiniu būdu suvirinama esant žemai įtampai (0,5–36 V) ir didelio stiprio srove (100–300 000 A). Suvirinant metalus kontaktiniu būdu, praleidžiama elektros srovė įkaitina suspaustą ruošinių sąlyčio zoną iki plastinio būvio arba iki tol, kol apsilydo. Išjungus maitinimą ir papildomai suspaudus, detalės susivirina.

Šilumos kiekis suvirinimo zonoje priklauso nuo srovės stiprio, jos praleidimo trukmės, varžos detalių sąlyčio vietoje. Tarp detalių išsiskiria daugiau šilumos negu tarp detalės ir elektrodo, nes toje vietoje, kur susiliečia detalės, yra didesnė kontaktinė varža.

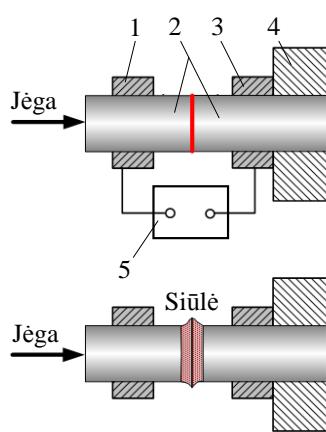
Labai plačiai kontaktinis suvirinimas taikomas lektuvų, automobilių, vagonų gamybai, vamzdžiams, bėgiams, įrankiams, mikroschemoms ir kitoms elektroninėms detalėms suvirinti. Apie 30 % visų suvirkintų sujungimų suvirinama kontaktiniu būdu. Kontaktinio suvirinimo procesą galima mechanizuoti ir automatizuoti.

Kontaktinis suvirinimas skirtomas:

- pagal suvirkintojo sujungimo tipą: *sandūrinis, aplydomasis, taškinis, reljefinis, siūlinis*.
- pagal suvirkinimo transformatoriaus maitinimą: *kintamaja srove; nuolatine impulsine srove*.

4.4.1. Kontaktinis sandūrinis suvirinimas

Kontaktinis sandūrinis suvirinimas yra kontaktinio suvirinimo rūšis, kai dėl temperatūros ir slėgio suvirinami susiliečiantys detalės paviršiai. Suvirinamieji ruošiniai 2 įtvirtinami suvirinimo mašinos elektrodų spaustuvuose 1 ir 3 (4.26 pav.) ir suspaudžiami jėga, kuri kaitinančia nesikeičia arba staigiai padidinama baigiant kaitinti.



Kaitinama iki plastinio būvio. Kai metalo temperatūra artima lydymosi temperatūrai, slegiamos detalės susivirina. Šiuo būdu suvirkiami iki $100\text{--}200 \text{ mm}^2$ skerspjūvio ruošiniai, nes storesni suvirkinant įkaista netolygiai. Suvirkinamas mažai anglingas konstrukcinis plienas, aluminio ir vario lydiniai. Kontaktui gauti būtina mechaniskai apdirbtį galinius paviršius. Sujungiamų ruošinių metalas turi būti vienalytis. Ruošiniai, kurių kraštų plotas vienodas, įtvirtinami spaustuvuose taip, kad sutaptų jų ašys. Apvalių detalių skersmuo gali skirtis apie 15 %, pagal storį – apie 10 %.

4.26 pav. Kontaktinio sandūrinio suvirinimo schema:
1; 3 – elektrodai spaustuvai; 2 – suvirkinamieji ruošiniai; 4 – neslankioji atrama; 5 – maitinimo šaltinis

Virinant sandūriniu būdu svarbu vienodai įkaitinti detalų kraštus. Suvirkinimo srovės trukmė ir tankis yra įvairūs. Sumažinus srovės trukmę, kraštai įkaista nevienodai, labiau padidinus – oksiduoja. Pradinė slėgimo jėga ruošinius įkaitina greičiau, bet jai didėjant, metalas gali ištiksti, oksiduotis. Mažiausias ruošinių iškyšos ilgis lygus ruošinio skersmeniui arba 3–4 suvirkinamuju ruošinių storiiui.

4.4.2. Kontaktinis aplydomasis suvirinimas

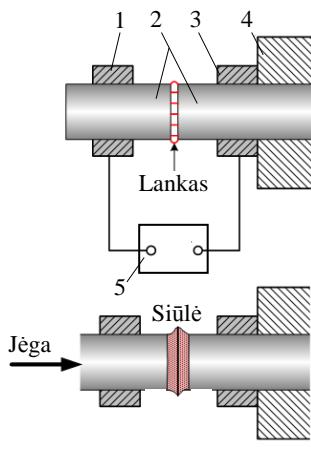
Virinant aplydomuoju būdu (4.27 pav.), ruošinių galai įkaitinami iki lydymosi temperatūros, paskui suslegiami. Tarp spaustuvuose įtvirtintų ruošinių paliekamas tarpas, o įjungus įtampa, jie tolygiai suartinami. Iš pradžių susiglaudžia atskiri nedideli ruošinių ploteliai, per kuriuos praleidžiama didelio tankio elektros srovė. Kai visas sandūrinis paviršius tolygiai apsilydo, išjungiamą srovę ir, veikiant nedidelei jégai, ruošiniai susodinami.

Kai įrenginys yra nepakankamos galios, taikomas aplydomasis suvirinimas pakaitinimu. Ruošinių galai pakaitinami trumpai juos sulietus, po to nedideliu atstumu atitolinus vienas nuo kito. Greitai keičiant suvirinamujų paviršių kontaktus nuo glaudaus

iki neglaudaus, aplydomas visas ruošinių skerspjūvis. Įkaitę paviršiai galutinai suspaudžiami, salyčio zona išsilydo, srovė išjungiamā ir, veikiant nedidelei jégai, detalės susivirina.

Aplydomojo suvirinimo privalumai (palyginti su sandūriniu suvirinimu): aplydymo procese išsilygina sandūros nelygumai, oksidai ir priemašos pasišalina iš suvirinimo zonas į paviršių, todėl nereikia junginio zonas kruopščiai paruošti, galima suvirinti sudėtingos formos, įvairaus skerspjūvio, skirtingų metalų ruošinius.

Aplydomojo suvirinimo trūkumas – didesni metalo nuostoliai ruošiniams apsilydant.



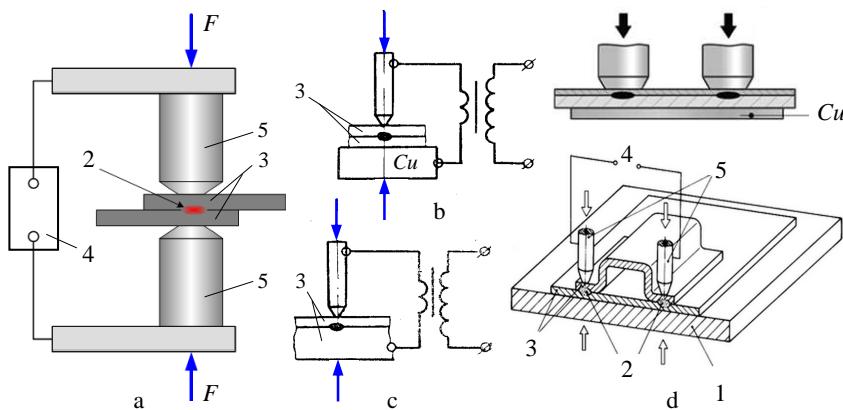
4.27 pav. Kontaktinio aplydomojo suvirinimo schema: 1; 3 – elektrodai spaustuvai; 2 – suvirinamieji ruošiniai; 4 – neslankioji atraama; 5 – maitinimo šaltinis

4.4.3. Kontaktinis taškinis suvirinimas

Ruošinių jungimo vieta suvirinama ne ištisai, o atskiruose taškuose. Praleidžiant elektros srovę per vandeniu aušinamus varinius elektrodus, lietimosi zona įkaista, išoriniuose ruošinių paviršiuose susidaro plastiški labai maži tūriai, o vidiniai išsilydo. Šiuo momentu srovė išjungiamą, nutraukiamas spaudimas, temperatūra salyčio zonoje krinta ir iš išlydyto metalo susikristalizuoją lietas suvirinimo taškas. Vienu metu galima suvirinti vieną, du arba keletą taškų.

Svarbiausieji taškinio suvirinimo parametrai: srovės tankis, suvirinimo trukmė ir elektrodo slėgis. Suvirinami 0,5–6 mm storio ruošiniai.

Naudojami įvairūs taškinio suvirinimo būdai, kurie skiriasi elektros srovės tiekimo būdu, elektrodų skaičiumi ir jų išdėstymu. Labiausiai paplitęs suvirinimas dviejų elektrodais, kai iš abiejų pusų (dvipusis suvirinimas) praleidžiama srovė (4.28 pav., a). Kartais vietoj apatinio elektrodo yra varinis antdėklas (4.28 pav., b). Jeigu viena iš suvirinamujų detalių yra gerokai storesnė už kitą, tai prie jos prijungiamama srovė (4.28 pav., c). Tuomet reikalingas tik viršutinis elektrodas. Praktikoje taikomas vienpusis suvirinimas, kai abu elektrodai yra vienoje suvirinamų detalių pusėje (4.28 pav., d).

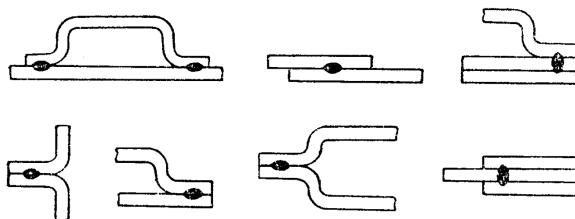


4.28 pav. Kontaktinio taškinio suvirinimo būdai: *a* – dvipusis taškinis suvirinimas; *b*, *c*, *d* – vienpusis taškinis suvirinimas; *F* – elektrodo slėgis; 1 – varinis antdėklo lakštas stipresnei srovei gauti; 2 – siūlės suvirinimo taškas; 3 – ruošiniai; 4 – maitinimo šaltinis; 5 – kontaktinio suvirinimo elektrodas

Suvirinant iš vienos pusės (4.28 pav., *d*), srovė pasiskirsto tarp viršutinio ir apatinio lakštų. Šiuo atveju ruošiniai ikaista nuo apatinio lakšto praleidžiamos elektros srovės. Norint gauti stipresnę apatinį lakštu praleidžiamą srovę, po juo dedamas varinis padėklas 1. Vienpusiu suvirinimu tuo pačiu metu galima ruošinius sujungti dviem taškais.

Suvirinimo režimai sąlyginai skirstomi į sparčiuosius (našesni, kadangi srovė praleidžiama trumpai, metalas ikaista greitai, didesnės slėgio jėgos) ir švelniuosius (ilgesnė suvirinimo trukmė, mažesnė galia).

Taškiniu būdu suvirinamos atskiro štampuotos detalės. Gaunama paprastesnė suvirintų mazgų gamybos technologija, didesnis darbo našumas. Taškiniu būdu suvirintų jungčių tipai parodyti 4.29 paveikslė.

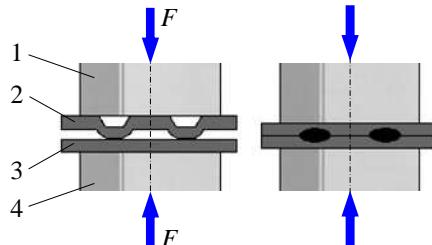


4.29 pav. Kontaktinio taškinio suvirinimo jungčių tipai

Taškinis suvirinimas taikomas mažaangliam, angliniam, mažai legiruotajam konstrukciniams ir korozijai atspariam plienui, aliuminio ir vario lydiniam suvirinti. Suvirinami 0,5–5 mm storio ruošiniai.

4.4.4. Kontaktinis reljefinis suvirinimas

Kontaktinis reljefinis suvirinimas analogiškas taškiniam suvirinimui. Ijungus srovę, viršutinis elektrodas spaudžia ruošinius ir juos presuoja (4.30 pav.), kol visiškai išsilygina reljefo iškyšos. Iš karto gaunama tiek suvirinimo tašką, kiek štampuojant buvo iškyšų. Tai našus suvirinimo būdas, mažai dyla elektrodai, tačiau suvartojama daug elektros energijos.

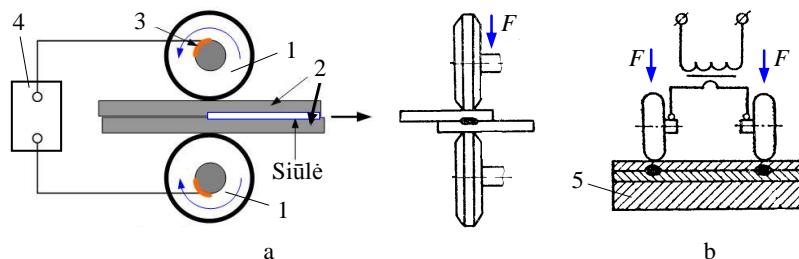


4.30 pav. Kontaktinio reljefinio suvirinimo schema: 1; 4 – vandeniu aušinami variniai elektrodai; 2 – reljefinis ruošinys; 3 – suvirinamasis ruošinys;

Virinant reljefiniu būdu, taškų išsidėstymas priklauso nuo iškyšų išsidėstymo. Jei ruošiniai yra skirtingo storio ir pagaminti iš skirtingu medžiagų, reljefų iškyšos daromos ant storesnės detalės arba stipresnio metalo.

4.4.5. Kontaktinis siūlinis suvirinimas

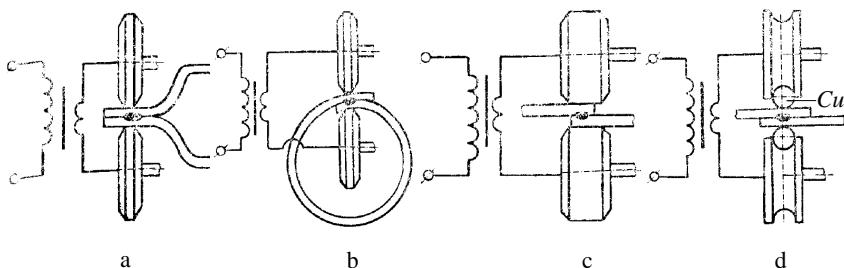
Kontaktiniu siūliniu suvirinimu detalės sujungiamos ne taškuose, o ištisine siūlė. Suvirinus tarp ruošinių gaunamas stiprus ir sandarus sujungimas. Siūliniam suvirinimui budinga tai, kad siūlė susidaro detalėms 2 judant tarp dviejų besisukančių ritininių elektrodų 1, pagamintų iš vario (4.31 pav.). Kai suvirinamos detalės tarp elektrodių juda pastoviu greičiu ir elektros srovė per sąlyčio zoną praleidžiama nuolat, suvirinimo taškai (išlydyto metalo sritys) vienas kitą dengia ir gaunama ištisinė siūlė. Siūlinį suvirinimą, taip pat kaip ir taškinį, galima atlikti elektrodais iš dviejų arba vienos (4.31 pav., b) pusės.



4.31 pav. Kontaktinis siūlinis suvirinimas: a – dvipusis; b – vienpusis; F – slėgio jėga; 1 – ritininiai elektrodai; 2 – suvirinamieji lakštai; 3 – slankusis kontaktas; 4 – maitinimo šaltinis; 5 – varinis antdėklas

Ištisine siūle suvirinama tik tuomet, kai reikalingas hermetiškumas. Trūkiojo suvirinimo procese detalės juda tolygiai, o srovė įjungiamą periodiškai. Kaskart ją įjungus, detalų sąlyčio vietoje išsilydo nedaug metalo, kuriam ataušus, ruošiniai susivirina kaip atskiras taškas (taškinis suvirinimas). Gaunama aukšta suvirintojo junginio kokybė, maža terminio poveikio sritis. Taip suvirinamos ilgos siūlės korozijai atsparaus plieno ir aluminio lydinių ruošiniuose. Siūlinio suvirinimo srovė yra 15–20 % stipresnė, nei virinant taškiniu būdu (nes didesnis elektrodo ir detalės sąlyčio plotas).

Siūliniu suvirinimu dažniausiai virinama dviem elektrodais (4.32 pav., a, b). Tiksliai išdėstytoje ir gerai pritvirtintos detalės suvirinamos sugnuždžius briaunas (4.32 pav., c). Plonos detalės su apsaugine danga suvirinamos įdubusiais elektrodais; srovė nuo elektrodų detalėms tiekiamą varinę vielą, esančią tarp jų (4.32 pav., d). Taip daroma tam, kad nebūtų pažeista apsauginė danga.



4.32 pav. Kai kurie siūlinio suvirinimo būdai: a, b – užleistinis siaurais elektrodais; c – gnuždomasis plačiais elektrodais; d – įdubusiais elektrodais

Suvirinami: nelegiruotasis ir legiruotasis konstrukcinis plienas, lengvieji lydiniai, kai kurie vario bei titano lydiniai, cinkuoti, alavuoti, padengti švinu ir kt. 0,5–6 mm storio plieno ruošiniai.

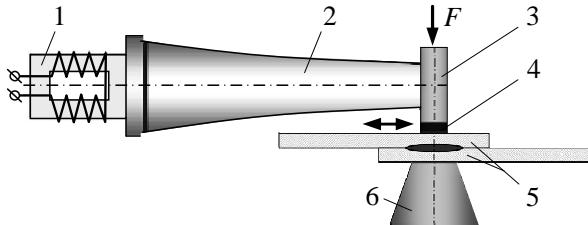
4.5. Ultragarsinis suvirinimas

Neišardoma detalų jungtis gaunama jas veikiant ultragarsinio dažnio mechaniniais virpesiais ir kartu slegiant jėga F (50–8000 N). Ultragarsinio suvirinimo aukštojo dažnio mechaniniai virpesiai generuojami taikant magnetostrickinį efektą (kinta kai kurių metalų lydinių ir keraminių medžiagų matmenys kintamame magnetiniame lauke). Iš generatoriaus tiekiant elektrinį signalą į vandeniu aušinamą magnetostrickinį keitiklį 1 (4.33 pav.), jis pradeda virpēti ir elektrinį signalą paverčia mechaniniais virpesiais. Didesnei mechaninių virpesių energijai į suvirinimo zoną (darbo įrankio 3 judančiam antgaliui 4) perduoti, prie magnetostrickinio keitiklio tvirtinamas kūgio arba kreivalinjinio kūgio formos bangolaidis 2 (tampriųjų virpesių transformatorius, arba koncentratorius). Virinant metalus, mechaniniai virpesiai veikia išilgai suvirinamuju paviršiu, o prispaudimo jėga – statmenai paviršiams.

Suvirinamieji ruošiniai 5 dedami ant kontaktinės atramos 6. Antgaliui perduodami išilginiai mechaniniai virpesiai veikia suvirinamuosius paviršius 20–75 kHz ultragarsiniu dažniu ir 10–80 μm virpesių amplitude. Veikiant ultragarsinio dažnio virpesiams, tarp suspaustų suvirinamuų paviršių atsiranda trintis, dėl šlyties deformacijų suardomas

oksidų, adsorbuotų dujų ir skysčių plėvelės, pradeda formuotis metalinis ryšys, kaista sąlyčio zona. Iškaitus sąlyčio zonai ($70\text{--}800\text{ }^{\circ}\text{C}$), metalas tampa plastiškas ir, veikiant išoriniam slėgiui, detalės suvirinamos.

Temperatūra priklauso nuo metalo savybių ir suvirinimo režimo, suvirinimo trukmė priklauso nuo suvirinamuųjų medžiagų ir jų storio, suvirinimo kokybė – nuo vibruijančio antgalio geometrijos ir jo adhezijos prie suvirinamosios medžiagos.



4.33 pav. Ultragarsinio suvirinimo išilginiais svyruojamaisiais judesiais schema:
1 – magnetostrickcinis keitiklis; 2 – bangolaidis (tampriųjų virpesių transformatorius); 3 – suvirinimo įrankis; 4 – darbinis antgalis; 5 – suvirinamosios detalės; 6 – kontaktinė atrama; F – slėgio jėga

Palyginti nedidelis šiluminis poveikis į suvirinamąjas medžiagas labai mažai pakeičia jų struktūrą, mechanines ir kitas savybes. Pavyzdžiu, suvirinant varį, kontakto zonoje temperatūra ne aukštesnė kaip $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, o suvirinant aliuminį – $200\text{--}300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tai ypač svarbu suvirinant chemiškai aktyvius metalus.

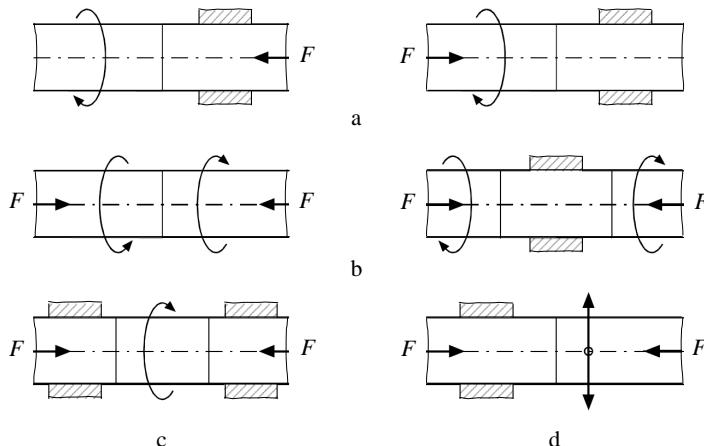
Ultragarsinis suvirinimas plačiai taikomas radioelektronikoje, prietaisų gamyboje, aviacijoje, plastmasėms suvirinti (šiuo atveju ultragarsiniai virpesiai perduodami ne tangentine kryptimi, kaip suvirinant metalus, o vertikaliai) ir kt. Ultragarsinio suvirinimo jungtys yra stiprios. Ultragarsiniu būdu galima suvirinti labai plonus (0,001–1 mm storio) ruošinius, galima privirinti foliją prie storų detalių, plastikus prie metalų, suvirinti vienodus ir skirtingus metalus (aliuminį su variu, varį su plienu, cinką su alavu ir kt.). Gerai suvirinami paviršiai, padengti dangomis ir izoliaciniemis plėvelėmis. Sunku suvirinti metalines, storesnes kaip 2–2,5 mm, medžiagas, negalima suvirinti reaktoplastikų.

4.6. Trintinis suvirinimas

Paviršiai suvirinami iškaitę dėl trinties ir papildomai suspausti. Suvinamas trintimi detalės sukamos (viena detalė gali būti ištvirtinta nejudamai, o kita sukama) apie bendrą jų ašį ir slegiamos jėga F (4.34 pav., a, b). Detalių sąlyčio zona iškaita iki $950\text{--}1300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Iškaitinus iki nustatytos temperatūros ir staigiai nustojus sukti, detalės susodinamos (suspaudžiamos 2–3 kartus didesne jėga negu kaitinant). Sąlyčio vietoje, susodinimo procese plastiškai deformuojanties paviršiniams metalo sluoksniams, detalės suartėja ir suvirinamos.

Didelės detalės, kurias sunku greitai sukti ir ypač greitai sustabdyti, sujungiamos per tarpinę detalę (4.34 pav., c). Kai vienai iš suvirinamuųjų detalų suteikiamas slankiojamasis judesys (4.34 pav., d), galima suvirinti ne tik apvalaus skerspjūvio, bet ir kitokios formos detales.

Palyginti su kitais suvirinimo būdais, trintinio suvirinimo privalumai: didelis našumas, nebūtina gerai paruošti suvirinamuų paviršių, galima suvirinti įvairiarūšius metalus, sunaudojama 5–10 kartų mažiau energijos negu suvirinant kontaktiniu būdu, aukšta suvirinimo kokybė ir kt.



4.34 pav. Trintinio suvirinimo būdai: *a* – sukant vieną detalę; *b* – sukant abi detales; *c* – sukant tarpinę detalę; *d* – vienai detalei suteikiant slankiojamajį judesį; F – slėgio jėga

Trintinio suvirinimo įrenginiai yra sudėtingi ir brangūs. Kadangi suvirinimo procesas našus, šis būdas taikomas masinėje ir serijinėje gamyboje. Trintinis suvirinimas naudojamas metalo plovimo įrankiams gaminti (darbinė dalis privirinama prie koto, pagaminto iš prastesnio plieno), statyboje, mašinų gamyboje ir kt.

4.7. Elektronpluoštis suvirinimas vakuumo

Metalai ir kitos medžiagos suvirinami įvairiais būdais (lankiniu, dujiniu, kontaktiniu ir kt.). Visi šie suvirinimo būdai yra plačiai naudojami, tačiau turi trūkumų: nedidelis jungties tikslumas, sunku suvirinti mažų matmenų detales, didelė terminio poveikio sritis, kuri prastina jungties kokybę (nes pakinta metalo vidinė sandara), atsiranda nepageidaujamų itempių ir kt. Todėl ieškoma būdų kitos rūšies energijai panaudoti ir suvirinimo kokybę prastinantiems veiksniams išvengti.

Elektronpluoščio suvirinimo metu greitai judančiu elektronų pluoštu susidūrus su kietuoju kūnu, apie 90 % kinetinės energijos virsta šiluma, kuri ši kūną įkaitina. Tokia energija medžiagas galima lydyti, suvirinti, garinti ir kt.

Pramonėje dažniausiai naudojami universalūs elektronpluoščio apdirbimo įrenginiai. Jais atliekamos tokios operacijos: mikroskylių apdirbimas, smulkų detalių išpjovimas, mikrosuvirinimas, precizinis skirtingu medžiagų suvirinimas ir litavimas ir kt. Šiam procesui būdingas labai didelis naudingumo koeficientas.

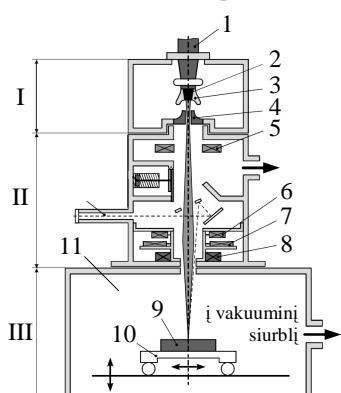
Elektronpluoščio suvirinimo fiziniai pagrindai. Viena iš suvirinimo elektronų pluoštu savybių yra vidinės elektronų energijos išlaisvinimas juos stabdant medžiagoje. Didžioji energijos dalis prarandama ne medžiagos paviršiuje, o giliau. Todėl, skirtingai nei kiti suvirinimui naudojami taškiniai kaitinimo šaltiniai, kurie kaitina metalo paviršių, elektronų pluoštas medžiagą kaitina elektrono skverbimosi kelio pabaigoje. Ši savybė svarbi, nes elektronų pluoštu galima suvirinti aluminij ir jo lydiniaus. Tokius metalus suvirinti sudėtinga dėl medžiagos paviršiuje esančios oksidų plėvelės, kuri neleidžia kokybiškai sujungti metalų. Suvirinant elektronų pluoštu, metalas lydosi ir garuoja giliau, todėl, susidarius sprogimo efektui, dujinės medžiagos išsiveržia į paviršių, oksidų plėvelė suardoma ir metalai sujungiami.

Elektronų pluoštu virinamas visų rūšių plienas, *Ta, Nb, W, Mo, Zr, Be, Ti, Al, Mg* ir jų lydiniai, kuriuos labai sunku arba visai negalima suvirinti išprastiniais metodais. Be to, virinant šiuo būdu, siūlės gylis gali būti net 10 kartų didesnis už jos plotį ([4.9 lentelė](#)).

4.9 lentelė. Elektronpluoščio suvirinimo gylio ir storio santykis

Suvirinamosios medžiaga	Suvirinamųjų detalių storis, mm	Siūlės gylio ir jos pločio santykis, mm
Nelegiruotasis plienas	iki 200	15–20
Nerūdijantysis plienas	iki 250	15–20
Titanas ir jo lydiniai	iki 300	15–20
Aluminis	iki 400	30

Elektronpluoščio suvirinimo technologija. Elektronų pluoštui technologiniams tikslams gauti reikia: laisvųjų elektronų; įgreitinti elektronus ir suformuoti iš jų drautą; sufokusuoti elektronų pluoštą; suteikti elektronų pluoštui reikiamą trajektoriją.



Elektronų šaltinis yra termoemisinis katodas 2 ([4.35 pav.](#)), pagamintas iš volframo arba tantaloo. Elektros srove jis įkaitinamas iki 1300–2500 °C paviršiaus temperatūros. Įkaitintas katodas emituoja elektronų pluoštą, kuris yra greitinamas priešingą potencialą turinčiu anodu 4. Šis elektronų pluoštas yra išsisklaidęs ir jam sufokusuoti naudojami magnetiniai lešiai 7. Jais elektronų pluoštą yra fokusuojamas į apdirbamają medžiagą 9. Elektronų pluošto kinetinė energija virsta šilumine, kuri metalą įkaitina ir išlydo. Elektronų pluoštą į norimą detalės vietą nukreipiamas kreipimo sistema 8. Šis procesas vyksta vakuume, todėl suvirinamoji detalė turi būti sandorioje kamerijoje 11.

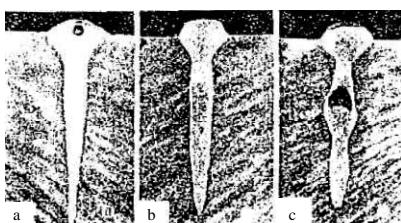
[4.35 pav.](#) Elektronpluoščio suvirinimo schema: I – pluošto generacija, II – pluošto formavimas ir valdymas; III – darbo kamera; 1 – aukštos įtampos maitinimo šaltinis; 2 – katodas; 3 – elektrodas; 4 – anodas; 5 – elektriniai lešiai; 6 – antriniai elektriniai lešiai; 7 – fokusavimo lešiai; 8 – pluošto kreipimo lešiai; 9 – detalė; 10 – technologinis stalas; 11 – vakuminė kamera; 12 – stebėjimo sistema

Virinamai detalei arba elektronų pluoštui suteikiama pastūma. Virinant mažų matmenų detales, paprastai juda apdirbamoji medžiaga, tačiau sujungiant stambias, didelių storijų detales, pastūma gali būti suteikiama pluošto šaltiniui.

Suvirinimo procese labai svarbus pastūmos greitis, nes nuo jo priklauso suvirinimo gylis ir paviršiaus kokybė: kuo greičiau juda detalė arba pluoštas, tuo sparčiau išsilydės metalas pasislenka į kristalizacijos zoną. Dėl šio efekto negalima labai padidinti darbo našumo, nes, pagreitinus pastūmą, ima blogėti paviršiaus kokybė, jis darosi nelygus ir korytas. Suvirinimo kokybei įtakos turi ir pluošto fokusavimo tikslumas. Priklausomai nuo to, kurioje zonoje sufokusuotas elektronų pluoštas, keičiasi siūlės matmenys ir kokybė. Pluoštas gali būti:

- **Nesufokusuotas (4.36 pav., a)** – kada ploniausia pluošto dalis pasislenka gilyn į metalą. Šiuo atveju gaunama labai siaura išsilydžiusio metalo zona, kurios apatinėje dalyje dažnai lieka porų ir nesulydytum. Be to, viršutinėje siūlėje gali likti tuščių arba susidaryti įdubos. Ypač dažnai tai atsitinka suvirinant didelio šiluminio laidumo metalus: varį, aliuminį ir kt.
- **Sufokusuotas (4.36 pav., b)** medžiagos paviršiuje. Gaunama pati geriausia suvirintosios jungties kokybė. Nors virinant šiuo būdu siūlė nėra labai gili, tačiau nesusidaro tuščumos, nėra nesulydytum.
- **Perfokusuotas (4.36 pav., c)** – kada pluošto židinys susidaro aukščiau metalo paviršiaus. Gaunama prastesnės kokybės siūlė. Šiuo atveju viršutinė siūlės dalis susiaurėjusi, toje vietoje, kur krinta didžiausia elektronų pluošto dalis, susidaro didelės tuščumos.

Todėl norint kokybiškai suvirinti jungtį, reikia kuo labiau sumažinti elektronų pluošto fokusavimo kampą, stengtis, kad elektronų srautas būtų lygiagretus kuo didesniu ilgiu ir kartu išlaikytų maksimalią energiją kritimo taške. Šie reikalavimai prieštarauja vieni kitiems, tačiau to galima pasiekti didinant greitinimo įtampą ir naudojant keliu lešių fokusavimo sistemą.



4.36 pav. Elektronpluoščio suvirinimo siūlių skerspjūvio geometriniai parametrai, kai elektronų pluoštas:
a – nesufokusuotas;
b – sufokusuotas;
c – perfokusuotas

Elektronpluoščio suvirinimo privalumai: didelė energijos koncentracija, kurios negalima gauti kitais šiluminiais apdirbimo būdais; energija sukaupiama mažame plote (gaunamos siauros išlimo zonas), todėl galima apdirbtį miniatiūrines detales ir labai mažo skersmens kiaurymes; galimybė plačiu diapazonu reguliuoti apdirbimo režimus ir kartu valdyti šiluminius procesus; metodas taikomas metalinėms ir nemetalinėms medžiagoms apdirbtį; nereikia pridėtinio metalo; metalas apsaugotas nuo oksidacijos; labai švari apdirbimo aplinka (nėra duju, dulkių) – tai leidžia apdirbtį lengvai besioksiuojančias, didelio aktyvumo ir sunkiai besilydančias medžiagas.

Elektronpluoščio suvirinimo trūkumai: apdirbant vakuumu būtina apsauga nuo rentgeno spindulių (apie 0,1–3 % kinetinės energijos virsta rentgeno spinduliui), vakuumui sudaryti reikia laiko, brangi ir sudėtinga aparatūra ir kt.

Elektronpluoščis suvirinimas plačiai taikomas plieno ir spalvotojo metalo lydiniams suvirinti (4.37 pav.).

Kai kurių rūšių plienas iki 300 mm storio suvirkamas vienu ėjimu be nuosklembų. Dėl mažo išlydomojo metalo kieko labai sumažėja deformacijos, todėl pagepjėja jungties kokybę ir mažai pasikeičia medžiagos savybės.

Elektronpluoščio suvirinimo vakuume technologija netaikoma Zn , Cd , Mg ir iš esmės visoms nemetaliniems medžiagoms.



4.37 pav. Elektronpluoščio suvirinimo pavyzdžiai

4.8. Lazerinis suvirinimas

Lazeris yra energijos spinduliuotės šaltinis, generuojantis didelės galios elektromagnetinių bangų srautą infraraudonojoje, regimojoje, ultravioletinėje spektro dalyse. Šis bangų srautas yra monochrominis (generuotas siaurame elektromagnetinių bangų intervale), koherentiškas (vienodos fazės bet kokiam spinduliu srauto skerspjūvyje), kryptingas (orientuotas tiksliai viena kryptimi), mažos sklaidos, stabilus, didelio skaisčio, gali būti poliarizuotas.

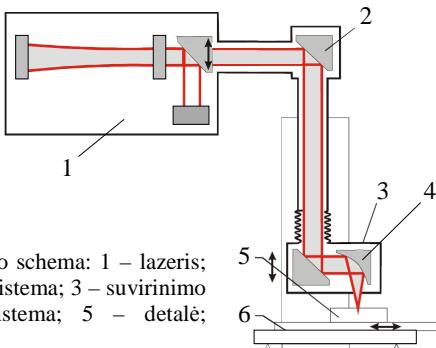
Lazerio spinduliuotė medžiagos paviršių veikia kaip labai sutelktas (koncentruotas) energijos srautas. Esant didelei energijos koncentracijai kaitinimo srityje, greitai ikaista, išsilydo ir išgaruoja sunkiai lydūs metalai. Lengvai valdomas kryptingas šiluminės energijos srautas gali veikti medžiagą lokalai, dėl to nėra liekamųjų deformacijų, gaunama gili ir siaura išlydyto metalo sritis. Terminio poveikio sritis taip pat nedidelė. Lazerio spinduliuotės srautu galima apdirbtį bet kurią šiandien žinomą medžiagą.

Lazeriniai technologiniai procesai nesudėtingi ir labai našūs. Dažnai vieno lazerio energiją stengiamasi panaudoti keliose darbo vietose, paskirstant ją laike. Medžiagos gali būti apdirbamos įvairiais technologiniais lazeriais (5.5.1 skirsnis), kurių spinduliuotės galia siekia nuo kelių dešimčių vatų iki šimtų kilovatų.

Pramonėje plačiausiai naudojami nuolatinės veikos ir impulsiniai lazeriai:

- *CO_2 duju lazeriai.* Aktyvioji duju terpė (helis, neonas, anglies dioksidas, azotas, argonas ir kt.) sužadinama stacionaria aukštosios įtampos iškrova. Impulsiniuose CO_2 duju technologiniuose lazeriuose išspinduliuojamo impulso energija siekia 10–1000 J, impulso trukmė gali būti nuo 100 nanosekundžių iki vienos mikrosekundės. Dujiniai lazeriai, kurių galia nuo 50 W iki 15 kW, pasižymi gera spinduliuotės kokybe. Šie lazeriai pritaikomi gilaus suvirinimo srityje.
- *Kietojo kūno lazeriai.* Iš kietojo kūno lazerių labiausiai paplitę itrio ir aluminium granato arba neodimių aktyvinto stiklo lazeriai. Šie lazeriai kompaktiškesni už CO_2 lazerius, bet pagrindinis jų pranašumas virinant – galimybė perduoti lazerio energiją dideliais atstumais šviesolaidžiai, pvz., 300–400 μm diametro skaidula sėkmingai transliuojama 4 kW galios lazerio spinduliuotė iki 200 m. Šių lazerių taikymo sritis yra plonų plieno lakštų ir spalvotųjų metalų suvirinimas. Esant impulsiniams režiniui, populiarus taškinis suvirinimas ir litavimas. Apdirbant impulsais, neištaškomas lydas, galima reguliuoti aušimo greitį. Virinti naudojami 0,3–20 milisekundžių trukmės impulsai.

Metalo išlydymo gylis labai priklauso nuo lazerio optinės fokusavimo sistemos židinio nuotolio, apdirbamoho metalo sugeriamosios gebos, spinduliuotės kritimo kampo metalo paviršiaus atžvilgiu ir kt. Todėl, suvirinant lazeriu, labai svarbu tiksliai fokusuoti spinduliuotės srautą. Daug įtakos išlydymo gyliui ir siūlės oksidavimuisi turi technologinės dujos, kuriose vyksta procesas.



4.38 pav. Lazerinio suvirinimo įrenginio schema: 1 – lazeris; 2 – spinduliuotės perdavimo sistema; 3 – suvirinimo galva; 4 – fokusavimo sistema; 5 – detalė; 6 – technologinis stalas

Lazerinio suvirinimo įrenginį (4.38 pav.) sudaro šios svarbiausios dalys ir mazgai:

- *Lazerio maitinimo, aušinimo ir valdymo sistemos.*
Maitinimo sistema yra skirta aukštajai įtampai gauti ir lazerio aktyviajai terpei sužadinti; aušinimo sistema naudojama lazerio aktyviajam ir optiniam elementui aušinti; valdymo ir kontrolės sistema – lazerio spinduliuotės parametrams stabilizuoti, darbo režimams kontroliuoti, blokuotei valdyti ir kt. Intelektualioms suvirinimo greičio ir lazerio galios reguliavimo sistemoms valdyti gali būti panaudoti jutikliai.
- *Optinė sistema lazerio spinduliuotei į darbo vietą perduoti.*
Lazerio spinduliuotė perduodama į darbo vietą veidrodžių sistema arba šviesolaidžiais (optinėmis skaidulomis). Specializuotomis optinėmis sistemomis galima apdirbtis sunkiai pasiekiamas vietas.
- *Suvirinimo galva su fokusuojančia optika, apsauginių duju tiekimu ir proceso kontrolės prietaisais.*

Optinio fokusavimo ir nukreipimo sistema skirta spinduliuotės srautui židinyje formuoti ir jį nukreipti reikalinga kryptimi. Nešiojamos lazerinio suvirinimo galvos, sujungtos šviesolaidžiais su lazeriu, daro procesą universalesniu, kai reikia suvirinti dideles konstrukcijas remonto ir kt. darbuose. Šiuolaikinės lazerinio suvirinimo galvos turi integruotas reljefo (aukščio) ir virintinės siūlės sekimo sistemas. Judesio sekimo sistema visada užtikrina gerą suvirinimo kokybę.

Apsauginės dujos dažnai tiekiamos į suvirinimo zoną, siekiant apsaugoti metalus nuo oksidacijos. Praktika rodo, kad tinkamiausios technologinės dujos yra helis, nes jo didelis jonizacijos potencialas ir didelis šilumos laidumas. Be šių dujų, gali būti naudojamas argonas, helio ir argono duju mišinys. Apsauginių duju tiekimas ir lazerio saugos priemonės yra integruotos į prietaisą.

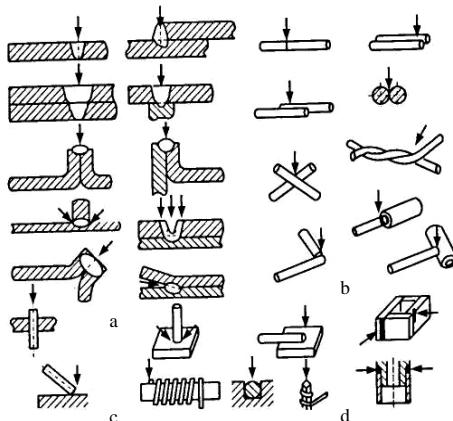
- *Pavara suvirinimo galvai arba detalėms pozicionuoti arba perstumti.*
Pavara (arba robotas) užtikrina suvirinamo kontūro sekimą ir vienodą suvirinimo greitį. Precizinio suvirinimo įrenginiai aprūpinami televizinėmis sistemomis.

Lazeriu suvirintų lakštinių medžiagų, vielos, vielos ir masyvių detalių, hermetiškų sujungimų tipai parodyti 4.39 paveiksle.

Lazerinio suvirinimo privalumai:

gaunama mažiausiu matmenų siūlė, procesas vyksta labai greitai, yra lokalizuotas, suvirinamos dalys mažai deformuoojamos, galima suvirinti kitais būdais sunkiai suvirinamus metalus, procesą nesudėtinga automatizuoti.

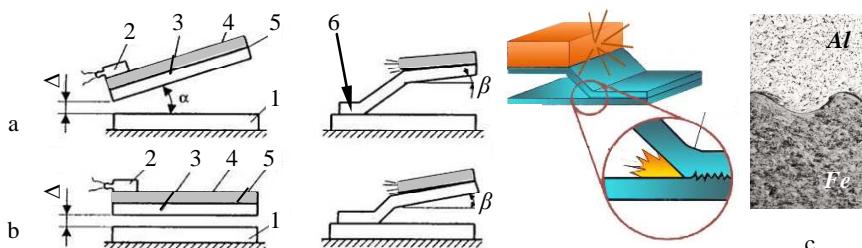
Lazerinis suvirinimas naudojamas mikroelektronikos, radio technikos, tikslinių prietaisų, automobilių pramonėje ir kt. Kai kurios užsienio šalių (JAV, Šveicarijos ir kt.) firmos lazerinį suvirinimą taiko aerosolinių balionelių gamyboje. JAV firmos, gaminančios elektrines mašinas, lazeriu pjausto rotorių ir statorių plokšteles, suvirina paketus. Lazerinės technologijos leidžia atsisakyti brangių ir imlaus darbo stampų gamybos.



4.39 pav. Lazerinio suvirinimo pavyzdžiai:
a – lakštinių medžiagų; b – vielos;
c – vielos ir masyvių detalių;
d – hermetiškų sujungimų

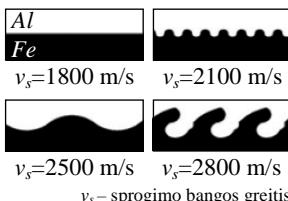
4.9. Suvirinimas sprogimu

Sprogimo metu suvirinami kartu sudėti du ar daugiau metalo lakštų, plakiruojamai ir suvirinami vidiniai ir išoriniai vamzdinių detalių paviršiai. Sprogimui paprastai suvirinami skirtinges sudėties metalai, taip pat metalai, kurių tradiciniais būdais negalima suvirinti.



4.40 pav. Suvirinimo sprogimu schemas: a – kampu padėtos suvirinamosios detalės iki sprogimo ir po sprogimo; b – lygiagrečiai padėtos suvirinamosios detalės iki sprogimo ir po sprogimo; c – Fe-Al bimetalas; 1 – apatinė detalė; 2 – detonatorius; 3 – viršutinė detalė; 4 – sprogstamoji medžiaga; 5 – tarpiklis; 6 – suvirintoji jungtis; Δ – pradinis tarpelis tarp jungiamujų detalų

Viršutinio lakšto paviršiuje tolygiai paskleidžiamas vienodo storio sprogstamosios medžiagos sluoksnis (4.40 pav.). Naudojamos sprogstamosios medžiagos pagrindas yra amonio nitratas. Ši medžiaga išsiliepsnoja nuo degtuvo. Suvirinimo procesas vyksta dėl to, kad susiliečiantys lakštų paviršiniai sluoksniai, veikiami sprogstant susidariusio slėgio, per akimirką suskystėja ir susivirina. Dangos lakštas dažnai būna siauresnis už dengiamąjį lakštą. Medžiagoms sujungti naudojama didelio greičio (iki 5000 m/s) ir didelio slėgio (>15000 MPa) smūgio banga.



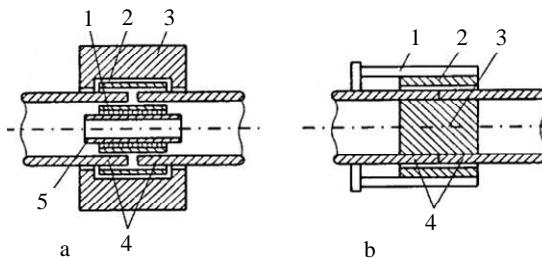
4.41 pav. Sujungimo srities banguotumo priklausomybė nuo sprogimo bangos greičio

Suvirinimo sprogimu ypatumai: suvirinimo parametrai yra smūgio greitis ir smūgio kampus; judančios detalės kinetinė energija turi būti pakankama, kad suvirinamos detalės plastiškai deformuotuksi; pradinis tarpelis tarp jungiamųjų detalų turi būti didesnis už pusę viršutinės detalės storio; suvirinamos detalės, kurių jungimo vietos sunkiai prieinamos; gana nesudėtingas procesas; pigūs įrenginiai; patogu suvirinti didelius ir skirtingu medžiagų lakštų paviršius; suvirinamųjų paviršių nereikia kruopščiai paruošti (užtenka metaliniais šepečiais nuvalyti oksidus ir pašalinti riebalus); padidėja sujungimo stipris ir jungiamųjų paviršių sąlyčio plotas, kadangi paviršiniai sluoksniai plastinės deformacijos metu įgauna banguotą formą (4.41 pav.).

Šiuo metu suvirinimas sprogimu naudojamas įvairiems metalams ir jų lydiniams: aliuminiui su titanu, mažaangliam plienui su nerūdijančiuoju karščiuui atspariu plienu arba su greitapjoviu plienu, aliuminiui su plienu, variu su sidabru ir kt. sujungti.

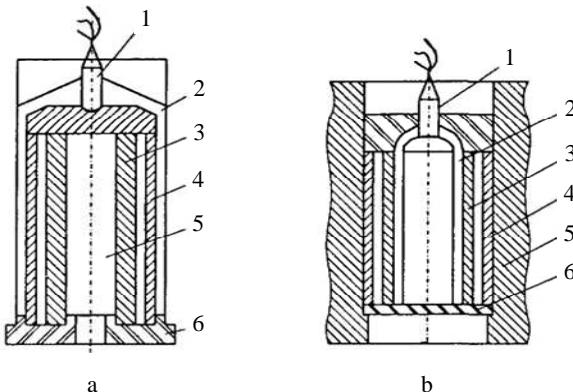
Viena iš pagrindinių suvirinimo sprogimu taikymo sričių yra metalų plakiravimas. Plakiravimo tikslas yra gauti bimetalines detales arba ruošinius (4.40 pav., c), kurie bus naudojami intensyvaus dilimo aplinkoje. Be to, plakiravimas leidžia taupyti brangesnes medžiagas. Galima plakiruoti lakštus, plokštės ir vidinius detalių ar ruošinių paviršius. Prie plieno lakštų prijungiami ploni nerūdijančiojo plieno, vario, žalvario, bronzos, aluminio, titano, sidabro ir kitų metalų sluoksniai.

Vamzdžiems detalėms sujungti sprogimu naudojami specialūs įtaisai. Principinė vamzdžių suvirinimo schema parodyta 4.42 paveiksle.



4.42 pav. Vamzdžių suvirinimas: a – matricoje; b – ant spraudiklio; 1 – sprogmuo; 2 – jungiamasis žiedas; 3 – matrica (spraudiklis); 4 – suvirinamieji vamzdžiai; 5 – gilzė, laikanti sprogmenį

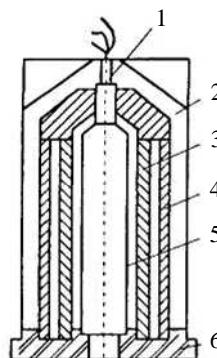
Panašiu būdu plakiruojami vidiniai ir išoriniai vamzdinių detalių paviršiai (4.43 pav.). Jungiamieji vamzdžiai dedami vienas į kitą (plakiruojant vidinius paviršius) arba uždedami ant spraudiklio (plakiruojant išorinius paviršius).



4.43 pav. Vamzdžių sprogdinamasis plakiravimas: a – išorinių paviršių; b – vidinių paviršių; 1 – detonatorius; 2 – sprogmuo; 3 – plakiruojamasis vamzdis; 4 – viršutinė detalė; 5 – spraudiklis; 6 – korpusas

Taip pat naudojama schema, kai sprogmenys išdėstomi suvirinamujų detalių išorėje ir viduje (4.44 pav.). Šis suvirinimo būdas plačiai taikomas užsienyje. Kompanija „International Research and Development“ (JAV) šiuo būdu suvirina nuo 25 mm iki 200 mm skersmens vamzdžius. Kompanijoje taip pat suvirinami 800 mm skersmens vamzdžiai, kurie naudojami giliai po vandeniu.

Kita sprogdinamojo suvirinimo taikymo sritis yra armuotų konstrukcijų gamyba. Gaunami daugiasluoksniai paketai, kuriuos sudaro pagrindinio metalo ar jo lydinių lakštai ir armatūra, pvz., aliuminio lydinio lakštai, armuoti plienu.



4.44 pav. Kombiniotas vamzdžių suvirinimas: 1 – detonatorius; 2 ir 5 – sprogmenys; 3, 4 – suvirinamieji vamzdžiai; 6 – korpusas

4.10. Metalų ir jų lydinių suvirinamumas

Suvirinamumu vadinama vienarūšių ir skirtingu metalų ir jų lydinių savybė sudaryti mechaninius reikalavimus atitinkančią suvirintąjį jungtį, kuri, veikiamą aplinkos ar temperatūros, išlaikytų nustatytą apkrovą.

Pagal suvirinamumą medžiagos skirstomos į gerai, patenkinamai ir blogai suvirinamas. Suvirinamumas priklauso nuo suvirinimo būdo, režimo, pridėtinio metalo sudėties, suvirintosios jungties zonoje susidariusios struktūros ir savybių, fliusų ir apsauginių duju. Yra daug būdų nustatyti metalų ir jų lydinių suvirinamumą.

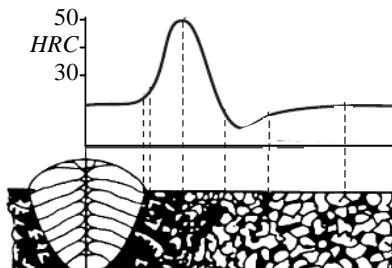
Šiuolaikinėje mašinų gamyboje plačiai naudojami specialiųjų savybių metalai ir jų lydiniai, kurių geros mechaninės arba specialiosios fizikinės savybės (atsparūs kaitrai, korozijai ir kt.). Daugelio iš jų yra blogesnis arba visai blogas suvirinamumas. Prie tokių metalų ir lydinių priklauso anglingasis ir legiruotasis plienas, ketus, varis, aluminis, magnis, sunkiai lydūs metalai ir jų lydiniai. Gerai suvirinami vienarūšiai metalai, pavyzdžiu, plienas su plienu, aluminis su aliuminiu, varis su variu. Blogai suvirinami plienas su švinu, aluminis su bismutu, plienas su magniu ir kt. Norint suvirinti skirtin-gus, sunkiai suvirinamus metalus, naudojamas trečias metalas, gerai tirpstantis juose.

Siūlės metale, terminio poveikio srityje ir pagrindiniame metale gali atsirasti savybių skirtumas (mechaninis nevienalytiškumas), kai suvirintosios jungties tam tikrose vietose susidaro grūdintos ir kt. struktūros įkaitus iki aukštos temperatūros virinant ir po to greit auštant suvirintiems ruošiniams. Užgrūdinta sritis ([4.45 pav.](#)) yra kietesnė, mažiau plastiška, palyginti su pagrindiniu metalu arba suvirinimo siūlės metalu.

Dėl suvirintojoje jungtyje atsiradusių trapių ir kietų struktūrų bei liekamuų įtempių, siūlėje arba aplink ją gali atsirasti plyšių. Kristalizacinių ir karštieji plyšiai susidaro tada, kai siūlės metalui esant temperatūrinio trapumo intervale, intensyviai didėja tempimo deformacijos. Pašildžius jungiamuosius ruošinius prieš suvirinimą ir suvirinimo metu, šiek tiek sumažėja tempimo įtempių dydis kristalizacijos metu, tačiau nepašalinamos kristalizacinių plyšių susidarymo priežastys. Priešingai, kartais dėl pakaitinimo didėja pagrindinio metalo įvirinimo gylis, siūlės metalas labiau praskiedžiamas pagrindiniu metalu, todėl Jame daugėja kristalizacinių plyšių susidarymų lengvinančių elementų (S, P, Si ir kt).

Suvirintosios jungties atsparumą karštiesiems plyšiams galima padidinti parenkant mažai kenksmingų priemaišų turinčius smulkiaigrūdės struktūros plienus.

Šaltieji plyšiai dažniausiai pasitaiko perlitinio, martensitinio ir martensitinio feritinio plieno virintinėse jungtyse. Suvirintajai jungčiai atvėsus žemiau 200 °C temperatūros, šaltujų plyšių atsiranda tuo pat, galutinai sustingus siūlei arba vėliau. Jie gali būti išilginiai ir skersiniai, siūlės metale ir terminio poveikio srityje. Šaltujų plyšių pradžia – austenito grūdelių riba. Pliene šaltieji plyšiai susidaro dėl vandenilio difuzijos į mikrotrūstumas, veikiant suvirinimo įtempiams, esant nepalankios formos ir išsidėstymo nemetaliniams intarpams, karštiesiems metalo plyšiams srityje prie siūlės ir kt.



[4.45 pav.](#) Plieno 42CrMo4 suvirintosios jungties kietis

Jei metalo kietis terminio poveikio srityje mažesnis kaip 280 HV, tai šaltųjų plyšių nėra. Labai efektyvu prieš suvirinimą ir suvirinimo metu plieną pašildyti iki 200–350 °C temperatūros. Auštant pašildytam plienui, labai sumažėja siūlės ir terminio poveikio srities aušimo greitis, išvengiamą austenito virsmo martensitu, atsiranda palankios sąlygos pašalinti vandenilį iš suvirinimo zonos.

Tobulinant suvirinimo technologiją, kuriant naujus suvirinimo būdus, kuriems būdingi intensyvūs aukštos temperatūros šilumos šaltiniai, didelis slėgis, vakuumas, tarpinė aplinka arba medžiagos ir kt., pavyksta gauti pageidaujamų savybų jungtis ir tarp blogai suvirinamujų medžiagų arba suvirinti kai kuriuos metalų derinius, kurie anksčiau buvo laikomi nesuvirinamais.

4.10.1. Plieno suvirinimas

Plieno suvirinamumas tuo prastesnis, kuo jame daugiau anglies, legiravimo elementų ir kuo storesnė detalė. Anglis didina plieno kristalizacijos temperatūrų intervalą. Dėl to padidėja karštuų plyšių susidarymo galimybė siūlėje ir šalia siūlės esančioje srityje. Struktūriniai virsmai, vykstantys auštančiame kietos būklės metale, gali sukelti šaltųjų plyšių atsiradimą jungtyje. Kad to nevyktų, prieš virinimą ruošinai pašildomi iki 100–350 °C temperatūros (jungties metalo pašildymas prieš virinimą iki 80 mm į abi puses nuo jungties sandūros leidžia kontroliuoti metalo aušimo greitį; sumažina aušimo greitį tiek, kad metale austenitas nevirsta martensitu ir srityje apie siūlę nesusidaro plyšių), o po suvirinimo – termiškai apdorojami (atkaitinimas arba aukštasis atleidimas). Jungčių terminio apdorojimo po suvirinimo metu, kai jos įkaitinamos iki 590–760 °C, vyksta martensito atleidimas. Atleisto martensito struktūros metalas yra minkštесnis, sumažėja vidinių įtempių ir siūlės metalo trapumas.

Mažaanglio plieno suvirinimas. Plienas, kuriame yra iki 0,2 % C, suvirinant nesigrūdina ir gerai suvirinamas dujomis, *MMA*, *MIG*, *MAG*, *TIG*, *SAW* būdais ir elektronų pluoštu (4.1 lentelė). Prieš virinant plieno nereikia pašildyti, po to atkaitinti ar atleisti. Kad nesusidarytų pirmojo sluoksnio įtrūkių, iki 150 °C temperatūros pašildomas tik storesnis kaip 50 mm plienas. Atkaitinama ir atleidžiama, kai reikia pašalinti vidinius įtempius. Jungties stipris atitinka pagrindinio metalo stipri, kai elektrodų tempimo stipris yra lygus ar truputį didesnis už pagrindinio metalo stipri.

Vidutinio anglingumo ir anglingojo plieno suvirinimas. Vidutinio anglingumo plienas (0,2–0,45 % C) suvirinamas pakankamai gerai. Suvirinant turi būti laikomasi nustatyto suvirinimo režimų. Parinkus netinkamą suvirinimo režimą, gali atsirasti plyšių. Plienas mažiau atsparus kristalizaciniams plyšiams, tame gali susidaryti užgrūdintų struktūrų ir įtrūkių prie siūlės, sunku gauti vienodą siūlės metalo ir pagrindinio metalo stipri. Virinant reikia naudoti elektrodus su mažesniu anglies kiekiu ir siūlėje mažinti pagrindinio metalo kiekį. Plienas *CO₂* dujose suvirinamas retai.

Kad mažiau susidarytų plyšių, prieš virinant pagrindinis metalas pašildomas iki 250–300 °C. Nusklembus briaunas į siūlę patenka daugiau elektrodo metalo, kuriame yra tik 0,08 % anglies, o pagrindiniam metalui – 0,26–0,45 %, todėl siūlėje sumažėja anglies. Suvirinus lėtai aušinama. Kristalizacių plyšių sumažėja parinkus atitinkamos formos siūlę, nes kristalai susidaro įvairių formų ir aušta nevienodai. Termiškai apdorojus (aukštasis atleidimas) siūlę ir sritį prie siūlės, sumažėja vidinių įtempių.

Anglingojo plieno suvirinamumas prastas. Jei pliene yra daugiau kaip 0,45 % anglies, nepatariama virinti žemesnėje kaip 5° C temperatūroje. Suvirintą anglingajį plieną patariama atkaitinti, paskui užgrūdinti ir atleisti.

Mažai legiruotojo plieno suvirinimas. Legiruotasis plienas, kurio kiekvieno iš legiravimo elementų vidutinis kiekis $< 5\%$, pagal suvirinamumą yra panašus į vidutinio anglingumo plieną. Mažai legiruotasis konstrukcinis plienas stipresnis už mažaanglį. Iš jo gaminamos svarbios konstrukcijos, kurias veikia vibracinės ir dinaminės apkrovos. Mažai legiruotasis plienas aušta greičiau negu anglingasis, siūlė ir pagrindinis metalas yra trapesni. Jungties ir pagrindinio metalo stipris būna vienodi, kai elektrodo ir pagrindinio metalo siūlės metalas legiruojamas papildomai. Virinant naudojama mažiau anglies ir sieros turinti viela, kartais pagrindinis metalas pašildomas iš anksto arba virinant.

Labai legiruoto plieno suvirinimas. Legiruotasis plienas, kurio bent vieno iš legiravimo elementų vidutinis kiekis $\geq 5\%$, taikant papildomas technologines priemones, suvirinamas gerai. Virinant dėl mažesnio šilumos laidumo siūlėje ir srityje prie siūlės temperatūra pasiskirsto nevienodai. Siūlės metalas aušinamas lėtai. Kad metalas neįtrūktų, pašildomas iki $150\text{--}200\ ^\circ\text{C}$ temperatūros. Vengiant plyšių reikia tinkamai parinkti suvirinimo režimą ir pridėtinio metalo cheminę sudėtį.

Labai legiruotas plienas virinamas:

- Automatiniu būdu inertinėse, aktyviosiose dujose arba dujų mišiniuose. Virinant anglies diokside, metale išdega daug lengvai besioksiduojančių legiravimo elementų, todėl siūlės metalas gali įanglėti, pasidengti oksido plėvele.
- MMA būdu. Virinant išdega nemažai legiravimo elementų, ypač chromo (iki 5 %), todėl elektrodo legiravimo elementų turi būti keliais procentais daugiau negu pagrindiniame metale. Suvirinimo lanko kartotinis uždegimas sukelia suvirintosios jungties koroziją.
- Po fliusu. Dažniausiai virinamas 5–50 mm storio plienas.
- TIG būdu tiesioginio poliarumo nuolatine srove. Virinamas $< 5\text{--}7$ mm storio plienas. Jei pliene yra aluminio, titano ir kitų lengvai oksiduojančių medžiagų, patariama naudoti argoną ir didesnio skersmens elektrodinę vielą.
- Kiti suvirinimo būdai: elektronpluoštis, elektrošlakinis ir kt.

Pagrindinio metalo ir siūlės struktūra priklauso nuo legiravimo elementų kieko, suvirinimo parametrų ir kt. Suvirintos vientisomis siūlėmis ir termiškai apdorotos jungtys yra silpnesnės už pagrindinį metalą.

Skirtingų rūsių legiruotojo plieno suvirinamas. Virinant skirtingų savybių plieną dažniau susidaro plyšių, mažėja suvirintosios jungties stipris ir plastišumas.

- Suvirinant skirtingos struktūrinės klasės plienus, cheminė siūlės metalo sudėtis gali skirtis nuo abiejų suvirinamujų plienų cheminės sudėties.
- Suvirinamojo metalo ir siūlės metalo cheminė sudėtis turi būti suderinta taip, kad nesusidarytų mechaniskai silpnų junginių.
- Reikia vengti didelio cheminės sudėties ir mechaninių savybių skirtingumo jungiant skirtingus plienus.
- Būtina ivertinti galimą siūlės metalo atskiedimą pagrindiniui metalui.

4.10.2. Ketaus suvirinimas

Ketus blogai suvirinamas, yra trapus, linkęs užsigrūdinti ir kt. Dažniausiai virinamas pilkasis ketus, rečiau – kalusis ir stiprusis. Ketaus gaminiai suvirinami įkaitinti (karštasis ir pusiau karštasis suvirinimas) ir neijkaitinti (šaltasis suvirinimas). Suvirinant taisomi ketaus liejinių defektai, remontuojamos eksplotuotos detalės, kuriose yra plyšių. Dėl didelio anglies kieko siūlėje gali susidaryti keta ir trapi baltojo ketaus struktūra, terminio poveikio srityje – martensitinė struktūra. Šios kietos ir trapios struktūros, veikiamos suvirinimo itempių, lengvai įtrūksta. Suvirinimo metu iš vonelės skiriasi daug dujų, todėl siūlėje gali susidaryti duju tuščumą.

Parinkus suvirinimo medžiągas, siūlės metalas gali įgauti neanglingojo plieno, spalvotųjų metalų ir specialiųjų lydinių struktūrą. Elektrodiu tinka ir neanglingojo plieno vielą, tačiau glaiste turi būti pakankamai grafitizuojančiu elementu – silicio ir anglies. Suvirinant gali būti naudojamos miltelinės vielos.

Karštasis ir pusiau karštasis suvirinimas. Suvirinant karštuoju būdu, ketus iš anksto pašildomas iki 500–800 °C, suvirinant pusiau karštuoju būdu – iki 300–450 °C temperatūros. Prieš suvirinimą kaitinama, kad padidėtų plastišumas ir lėčiau auštu siūlės metalas, vienodžiau auštu suvirintoji jungtis ir neatsirastą plyšių. Be to, prieš suvirinant detalėse iškapojamos defektinės vietos ir nusklembiamos jų briaunos.

Karštai suvirintame ketuje nėra sukietėsių arba užgrūdintų zonų, tačiau karštasis suvirinimas yra brangus, daug darbo reikalaujantis procesas.

Dujiniu būdu suvirinama neutralija arba įanglinančiaja liepsna po fliusu, įkaitinus ruošinius iki 450–600 °C temperatūros.

Oksiduojančioji liepsna išdegina silicij, siūlės metale atsiranda baltojo ketaus grūdelių. Fliusas (maltas boraksas arba mišinys, kurį sudaro 56 % borakso, 22 % natrio karbonato ir 22 % kalio karbonato) tirpdo sunkiai lydžius geležies oksidus, silicij ir mangaņą, paverčia juos lydžiais šlakais, oksiduoja ir iš dalies tirpdo grafitinius intarpus, saugo vonelę nuo oksidacijos, didina šlako ir vonelės lydalo takumą.

Nuo briaunų šepečiu nuvalomi nešvarumai, degiklio liepsna įkaitinamos briaunos. Ilgai ir tolygiai kaitinant, metale geriau grafitizuojasi anglis, aplink siūlę susidaro mažiau baltojo ketaus ir įtrūkių. Gerai įkaitintas metalas greitai suvirinamas žemutinėje padėtyje. Strypelio galas įkaitinamas iki šviesiai raudonos spalvos ir panardinamas į vonelę, kad, pasiekus grūdinimo temperatūrą, ketus neišbaltų. Vonelės lydalas maišomas strypelio galu (naudojami 4, 6, 8, 10, 12 mm skersmens ir 400–700 mm ilgio pridėtiniai ketaus strypeliai), kad greičiau išsiskirtų dujos ir siūlė netaptų koryta.

Jeigu metalas labai įkaitęs, liepsnos branduolys truputį nukreipiamas nuo vonelės, bet vonelė visą laiką turi būti apimta neutraliosios liepsnos. Per ilgai laikant liepsną, vonelėje išdega anglis ir silicijas, gali susidaryti baltasis ketus.

Lankiniu būdu ketus suvirinamas:

- angliniu elektrodiu ir ketaus pridėtiniu metalu;
- elektrodais, kurių didžiąją dalį sudaro nikelis (gerai susilydo su geležimi, nereaguoja su anglimi) arba varis (geras grafitizatorius, todėl ketus neišbala);
- plieniniais elektrodais, apvyniotais varine viela arba prtvirtintomis žalvarinėmis juostomis;
- glaistytaisiais ketaus elektrodais, kurių glaistas gali būti sudarytas iš 25 % kreidos, 41 % grafito, 25 % putnago (lauko špato, arba feldšpato), 9 % feromangano, sujungtu skystu stiklu. Glaisto sluoksnio storis – 0,2–0,3 mm.

Šaltasis suvirinimas. Šaltuoju būdu suvirinami dideli ir tiksliai matmenų ketaus gaminiai, nes kaitinant jie deformuojaosi. Šaltą metalą virinant glaistytaisais elektrodais lankiniu būdu, suvirintų jungčių kokybė nėra aukšta. Siūlėje ir pereinamoje srityje gaunama baltojo ketaus struktūra, o aplink siūlę esančioje srityje – grūdintas metalas. Labai kieta ir grūdinta struktūra panaikinama ilgai atkaitinant aukštoje temperatūroje.

Suvirintos mažos detalės aušta greičiau, todėl kai kurie elementai (anglis, silicis), keičia ketaus struktūrą. Kad siūlėje nesusidarytų ištrūkių, joje anglies ir silicio turi būti daugiau negu pagrindiniame metale.

Šaltuoju būdu ketui suvirinti naudojami:

- Nikelio elektrodai – jais virinant sumažėja galimybė susidaryti ištrūkiams. Nikelio ir ketaus šiluminio plėtimosi koeficientai panašūs. Nikelis yra plastiškesnis už kitas pridėtinės medžiagias, be to, jis lengvai apdirbamas pjovimu. Nikelis naudojamas ertmėms užpildyti ir bendriesiems remonto darbams. Elektrodai nerekomenduojami ketui, turinčiam daug sieros ir fosforo, suvirinti.
- Plieniniai elektrodai – tai stabilizuojamuoju arba kokybišku glaistu glaistyti mažaanglio plieno nedidelio skersmens elektrodai (vonelei prilydyti, iš pagrindinio metalo į siūlę patenkančiai angliai ir sunkiai tirpiems karbidams sujungti) arba elektrodai be specialaus glaisto (kai suvirintosios jungtys neapdirbamos, nesvarbus jų stipris arba kai suvirinama naudojant į gaminį įsukamas smeigės).
- Geležies ir vario elektrodai – juos sudaro varinis strypelis, apvyniotas mažaanglio plieno skarda, arba pluoštas varinių ir plieninių strypelių. Elektrodai glaistyti specialiais arba stabilizuojamaisiais glaistais. Geležies kiekis prilydytame siūlės metale neturi viršyti 10–15 %. Suvirinus, gaunama pakankamo stiprio metalo siūlė. Siūlės struktūra labai netolygi, ją sudaro minkštā vario matrica ir labai kieto geležies ir anglies lydinio intarpai.
- Vario ir nikelio elektrodai – pagaminti iš monelio (70 % Ni, 28 % Cu, kita dalis Fe) arba melchioro (80 % Cu, 20 % Ni) ir glaistyti stabilizuojamuoju glaistu. Gaunamos plastiškos siūlės, suvirintoji jungtis nėra labai stipri. Elektrodai yra brangūs.
- Ketaus elektrodai – jais taisomi ketaus liejinių defektai. Siūlės metalo sudėtis beveik atitinka pagrindinį metalą. Suvirinama žemutinėje padėtyje. Austenitiniais labai legiruoto ketaus elektrodais (nikelio, nikelio silicio ir kt.) suvirintos vietas lengvai apdirbamos mechaniskai.
- Geležies ir nikelio elektrodai – pagaminti nikelio ir geležies pagrindu. Naudojami norint pasiekti didesnį suvirintosios jungties stiprį arba ketų jungiant su plienu. Dėl geležies suvirintas metalas yra stipresnis nei gautas vien gryno nikelio pagrindu, taip pat lengvai apdirbamas. Šios rūšies elektrodai yra mažiau jautrūs sierai ir fosforui negu elektrodai, pagaminti gryno nikelio pagrindu.
- specialieji elektrodai – jų glaiste yra vanadžio ar titanio. Skystajame siūlės metale šie elementai jungiasi su anglimi ir sudaro dispersiškus, geležyje netirpius karbidus. Siūlės metale sumažėja anglies kiekis, todėl kietų ir trapių ledeburito ir cementito struktūrų nebesusidaro, o siūlės metalas būna gana plastiškas. Geresni elektrodai tie, kurie turi vanadžio, nes titaną, aktyviai jungdamasis su O_2 ir N_2 , labai užteršia siūlę nemetaliniiais intarpais.
- miltelinė viela – ketaus liejinių defektams taisytis.

4.10.3. Vario ir jo lydinių suvirinimas

Vario suvirinimas. Varis labai laidus šilumai, jis linkęs pleišti, todėl prastai suvirinamas. Vario suvirinamumui didelę reikšmę turi Jame esančios kenksmingosios priemaišos (deguonis, bismutas, švinas ir kt.). Variui suvirinti reikalingas didelės galios šilumos šaltinis arba suvirinami ruošiniai turi būti kaitinami.

Suvirinus rekomenduojama detales intensyviai aušinti vandeniu ir ataušusias siūles pakalti arba pavalcuoti. Pakalus išnyksta trapumas, susidaręs dėl stambagrūdės struktūros ir vario oksido tinklelio išsidėstymo tarp kristalitų. Suvirinti ir ataušinti iki kambario temperatūros plonesni kaip 5 mm lakštai pakalami plaktuku, o stori (5–20 mm) pakalami 200–400 °C temperatūroje. Pakaltos suvirintos detalės atkaitinamos 550–600 °C temperatūroje. Dėl to sumažėja vidiniai metalo įtempiai, susmulkėja struktūra, metalas pasidaro plastiškesnis ir stipresnis.

Varis suvirinamas lankiniu būdu (glaistytaisiais elektrodais, elektrodine viela ir pridėtiniais strypeliais apsauginėse dujose ar po fliusu) ir dujomis. Elektrodai dažniausiai gaminami iš vario (99,5–99,9 % Cu). Strypas padengtas glaistu, kuriamo apie 50 % feromangano, 8 % ferosilicio, 12 % putnago, 10 % fluorido ir 20 % skystojo stiklo. Kaip pridėtinis metalas naudojami vario arba bronzos (alavinės, silicinės, kt.) strypeliai.

Lankinis suvirinimas.

MMA būdu suvirinami storesnį kaip 2 mm lakštai. Virinant priešingo poliarumo nuolatine srove, metalas pašildomas iki 200–400 °C temperatūros, 20–30 mm storio metalas pašildomas iki 600–800 °C temperatūros.

Iki 4 mm storio sandūrinės jungtys suvirinamos be nuosklembų, 5–12 mm storio jungčių briaunos nusklembiamos V forma (kampus tarp jų 60–70°). Kadangi varis labai takus, tarp jų paliekamas kuo mažesnis tarpelis. Elektrodo posvyrio kampus 10–16°.

TIG būdu dažniausiai suvirinama tiesioginio poliarumo nuolatine srove. Storesnis kaip 4 mm varis suvirinamas ant varinio padéklo. Metalas iš anksto pašildomas iki 550 °C temperatūros. Virinant volframo elektrodu, reikia žiūrėti, kad vonelės lydalas gerai suvilgytu pagrindinių metalų.

MIG būdu suvirinama priešingojo poliarumo nuolatine srove. Naudojama varinė viela. Suvirintosios siūlės dažniausiai pakalamos.

Automatiniu būdu po fliusu galima virinti vientisa ir milteline viela. Naudojami lydytjieji fliusai.

Dujinis suvirinimas. Virinti dujomis varj labai sunku. Jame lengvai tirpsta deguonis ir vandenilis. Kaitinant detalės deformuoja. Pagrindiniame metale turi būti kuo mažiau deguonies. Deguonis blogina siūlių kokybę, sudaro porą. Oksidams šalinti naudojamas fliusas. Varis paprastai suvirinamas acetileno ir deguonies mišinio liepsna. Suvirinama labai greitai.

Žalvario suvirinimas. Žalvaris yra vario ir cinko lydins su alavo, mangano, aluminium, nikelio, geležies, silicio ir kitų elementų priemaišomis. Žalvarj virinti sunku, nes aukštoje temperatūroje garuoja cinkas, blogėja žalvarinės siūlės savybės, metalas būna korytas. Žalvaris suvirinamas rankiniu ir automatiniu lankiniu būdu nelydžiuoju (angliniu arba volframo) ir lydžiuoju elektrodu apsauginėse dujose, taip pat dujomis. Kaip pridėtinis metalas naudojami silicinė ir manganinė bronza arba daug cinko turintis žalvaris. Storesnis kaip 8–10 mm lydins iš anksto pašildomas iki 270–500 °C temperatūros, 20–30 mm ir storesnis virinantis pašildomas papildomai. Siūlės pakalamos, o gaminys atkaitinamas 600–700 °C temperatūroje.

Lankinis suvirinimas.

MMA būdu tiesioginio poliarumo nuolatine srove suvirinamas storesnis kaip 5 mm žalvaris. 6–10 mm storio žalvaris be nuosklemب suvirinamas iš abiejų pusių ant fliuso pagalvėlių. Tarp briaunų paliekamas 3–4 mm pločio tarpelis. Užvirinant pirmą siūlę, tarp briaunų dedamas 3 mm skersmens varinis strypelis.

TIG būdu tiesioginio poliarumo nuolatine srove žalvaris suvirinamas strypeliais.

MIG būdu žalvaris suvirinamas elektrodinėmis vielomis.

Automatiniu būdu po fliusu naudojant elektrodinę vielą.

Dujinis suvirinimas. Gaunama geresnės kokybės siūlė. Virinant dujomis iš žalvario išgaruoja iki 25 % Zn, tai mažina jungties stiprį ir didina poringumą. Kad mažiau garaudot cinkas, naudojami specialūs dujiniai flusai, pridėtinį strypelių sudėtyje turi būti silicio, boro ir aluminio, suvirinama oksiduojančiaja acetileno ir deguonies mišinio liepsna. Tuomet suvirinimo vonelės paviršiuje susidaro sunkiai lydaus cinko oksido plėvelė, stabdanti garavimą. Suvirinant svarbu nesuardyti šios plėvelės. Tam tikslui liepsnos branduolys nukreipiamas nuo suvirinimo vonelės į pridėtinio metalo strypelį. Deguonies perteklius oksiduoja vandenilį, esantį liepsnoje, dėl to mažiau jo patenka į išsilydžiusį metalą.

Bronzos suvirinimas. Bronza yra vario ir alavo (alavinė bronza), švino, aliuminio, mangano, fosforo, nikelio ar kito elemento (nealavinė bronza) lydinas. Bronza turi antifrikcinių savybių, todėl ja dažniausiai apvirinamos besitrinančios detalės, taisomi bronzos liejinių defektai. Bronza yra taki. Dažniausia naudojama alavinė ir aliumininė bronza. Alavinę bronzą reikia suvirinti greitai, nes, perkaitus pagrindiniam metalui, gali išsilydyti tame esantys lengvai lydūs komponentai. Išairių rūšių bronzos suvirinamumas yra skirtinges, todėl ir suvirinimo technologija nevienoda. Bronza suvirinama angliniais ir volframais elektrodais argone, metaliniais glaistytaisiais elektrodais, dujinu būdu. Metaliniai elektrodai – tai pagrindiniams metalui artimos sudėties medžiagos strypai, glaisti specialiais glaistais. Pridėtinis metalas parenkamas tokis, kad atitiktų suvirinamo metalo sudėti.

Lankinis suvirinimas.

TIG būdu tiesioginio poliarumo nuolatine srove po fliusu su pridėtiniais strypeliais geriausia virinama silicinė bronza. Storesni kaip 8 mm lakštai iš anksto pakaitinami iki 200–300 °C temperatūros.

MMA būdu priešingo poliarumo nuolatine srove dažniausiai suvirinama visų rūšių bronza. Storesnio kaip 4 mm metalo briaunos nusklembiamos. Plonas metalas iš anksto nepakaitinamas, o storesnis kaip 4 mm pakaitinamas iki 300 °C temperatūros. Kad nesusidarytų išrūkių, vengiama virinti 400–600 °C temperatūroje.

Dujinis suvirinimas. Virinant dujomis lydalas kietėja lėčiau. Išlydytas alavas oksiduoja, todėl naudojamas flusas ir neutralioji suvirinimo liepsna. Metalas iš anksto pašildomas iki 500 °C temperatūros. Alavinei bronzai virinti naudojami tie patys flusai kaip ir virinant žalvarį. Nealavinė bronza, legiruota manganu, siliciu, nikeliu ir kitaip elementais, suvirinama gana lengvai. Flusai yra tie patys, kaip ir virinant varį ar žalvarį. Metalas iš anksto pašildomas iki 300–350 °C temperatūros.

4.10.4. Aliuminio ir jo lydinių suvirinimas

Aluminis labai laidus šilumai, todėl aliuminiui suvirinti reikalingas didelės galios ir koncentruotos šilumos šaltinis. Aliuminio lydymosi temperatūra yra žema (apie 660 °C), bet jo paviršiuje yra sunkiai lydaus oksido Al_2O_3 ($T_m \approx 2072$ °C) plėvelė, dėl kurios sunku suvirinti. Ši plėvelė padengia išlydyto metalo lašus, todėl juos labai sunku sulydyti vieną su kitu ir su pagrindiniu metalu. Prieš suvirinant reikia pašalinti oksido plėvelę ir neleisti jai susidaryti suvirinimo procese. Aliuminio oksidas pašalinamas trimis būdais: ištirpinant glaiste arba fluse esančiomis medžiagomis, suardant elektros srove ir mechaniskai. Aliuminio oksidą gerai tirpina šarminiu metalu chloridiniu ir fluoridiniu druskų mišiniu ($NaCl$, KCl , LiF ir kt.).

Ištirpę oksidai iš suvirinimo vonelės pereina į šlaką, pagerėja siūlės metalo kokybė, padidėja suvirintos konstrukcijos patikimumas. Kvalifikuoti suvirintojai aliuminį suvirina be fliusų. Oksidus jie pašalina mechaniskai.

Aluminyje vandenilis tirpsta, bet, siūlei auštant, nespėja išsiskirti, todėl siūlėje susidaro porą, silpnėja konstrukcijos stipris, plastišumas ir sandarumas. Didesnio stiprio aluminyje dažnai susidaro šaltuojų plyšių. Todėl metalą reikia iš anksto pašildyti iki 250–400 °C temperatūros, kad siūlės metalas kristalizuotusi lėčiau ir vandenilis suspėtų išsiskirti iš aplinką. Kristalizacinių plyšių susidaro, kai aluminyje būna daugiau silicio. Pridėjus geležies, jo kiekis sumažėja. Itrūkių gali susidaryti ir dėl to, kad oksido plėvelės šiluminio plėtimosi koeficientas yra apie tris kartus mažesnis negu aliuminio. Ne visada aliuminio lydiniai galima kaitinti.

Aluminis labai deformuojas, todėl virinat reikia ji gerai prityvirtinti. Aliuminio lydiniai būna deformuojamieji ir liejamieji. Jie gali būti termiškai stiprinami ir termiškai nestiprinami. Aliuminio lydinių suvirinamumas priklauso ne tik nuo legiruojančių elementų, bet ir nuo jų kombinacijos. Todėl, virinant aliuminio lydinius, ypač svarbu naudoti pridėtinės medžiagas, kurių cheminė sudėtis atitinka lydinių cheminę sudėtę.

Aluminis ir jo lydiniai suvirinami glaistytaisiais elektrodais, elektrodinėmis vielomis ir priedėtiniais strypeliais. Iki 5 mm storio metalas suvirinamas be nuosklembų. Tarpelis tarp jų turi būti ne didesnis kaip 0,5–1 mm. Iki 15 mm storio metalo nuosklebos daromos U formos, storesnio kaip 15 mm – X formos.

Aliuminio ir jo lydinių suvirinimo būdai:

MMA būdu dažniausiai suvirinamas techniškai grynas aliuminis, siluminas, aliuminio lydiniai, kuriuose yra < 5 % magnio. Rankiniam lankiniams suvirinimui naudojami elektrodai yra tos pačios sudėties kaip ir suvirinamas metalas, o glaistą sudaro chloro ir fluoro druskos. 10 mm ir didesnio storio metalas iš anksto pašildomas iki 100–400 °C temperatūros. Dažniausiai suvirinama iš abiejų pusių.

Lankinis suvirinimas apsauginėse dujose. Lakštai, kurių storis 0,5–10 mm, suvirinami nelydžiuoju volframo elektrodu, naudojant pridėtinę medžiagą, o storesni lankstai – lydžiuoju elektrodu. Storus lankstus ir stambius liejinius rekomenduojama pakaitinti iki 400 °C temperatūros. Suvirinant apsauginėse dujose gaunama aukštesnės kokybės siūlė negu suvirinant kitais lankiniu suvirinimo būdais. TIG būdu dažniausiai virinama argone. Volframo elektrodu suvirinama su pridėtiniu strypeliu arba be jo. Suvirinimo viela arba pridėtinis strypelis turi atitikti pagrindinio metalo cheminę sudėtę. MIG būdu priešingo poliškumo nuolatine srove ant padėklo suvirinami storesni kaip 4 mm gaminiai. Kai aluminis ir jo lydiniai virinami MIG ir TIG būdais, iš vonelė įmaisoma oksidatorių. Argoną geriausia maišyti su 1,5 % deguonies.

Automatiniu būdu po fliusu dažniausiai suvirinami 8–25 mm storio ruošiniai. Išsilydės fliusas praleidžia elektros srovę, todėl lankas dega ne po fliusu, o virš jo. Nuo siūlės sunku nuvalyti šlaką.

Mikroplazminiui būdu impulsine srove virinami ploni 0,2–2,0 mm storio lakštai. Kad siūlė ir pagrindinis metalas prie siūlės nesioksiuotų, naudojamos apsauginės dujos. Priešingo poliarumo impulso amplitudė ir jos trukmė turi būti tokia, kad suvartu susidarę oksidai.

Dujinio suvirinimo metu oksido plėvelė šalinama fliusu (50 % KCl , 28 % $NaCl$, 14 % $LiCl$, 8 % NaF), kuris tepamas ant briaunų ir pridėtinio strypelio galo. Baigus darbą fliuso liekanos kruopščiai nuvalomos, nes per mėnesį jos gali suardytis 10 mm storio gaminį. Iki 2 mm storio alumininis suvirinamas be nuosklembų ir pridėtinio metalo. Virinant storesnes detales, briaunos nusklembiamos 60–70° kampu, o tarp jų paliekamas 2–5 mm tarpelis. Virinti šiuo būdu sunku, nes nuo arti degančios liepsnos metalas labai deformuoja. Kai liepsnos galia per didelę, aluminio oksidas uždengia vonelę ir nematyti, kada metalas ima lydytis. Tada metalas pradeginamas ir ši defekta sunku ištaisyti. Ataušusių siūlę galima šiek tiek pakalbti.

Kontaktiniu būdu aluminis ir kai kurie jo lydiniai suvirinami patenkinamai. Kontaktiniu taškiniu būdu suvirkintas aluminis išlieka laidus elektrai ir šilumai. Suvirinant reikalinga stipri trumpalaikė elektros srovė.

Kiti suvirinimo būdai: elektrošlakinis, elektronpluoščis ir kt.

Duraluminis, arba deformuojamasis $Al-Cu-Mg-Mn$ aluminio lydinas, yra termiškai sustiprintas (užgrūdintas ir po to sendintas). Sendinti lydiniai yra daug stipresni ir kietesni. Kai įkaitinimo temperatūra viršija 500 °C, apsilydo ir oksiduoja grūdelių paviršiai, labai pablogėja mechaninės savybės. Perkaitinto duraluminio savybių negalima atkurti jokiu terminio apdorojimo būdu, todėl po duraluminio suvirinimo jo terminio poveikio sritis susilpnėja 40–50 %. Suvirinant apsauginių dujų aplinkoje sumažėja duraluminio stipris, kuri galima atkurti iki 80–90 % po terminio apdorojimo.

Duralumininiui virinti, jei jis paskui termiškai neapdorojamas, geriausiai tinkta aluminio strypeliai arba lydinas, panašus į duraluminį. Šie lydiniai papildomai legiruojami geležimi ir nikeliu, todėl būna atsparūs aukštesnėje kaip 200–250 °C temperatūroje.

4.10.5. Magnio suvirinimas

Magnis yra minkštasis ir plastiškas, labai lengvas metalas. Jo lydymosi temperatūra 651 °C. Jo paviršius pasidengęs patvaria oksido plėvele. Magnio oksidas lydosi 2150 °C temperatūroje, todėl magnio lydiniai suvirinami retai. Konstrukcijos, pagamintos iš magnio lydinių, suvirinamos TIG būdu kintamaja srove. Kad nesusidarytų šaltujų plyšių, suvrinti gaminiai 0,5–1 val. atkaitinami 250 °C temperatūroje.

4.10.6. Sunkiai lydžių metalų ir jų lydinių suvirinimas

Sunkiai lydūs metalai yra titan, cirkonis, niobis, molibdenas ir kt. Jų lydymosi temperatūra yra aukštesnė už geležies lydymosi temperatūrą. Sunkiai lydūs metalai kaitinan intensyviai sugeria dujas (deguonį, vandenilį, azotą). Net nedaug sugėrus dujų, pavyzdžiu, deguonies, labai pablogėja šių metalų plastinės savybės. Norint gauti kokybišką suvirintąjį sujungimą, reikia suvirinimo zoną apsaugoti nuo oro poveikio.

Titano ir jo lydinių suvirinimas. Titanas lydosi 1668°C temperatūroje, du kartus lengvesnis už plieną, atsparus rūgštims ir korozijai. Legiruoti titano lydiniai yra stiprūs, plastiški ir tąsūs. Kad suvirintosios jungtys būtų kokybiškos, pridėtinėje medžiagoje turi būti ne daugiau kaip 0,15 % deguonies ir 0,05 % azoto. Suvirinimo vonelę ir auštantį metalą reikia saugoti nuo oro poveikio.

Virinant titaną ir jo lydinius, dažniausiai susidaro porų ir šaltujų plyšių, todėl pagrindinis metalas ir pridėtinis metalas turi būti švarūs. Virinama optimaliausiu režimu.

Titanas virinamas lankiniu būdu argono aplinkoje volframo elektrodu (*TIG* suvirinimas), automatiniu būdu po flusu (suvirinama retai), elektronpluoščiu, mikroplazminiu ir elektroslakiniu būdais. Titano negalima suvirinti lankiniu būdu glaistytaisiais ir angliniais elektrodais, taip pat dujiniu būdu.

Geriausia virinanti *TIG* būdu. Argonas turi būti tiekiamas ne tik į suvirinimo zoną, bet ir į priešingą siūlės pusę, taip pat ir į tas gaminio vietas, kurios ikaista daugiau kaip 400°C . Pridėtinė viela atkaitinama vakuuminėje krosnyje, vandenilio joje sumažėja iki 0,002–0,004 %. Suvirinama tiesioginio poliarumo nuolatine srove ant aušinamo vandeniu liekamojo titano arba varinio padėklo.

Nikelio ir jo lydinių suvirinimas. Nikelis lydosi 1455°C temperatūroje, atsparus oro ir vandens poveikiui, yra svarbus plieno legiravimo ir nikelio lydinių elementas. Nikelį ir jo lydinius sunku virinti, siūlėje susidaro daug kristalizacinių plyšių ir porų, nes vonelės lydale ištirpssta daug dujų, ypač deguonies ir vandenilio. Kad plyšių susidarytų mažiau, į lydą pridedama mangano ir magnio.

Nikelis ir jo lydinių suvirinami lankiniu būdu ir dujomis, naudojami glaistytieji elektrodai, vientisa viela, juostos ir strypeliai.

MMA būdu nikelis virinamas priešingo poliarumo nuolatine srove. Virinant daugiasluoksnies siūles, kiekvienas kitas sluoksnis suvirinamas atausus apatiniam, prieš tai gerai nuvalius šlaką ir metalo purslus. *Vario nikelio* lydiniai suvirinami priešingo poliarumo nuolatine srove ir glaistytaisiais monelio elektrodais (0,2 % *C*; 27–29 % *Cu*; 65–70 % *Ni+Co*; 2–3 % *Fe*; 1,2–1,8 % *Mn* ir kt.). Nikelio molibdeno lydinas, kuris bus veikiamas druskų ir sieros rūgšties, virinamas glaistytuoju elektrodu (25–28 % *Mo*; 66–69 % *Ni*, kita dalis *Fe*) priešingojo poliarumo nuolatine srove.

TIG būdu virinama tiesioginio poliarumo nuolatine srove. Kad siūlėje nesusidarytų porų, argonas maišomas su vandeniliu.

Cirkonis ir niobis yra sunkiai lydūs, atsparūs korozijai metalai. Jie suvirinami gryname argone apsaugant siūlės pagrindą arba kontroliuojamos apsauginės aplinkos kameroje.

Molibdenas yra sunkiai lydus ir kaitrai atsparus metalas. Molibdenas suvirinamas elektronų pluoštu vakuuminėje slėgio kameroje.

4.10.7. Skirtingų rūsių metalų suvirinimas

Virinant skirtingų rūsių metalus sutauropoma ypač brangiai kainuojančių metalų, kurie naudojami tik atskiroms pagrindinėms mazgų detalėms. Kitos mazgų detalės gali būti pagamintos iš pigių metalų. Tačiau skirtingų rūsių metalus virinti sunku, nes skiriasi jų fiziniškės ir cheminiškės savybės. Sunkiai lydūs ir chemiškai aktyvūs titanas, niobis, tantalas, molibdenas 300°C temperatūroje jungiasi su vandeniliu, 600°C temperatūroje – su azotu ir deguonimi. Todėl juos sunku virinti. Lengviau virinti varj su geležimi, titaną su vanadžiu, aluminij su sidabru, nes jie vienas kitame lengvai tirpsta.

Plieno ir aliuminio konstrukcijų sandūrinės, tėjinės, užleistinės ir kampinės jungtys suvirinamos naudojant bimetalo (trimetalo) tarpiklius. Virinant be jų siūlėje susidaro trapūs tarpmetaliniai junginiai. Padengtas cinku plienas su aliuminiu suvirinamas patenkinamai, nes cinkas gerina aliuminio sklidimą. Plienas su aliuminiu suvirinamas gerai, kai plienas padengiamas vario ir cinko arba vario, cinko ir nikelio danga. Suvirinama *TIG* būdu kintamaja srove. Tai yra suvirinamasis litavimas, nes aliuminis yra suvirinamas, o plienas lituojamas. Virinant korozijai atsparų plieną, jo paviršius alituojamas. Jungties stipris būna 110–320 MPa.

Aluminį su variu virinti sunku. Jeigu aliuminio lydinyje yra 4–5 % vario, siūlės metale atsiranda karštųjų plyšių, o jeigu vario yra > 6–8 %, karštieji plyšiai išnyksta, tačiau mažėja siūlės metalo plastišumas, atsiranda šaltujų plyšių. Todėl siūlės metale reikia riboti vario kiekį, vario braunas dengiant alavu, cinku arba sidabru. Tai neleidžia variui sąveikauti su aliuminiu. Be to, neišlydytas varis gerai suvilgomas aliuminiu. Jungtis turi mažą varžą, jos stipris beveik atitinka aliuminio stiprių. Ši jungtis virinama panašiai kaip ir aliuminis su plienu.

Skirtingus metalus galima suvirinti *TIG*, šaltuoju slėginiu, trintiniu, kontaktiniu taškiniu, difuziniu ir kt. būdais. Plienas su variu, žalvariu ir bronza virinamas visais lydomaisiais būdus, panašiai kaip ir plienas. Plienas su titanu suvirinamas elektronpluoščiu, difuziniu ar kt. būdu ([4.10 lentelė](#)).

4.10 lentelė. Dažniausiai naudojami skirtingu rūšių metalų ir jų lydinių suvirinimo būdai

Metalai ir jų lydiniai	Suvirinimo būdai	
	Lydomasis	Slėginis
Plienas su aliuminiu ir jo lydiniuose	<i>TIG</i> ; pluoštinis	Šaltasis slėginis; kontaktinis; trintinis; difuzinis; sprogimu
Plienas su variu ir jo lydiniuose	<i>TIG</i> ; po fliusu; elektrošlakinis; pluoštinis; plazminis	Trintinis; difuzinis; srogimui
Plienas su titanu		Difuzinis; srogimui
Plienas su molibdenu	<i>TIG</i> ; pluoštinis	Šaltasis slėginis; kontaktinis; difuzinis;
Plienas su niobiu		
Plienas su vanadžiu		
Plienas su tantalui	Pluoštinis	
Aliuminis su variu	<i>TIG</i> ; po fliusu	Šaltasis slėginis; kontaktinis; difuzinis; srogimui
Aliuminis su titanu		Trintinis; difuzinis
Titanas su tantalui	<i>TIG</i> ; pluoštinis	
Titanas su variu		
Varis su molibdenu	Pluoštinis	Difuzinis
Varis su tantalui		

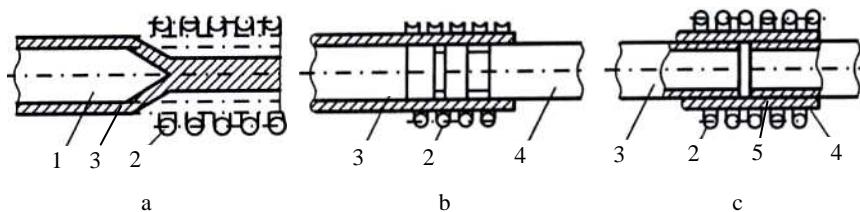
5. NETRADICINIAI APDIRBIMO BŪDAI

5.1. Magnetinis impulsinis apdirbimas

Magnetinis impulsinis apdirbimas yra metalų ir jų lydinių plastinio deformavimo būdas. Stiprų magnetinį impulsinį lauką sukuria momentinė elektros energijos iškrova į induktorių, kuriame yra ruošinys. Trumpą laiką veikiant magnetiniam laukui, išskiriamą energija suvartojoama šiam laukui prasiskverbtį į ruošinį, jam įkaitinti ir deformuoti.

Apdirbant ruošinį magnetiniu impulsiniu būdu, slėgio pasiskirstymas deformuojamo ruošinio viduje skiriasi nuo slėgio pasiskirstymo apdirbant įprastiniais spaudimo būdais. Apdirbant magnetiniu impulsiniu būdu, didžiausia slėgio reikšmė gaunama vidiniame ruošinio paviršiuje, o išoriniame deformuojamo ruošinio paviršiuje slėgis lygus nuliui. Tai leidžia apdirbti ruošinius, kurių išrūkė paviršiai, detales poliruotais paviršiais, jų nepažeidžiant deformavimo metu.

Magnetinis impulsinis metalų apdirbimas naudojamas įvairioms sudėtingos formos detailems iš lakštinių ir vamzdinių ruošinių (plono aliuminio, vario ir jų lydinių, plieno) apdirbti (išvalcuoti, gofruoti, presuoti, vamzdžiams išplėsti ir kt.). Šiuo būdu sudaromi sriegiai plonasieniuose vamzdžiuose, užpresuojami metaliniai dangteliai ant keraminių izoliatorių, sujungiamos metalinės ir nemetalinės dalys, ant lynų užpresuojamos įvörės ir kt. (5.1 pav.). Geriausiai apdirbamos elektrai laidžios medžiagos (sidabras, varis, aluminis ir kt.). Detalių formavimo magnetiniu impulsiniu būdu operacijos gali būti atliekamos vienu su atskyrimo operacijomis (iškirtimu, pramušimu ir kt.).



5.1 pav. Magnetinio impulsinio apdirbimo operacijos: a – vamzdžio apspaudimas ant profilinio strypo; b – vamzdžių sujungimas; c – vamzdžių sujungimas mova; 1 – profilinis strypas, 2 – induktoriai; 3, 4 – vamzdžiai, 5 – mova

Apspaudžiamų vamzdžių iš spalvotųjų lydinių minimalus skersmuo yra 5–10 mm, plieninių vamzdžių skersmuo didesnis kaip 10 mm, išplečiamų vamzdžių skersmuo – 30–40 mm.

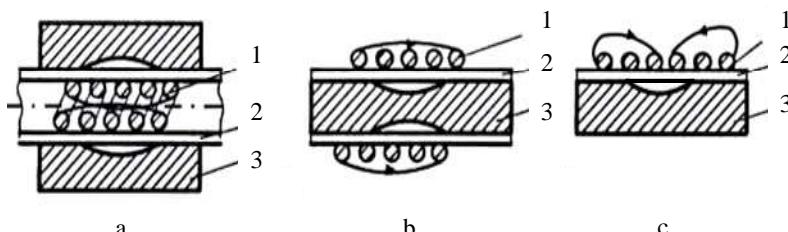
Magnetinio impulsinio apdirbimo privalumai: įrenginiuose nėra judančių ir besitrinančių detalių, lengvai valdoma ir reguliuojama proceso galia, lengva automatizuoti operacijas, galima gaminti sudėtingos formos detales, kurių neįmanoma pagaminti tradiciniais būdais, didelis darbo našumas ir kt.

Didžiausi magnetinis impulsinio apdirbimo trūkumai: mažas naudingumo koeficientas, nes dalis energijos sunaudojama ruošiniui įkaitinti, sunku apdirbti detales su skylėmis ir grioveliais, nepakankamas induktorių ilgaamžišumas, mažas efektyvumas apdirbant mažai laidžias medžiagas, sudėtinga apdirbti storasienius ruošinius.

5.1.1. Štampavimas magnetiniame lauke

Magnetinis impulsinis metalų štampavimas dažniausiai naudojamas vamzdiniam ruošiniams apspausti ir išplėsti, vamzdžiams kalibroti, lakštams štampuoti, sklyems pramušti lakštinėse ir vamzdžių tipo detalėse. Magnetiniu impulsiniu štampavimu gaminamos detalės, kurių gabaritiniai matmenys neviršija 500–600 mm, o storis 4–5 mm.

Šiuo būdu apdirbamos detalės iš įvairių metalų ir jų lydinių. Elektrai laidžių metalų ir jų lydinių detalės forma sudaroma tiesiogiai, o nepakankamai laidžių metalų (pvz., anglinio ir nerūdijančiojo plieno) ruošiniams deformuoti naudojamos tarpinės didelio elektrinio laidumo medžiagos. Tam tikslui magnetinis impulsinis deformavimas atliekamas per elastingą arba skystą terpę.



5.2 pav. Apdirbimo magnetiniame lauke schemas: *a* – vamzdžio išplėtimas; *b* – vamzdžio apspaudimas; *c* – plokščiojo ruošinio štampavimas; 1 – induktorius; 2 – ruošinys; 3 – matrica

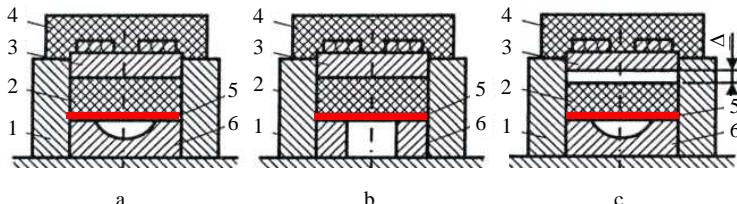
Norint išplėsti vamzdį 2 (5.2 pav., *a*), į jį dedamas cilindrinis induktorius 1, po to vamzdis dedamas į matricą 3. Apspaudžiamas vamzdis (5.2 pav., *b*) dedamas į cilindrinio induktoriaus vidų, o būsimos detalės forma ir matmenys priklauso nuo ruošinio viduje esančio spraudiklio (matricos) matmenų ir formos. Negiliajam ištempimui (5.2 pav., *c*) plokščiasis induktorius tvirtinamas virš lakštinio ruošinio, padėto ant matricos.

Magnetiniu impulsiniu būdu galima štampuoti lakštines detales, kurių paviršius prieš štampavimą yra poliruotas ar padengtas. Sumažėja tokų detalių gamybos savikaina, nes plokščiuosius paviršius poliruoti yra lengviau ir pigiau negu fasoninius.

Šis metodas gali būti taikomas įvairiems įspaudams, įlinkiams, susidariusiems stambiose lakštinėse konstrukcijose, pvz., automobilių sparnuose, durelėse, stoge ir kt., ištaisyti. Šiuo atveju medžiagos deformavimo kryptis yra ne nuo induktoriaus, o iš induktorių, t.y. naudojama pritraukimo jėga, kurią sukuria greitai nykstantis magnetinis laukas.

Štampavimas per elastingą tarpinę terpę (5.3 pav.). I storasienį korpusą 1 dideliams slėgiui atlaikyti dedamas elastinės medžiagos blokas 2. Ruošinys 5 dedamas ant matricos 6. Induktoriaus 4 sudarytas slėgis per judančią plokštelę 3 ir elastingą terpę perduodamas ruošiniui. Judanti plokštelė 3 gaminama iš laidžios elektrai medžiagos (aliuminio, vario ir kt.). Patvaresnė plokštelė gaminama iš plieno arba patvaraus lydinio ir padengiama elektrai laidžių sluoksniu, kuris nukreipiamas į induktoriaus pusę. Elastinės medžiagos blokas 2 dažniausiai gaminamas iš tam tikros rūšies gumos arba poliuretano, kuris plačiai naudojamas lakštams štampuoti.

Štampuojant detales šiuo būdu, judančią plokštelię 3 galima padėti virš elastinio bloko tam tikru atstumu Δ (5.3 pav., c). Veikiant impulsiniam magnetiniam laukui, plokšteliė dideliu greičiu smūgiuoja elastinę terpę ir per ją smūgio banga deformuoja ruošinį.

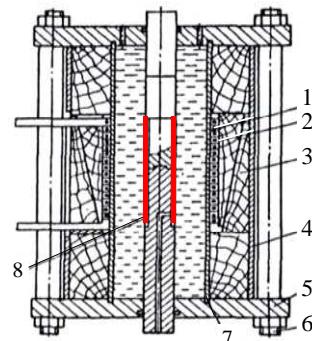


5.3 pav. Magnetinis impulsinis štampavimas per elastinę tarpinę terpę: a – plokščiojo ruošinio ištempimas; b – skylės iškirtimas; c – ruošinio deformavimas smūgine bangą; 1 – korpusas; 2 – elastinės medžiagos blokas; 3 – tarpinė judanti plokšteliė (laidininkas); 4 – induktorius; 5 – ruošinys; 6 – matrica



Magnetiniu impulsiniu iškirtimu galima gauti labai tikslias sudėtingos formos detales. Metodas ypač efektyvus gaminant detales, plonesnes kaip 1 mm (5.4 pav.), kurioms iprastomis salygomis reikalingi sudėtingi ir brangūs štampai. Detalėse nėra užvartų, pasiekiamas tikslumas pagal IT 6–8.

5.4 pav. Magnetiniu impulsiniu iškirtimu gautos žalvario ir bronzos detalės, naudojant elastiną poliuretano bloką



Štampavimas skystoje tarpinėje terpėje (5.5 pav.). Išorinėje diafragmos 7 puseje yra induktorius 1. Indukuojant diafragmoje magnetinį lauką, diafragma dideliu greičiu deformuojama, jos vidiniame paviršiuje susidaro smūginė banga, kuri, pasiekusi kalibruojamąjį vamzdį, apspaudžia ji apie spraudiklį.

5.5 pav. Vamzdžių magnetinis hidraulinis kalibravimas: 1 – induktorius; 2 – induktoriaus izoliacija iš polivinilchlorido juostos; 3 – mediniai įdėklai; 4 – plieninis storasienis vamzdis; 5 – masyvios plieninės plokštės; 6 – varžtai; 7 – cilindrinė diafragma (alumininė arba bronzinė); 8 – kalibruojamas vamzdis

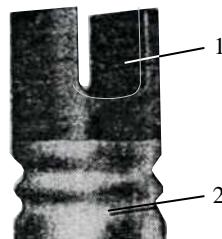
Magnetinis impulsinis apdirbimas vamzdžiams iš aliuminio, anglinio, nerūdijančiojo plieno ir kt. kalibrutuoti gali būti naudojamas, kai kiti būdai neefektyvūs arba per brangūs. Smūginės bangos generavimo technika leidžia gauti ne tik cilindrinių, bet ir kitokios formos bangą. Tam reikia atitinkamos formos induktoriaus ir diafragmos.

5.1.2. Sujungimas magnetiniu impulsiniu būdu

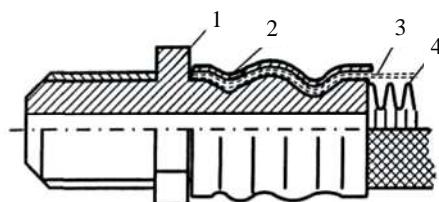
Magnetiniu impulsiniu būdu atliekamos įvairios surinkimo operacijos, pavyzdžiu, metalinių detalių sujungimas su nemetalinėmis ir kt. Palyginti su mechaniniais neišardomujų sujungimų sudarymo būdais, magnetinio impulsinio sujungimo priviliumai: vienu įrankiu (induktoriumi) galima sujungti vamzdines detales su įvairios formos detalėmis, pagamintomis iš kietos ar elastinės medžiagos; padengtų vamzdinių ruošinių surinkimas, kadangi surinkimo metu įrankis nesiliečia su ruošiniu; metalinių vamzdinių detalių sujungimas su keramika, stiklu ir kt.; detalių surinkimas nemagnetinės medžiagos korpuse ir vakuumėje ir kt.

Labiausiai paplitusi magnetiniu impulsiniu būdu atliekama surinkimo operacija yra vamzdinės detalės sujungimas su strypu arba kita vamzdine detalė, apspaudžiant išorinę detalę apie vidinę. Taip galima sujungti skirtingų metalų detales, pavyzdžiu, aliuminio ir plieno. Suvirinti tokias detales labai sunku arba iš viso neįmanoma. Sujungimo stipriui padidinti vidinėje detalėje daromi žiediniai grioveliai (5.6 pav.).

Labai sunku šarvuotus lanksčius vamzdžius sujungti su įvairios formos antgaliais. Ši operacija dažniausiai atliekama suvirinimu. Operacijai supaprastinti ir sujungimų kokybei pagerinti gali būti pritaikytas magnetinis impulsinis sujungimo būdas (5.7 pav.).



5.6 pav. Šakutės sujungimas su vamzdžiu: 1 – šakutė; 2 – vamzdis

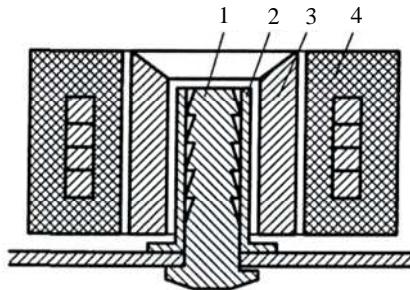


5.7 pav. Šarvuoto vamzdžio sujungimas su antgaliu: 1 – metalinis antgalis; 2 – pagalbinė įvorių; 3 – plieninis šarvas; 4 – lankstus vamzdis

Magnetinis impulsinis surinkimas ypač efektyvus jungiant kabelių metalinius antgalius su kabeliais, pvz., alumininius antgalius su variniais kabeliais. Gaunamas geresnis ir patikimesnis elektrinis kontaktas.

JAV magnetiniu impulsiniu būdu surenkami pneumatiniai automobilių amortizatoriai.

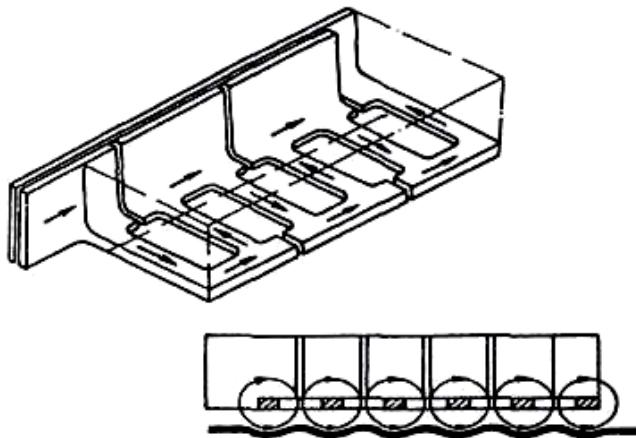
JAV firma „Advanced Kinetics, INC“ kartu su NASA Maršalo kosminių skrydžių centru (Marshall Space Flight Center) naudoja magnetinį impulsinį apdirbimą kniedytiesiems sujungimams gauti (5.8 pav.).



5.8 pav. Kniedės tvirtinimo schema: 1 – kniedė; 2 – įvorė; 3 – kondensatorius; 4 – induktorius

Magnetinis impulsinis metodas naudojamas metaliniams antgaliams užpresuoti ant keraminių izoliatorių, artilerijos sviedinių varinėms juostelėms apspausti, statoriaus plokšteliams elektros variklio korpuose tvirtinti ir kt.

Metaliniam lakštui gofruoti naudojamas daugiaivisjis induktorius (5.9 pav.).



5.9 pav. Daugiaivisjis induktorius lakštui gofruoti

5.2. Apdirbimas elektros srovės impulsų energija

5.2.1. Apdirbimas elektrohidrauliniu smūgiu

Impulsinės smūginės bangos susidarymo skystyje reiškinys, įvykus elektros srovės išlydžiui vadinamas elektrohidraulinio smūgio efektu. Ši efekta galima panaudoti gaminiamis štampuoti (lenkti, ištempti ir kt.), uolienoms smulkinti, liejiniamis valyt ir kt. Impulsinė iškrova tarp skystyje panardintų elektrodų vyksta dėl aukštosios įtampos srovės impulso į elektrodus. Įtampai pramušus elektrodų tarpelį, susidaro elektrai laidus iškrovos kanalas, iš dalies pripildytas jonizuotu duju.

Viena svarbiausių elektros iškrovos laidžiame skystyje charakteristiką yra iškrovos kanalo susidarymo trukmė, kuri turi būti artima išlydžio trukmei (dešimtimis ar šimtams mikroseundžių). Ilgėjant iškrovos kanalo susidarymo trukmei, didėja energijos nuostoliai. Išlydžiui tarp elektrodų skystyje palengvinti tarpelis dažniausiai trumpai sujungiamas 0,1–1 mm skersmens metaline vielele, t.y. panaudojamas sprogstančio laideninko efektas. Šiuo atveju naudojami gerokai mažesnės įtampos (1–5 kV) srovės impulsai. Esant sprogstamajai vielelei, atstumas tarp elektrodų gali būti didesnis kaip 300 mm, o skysčio laidumo itaka iškrovai gerokai sumažėja.

Smūgio jėgai (momentiniam išgarinimui išlydžiu) sukurti ir perduoti nuo šaltinio į gaminį dažniausiai naudojamas techninis vanduo. Nors elektrodų įtampa siekia 30–50 kV, pramušimo kanalus visada kreivas. Iškrovą sudarant sprogstamajai vielele, gaunamas geometriškai tiesus (cilindrinis su sferiniai galais) arba kitos reikiamos geometrinės formos iškrovos kanalas. Įtampai pramušant vandenį, susidarančius kanalus yra dešimtų milimetro dalių skersmens, o naudojant vielelę, kanalus tampa lygus jos skersmeniui. Iškrovos kanale susidariusios plazmos temperatūra siekia iki 25000 °C, kanalo skersmuo per $(0,1\text{--}0,3)\cdot10^{-7}$ s padidėja iki 1–3 mm vidutiniu 10^4 m/s greičiu. Toliau kanalus plinta lėčiau ir priklauso nuo srovės impulsu parametru. Iškrovos kanalo periferijoje esantis vanduo tuo pat išgarinamas. Duju ir garų burbule (esant vielai) ar duju burbule (kai kanalus jonizuojamas baterijos įtampa) slėgis siekia iki 10 GPa, todėl susidaro smūginė banga, kuri panaudojama gaminui deformuoti, smulkinti ir kt. Smūginė banga vandenye gali plisti 3000 m/s greičiu.

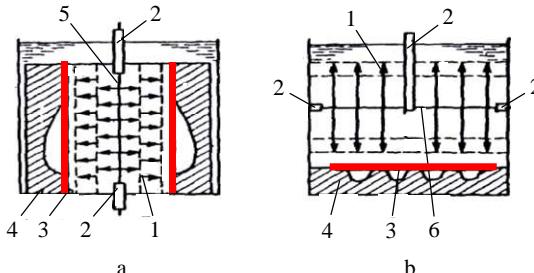
Pagrindinės elektrohidraulinio smūgio efekto panaudojimo sritys:

- plastiškų medžiagų deformavimas: štampavimas, lenkimasis, ištempimas, kalimas, išpaudimas, kalibravimas ir kt.; vamzdžių išvalcavimas ir jų ipresavimas jungėse (jungiamoji detalės dalis, dažniausiai plokščias žiedas arba diskas su tolygiai išdėstytomis skyliemis varžtams ar smeigėms, vartojamas velenams, vamzdžiams, rezervuarams jungti); metalinių detalių ir gaminio paviršiaus sukietinimas; detalės matmenų atkūrimas; ivorės tipo detalių kalibravimas;
- tripių medžiagų smulkinimas ir valymas: uolienų, mineralų, deimantų ir kitų tripių medžiagų trupinimas ir smulkinimas; liejinių valymas.

5.2.1.1. Elektrohidraulinis štampavimas

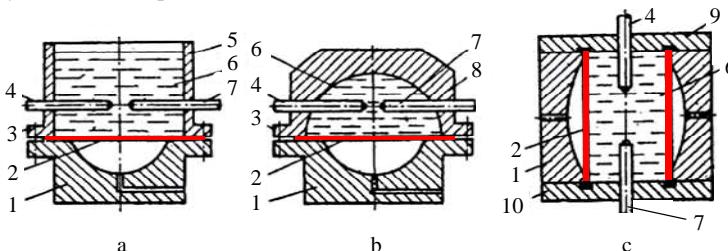
Elektrohidraulinio štampavimo privalumai: paprasta įrenginių konstrukcija; nepažeidžiamas ruošinio paviršius, nes apdorojama be puansono (skysčiu); tolygiai apkraunamas ruošinys; galima deformuoti medžiagas, kurios sujra deformuoojant jas tradiciniiais būdais aplinkos temperatūroje; sunkiai deformuojamuosius metalus galima apdirbi hidraulinį smūgių seriomis; didelė gaminamų detalių ivairovė ir kt.

Keičiant atstumą tarp elektrodų galų, galima gauti skirtingų formų smūgio bangos frontą (5.10 pav.). Jei atstumas tarp elektrodų pakankamai mažas, formuojamas sferinis smūgio bangos frontas. Jei tarp elektrodų yra kelių centimetrų tarpas, susidaro cilindrinės formos frontas. Esant dideliems atstumams (daugiau kaip 20 mm), vandens pramušimas įtampa tampa nestabilus, todėl elektrodų galai sujungiami plona metaline vielele. Įvairios smūginės bangos formos (plokščiosios, cilindrinės, sferinės ir kt.) gaunamos panaudojus atitinkamos formos vielą (arba kelias vielas), foliją ar tinklelių.



5.10 pav. Hidraulinio smūgio bangų formavimo schemas: *a* – cilindrinės smūgio bangos; *b* – plokščiojo smūgio bangos; 1 – smūgio bangos frontas; 2 – elektrodai; 3 – ruošinys; 4 – matrica; 5 – sprogstamoji vielelė; 6 – vielinis tinklelis

Deformuojamas ruošinys (5.11 pav.) dedamas ant matricos ir prispaudžiamas (užsandarinamas). Iš apatinės ertmės išsiurbiamas oras (ruošinio deformavimui palengvinti). Viršutinė ertmė pripildoma vandens. Šioje ertmėje tam tikru atstumu nuo ruošinio išdėstyti elektrodai (teigiamasis ir neigiamasis) sujungiami su įrenginio impulsų generatoriumi. Vykstant iškrovai, tarp elektrodų susidaro skysčio smūginė banga, kuri deformuoja ruošinį. Norint efektyviau panaudoti iškrovo energiją, darbiniai elektrodai išdėstomi uždarose kamerose (5.11 pav., *b*) arba ruošinio viduje (5.11 pav., *c*). Taip galima apdoroti iki 5 mm storio metalo ląkštus. Ruošinio deformavimo smūgine banga greitis yra didesnis kaip 100 m/s.



5.11 pav. Elektrohidraulinis ruošinio formos keitimasis: *a* – plokščiojo ruošinio atviroje ertmėje; *b* – plokščiojo ruošinio uždarose darbo kamerose; *c* – cilindrinio ruošinio uždarose darbo kamerose; 1 – matrica; 2 – ruošinys; 3 – prispaudiklis; 4; 7 – elektrodai; 5 – talpykla; 6 – vanduo; 8 – uždara kamera; 9; 10 – viršutinis ir apatinis dangteliai

Pagrindinis elektrohidraulinio štampavimo įrankis yra elektrodai, kurie dažniausiai gaminami iš plieno ir žalvario. Elektrohidraulinio štampavimo matrica gaminama iš plieno, tačiau priklausomai nuo gamybos apimties matrica gali būti pagaminta iš epoksidinės dervos (kai štampuojama ne daugiau kaip 15–20 detalių). Kai štampuojamų detalių leidžiamas matmenų nuokrypis (tolerancija) yra didelis, matricą galima gaminti iš cinko ar aliuminio lydinių (galima matricos deformacija). Esant 0,05–0,1 mm leidžiamam gaminio matmenų nuokrypiui, štampuojama tik plieninėse matricose.

5.2.1.2. Smulkinimas ir valymas

Elektrohidrauliniu smūgiu smulkinamos tik trapios medžiagos (betonas ir kt.). Skiriami du apdirbimo būdai: išorinis ir vidinis.

Išorinis smulkinimas. Išorinio smulkinimo atveju vienas iš elektrodų tvirtinamas virš smulkinamosios medžiagos, kuri pilama ant antriojo elektrodo. Elektrodų įtampos impulsai sukelia išlydžius, kurių mechaninis poveikis (hidrauliniai smūgiai) skaldo smulkinamają medžiagą. Smulkinama medžiaga, pvz., uoliena, byra pro groteles (sieta), o pratekantis vanduo nukreipia daleles į rūšiuotuvą. Keičiant sieto tankumą, keičiamas smulkinamos medžiagos dalelių dydis. Šiuo būdu smulkintų dalelių briaunos, susidarančios trapiai suyrant gabalam, yra aštros. Iškrovos energija smulkinant medžiagas būna nuo keliolikos iki keliašeim kartų mažesnė nei štampuojant, tačiau impulsų dažnis didesnis (optimalus iškrovų dažnis siekia 15–25 Hz ir daugiau).

Vidinis smulkinimas. Smulkinamame kūne, pvz., akmenyje, išgręžiama kiaurymė, kuri pripildoma vandens. Tada į kiaurymę įkalami aukštosios įtampos generatoriaus elektrodai, kuriais skaldomo akmens viduje esančiame vandenye gaunamas išlydis. Vidinis smulkinimas naudojamas rečiau.

Valymas vyksta taip pat kaip ir smulkinimas, tačiau naudojami mažesnės energijos išlydžiai vandenye. Dažniausiai valomi liejiniai (šalinami liejimo mišinio ir gurgučių likučiai).

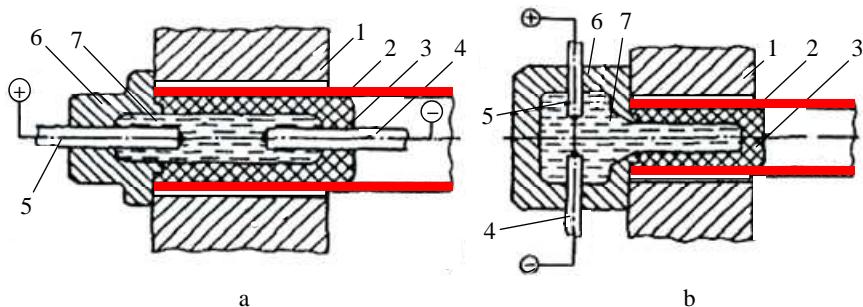
5.2.1.3. Vamzdžių išvalcavimas

Vamzdžiams įtvirtinti gali būti panaudotas vamzdžių elektroimpulsinis valcavimas kiaurymėje, kai smūgiui perduoti naudojamas skystis (elektrohidraulinis valcavimas) ir sprogdinamoji viela (valcavimas srovės impulsu).

Elektrohidraulinis vamzdžių išvalcavimas. Elektrohidrauliniu smūgiu vamzdžiai įtvirtinami šilumokaičių ir katilų jungėse (flansuose), jų tarpinėse plokštėse. Elektrohidrauliniu valcavimu gaunamas 20–30 % didesnis sujungimo stipris nei mechaniniu presavimu, o našumas padidėja iki 30 kartų.

Naudojami keli vamzdžių elektrohidraulinio valcavimo būdai ([5.12 pav.](#)) ir vienkartiniai bei daugkartiniai įrankiai (daugkartinės elektrohidraulinės galvutės naudojamos didelio skersmens vamzdžiams tvirtinti).

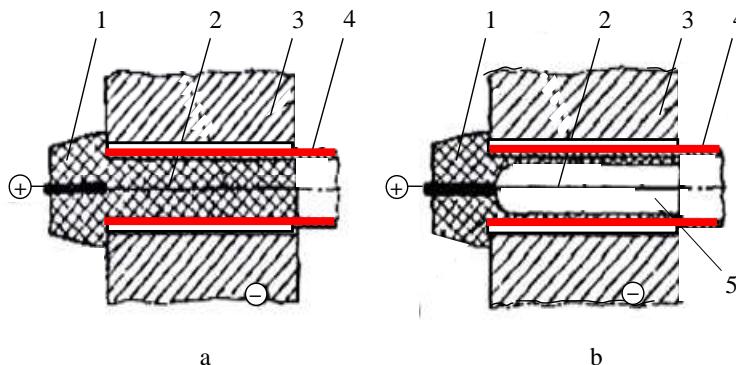
Vamzdžiu ištvirtinti jungėje į valcuojamą vamzdžio galą įdedama elektrohidraulinė galvutė ([5.12 pav., a](#)), kurios vandens pripildytame elasticame korpusė yra elektrodai (neigiamasis ir teigiamasis), sujungti su išenginio kondensatoriu baterija. Iškrovos vandenye metu susidaręs didelis slėgis deformuoja elasticą galvutės korpusą, kuris išvalcuoja jungėje esantį vamzdį. Kai valcuojami mažo skersmens vamzdžiai (iki 15 mm), iškrova vyksta tarp elektrodų, esančių šalia vamzdžio ([5.12 pav., b](#)).



5.12 pav. valcuojamo vamzdžio viduje; *b* – darbiniai elektrodai yra šalia valcuojamo vamzdžio; 1 – jungė (flanšas); 2 – vamzdis; 3 – elastinga elektrohidraulinė galvutė; 4, 5 – darbiniai elektrodai; 6 – elektrohidraulinės galvutės korpusas; 7 – vanduo

Siekiant didžiausio sujungimo sandarumo ir stiprio, radialinis tarpelis tarp vamzdžio ir kiaurymės ($0,1\text{--}0,3$ mm) parenkamas priklausomai nuo vamzdžio skersmens.

Vamzdžių išvalcavimas srovės impulsu. Vamzdžiams jungėje tvirtinti gali būti naudojamas elektroimpulsinis valcavimas sprogdinamaja viela, esančia vienkartinėje elastingoje galvutėje (5.13 pav.). Kondensatorių baterijos energija per kelias mikrosekundes išsiskiria galvutės, esančios valcuojamame vamzdžyje, sprogstamojoje vieloje. Besiplečiantys vielelės garai galvutėje (ar užpilde) sukelia smūginę bangą, kuri išplečia sklyje esantį vamzdį ir sudaro reikiamą įvaržą.



5.13 pav. Elektroimpulsinio valcavimo galvutės: *a* – be užpildo; *b* – su užpildu; 1 – galvutės apvalkalas; 2 – sprogstamoji viela; 3 – vamzdžio jungė; 4 – vamzdis; 5 – užpildas

Pagrindinės galvučių dalys yra viela, apvalkalas ir užpildas. Vielos medžiaga (aluminis, varis, nichromas, plienas ir kt.) parenkama pagal valcuojamo vamzdžio matmenis ir medžiągą. Apvalkalas gaminamas iš lengvai suyrančių sprogstant, turinčių geras izoliacines savybes ir efektyviai perduodančių smūgines bangas medžiągų (polietileno, gumos ir kt.). Apvalkalas galvutėms su užpildu gaminamas iš polietileno, o kaip užpildas tarp vielelės ir sielenės naudojamas vaškas, parafinas ir kt. dielektrikai. Galvutė turi būti trumpesnė už kiaurymę, į kurią presuojamas vamzdis. Kitaip vamzdis išplečiamas už kiaurymės ribų.

5.2.2. Elektroimpulsinis užpurškimas

Elektroimpulsinis užpurškimas yra impulsinis padengimo būdas, kai elektros srovei laidžių medžiągų dangoms sudaryti panaudojamas jų elektrinis sprogimas. Sprogstamieji laidininkai naudojami storoms (0,3–0,4 mm) metalo dangoms užpurkštį ir plonomis (0,001–0,05 mm) dangoms užgarinti. Storomis dangomis sustiprinami mašinų detalių darbiniai paviršiai, didinamas paviršių atsparumas diliui, atkuriamas nudilęs sluoksnis, o plonomis dangomis dažniausiai dengiami elektronikos pramonės gaminių paviršiai. Išpurškiant vielą didelio tankio srovės impulsu, gaminami ypač smulkūs metalo milteliai. Pagrindinė įrenginio elektrinės grandinės dalis yra aukštosios įtampos srovės impulsų generatorius, veikiantis impulsiniu režimu. Šis reiškinys naudojamas branduoliniam povandeniniams sprogimams modeliuoti ir kt.

Užpurškimo etapai:

- laidininko išpurškimas (vielos pavertimas garų ir lašelių srautu);
- garų ir lašelių srauto plitimas;
- dangos formavimas.

Laidininku praleidžiant aukštos įtampos (5–30 kV) galingą (10^{11} – 10^{12} A/m²) tankio) srovės impulsą (10^{-4} – 10^{-7} s trukmė), viela ikaista, lydosi, užverda, perkaista (temperatūra gali siekti nuo keliolikos iki kelių dešimčių tūkstančių laipsnių), dalis jos išgaruoja, kita dalis virsta mikrometrų dydžio lašelių aerosoliu. Pradžioje garuoja paviršius, o paskui kaista ir lydosi gilesni sluoksnių, kadangi srovės tankis paviršiuje yra didesnis nei laidininko viduje. Dėl labai trumpo proceso ir medžiagos inertumo įvyksta terminis smūgis (srovės impulso poveikis vielai). Susidaręs suslėgtų garų ir lašelių aerosolio srautas pasiekia paruoštą padengti paviršių, garai kondensuoja, lašeliai sukimba su paviršiumi ir taip suformuojama danga. Vielos išpurškimas sukelia cilindrinę smūginę bangą, plintančią iki 1500 m/s greičiu, vielos garų srautą (600–900 m/s) ir metalo lašelius, plintančius 500–600 m/s greičiu. Jei vielą veikianti energija užpurškimo procesui per maža arba ji pernelyg lėta, viela lydosi, bet nesprogsta; jei ji per didelę, viela išgarinama (naudotina tik vakuumė). Be ryškaus blyksnio sprogimui būdingas akustinis impulsas (daugiau kaip 130 dB).

Išgaravusio ir lašeliais pavirtusio (įkaitusio iki virimo temperatūros) metalo kiekį santykį ir lašelių dydį lemia elektros srovės impulso stipris. Jį didinant, o impulso siuntimo trukmę trumpinant, išgaruoja daugiau metalo, susidaro labiau įkaitinti, mažesnio skersmens ir greičiau judantys lašeliai. Jei iškrovos impulsas silpnas, danga būna nelygi, prastai sukibusi, nes dalelių greitis ir temperatūra nepakankami; jei impulsas per stiprus, dangoje susidaro nelygios juostos, sukibimas silpnas, nors danga, formuojama mažų lašelių, būna glotni.

Užpurškiant dangą ore, normalaus slėgio apsauginėje ar inertinėje aplinkoje, dangą formuoja lašeliai, kadangi garus nuo dengiamo paviršiaus atstumia atsimušusi smūginė banga. Todėl dujinėje aplinkoje užpurškiamos storos dangos, suformuotos iš įvairaus dydžio lašelių, o vakuume – plonos, formuojančios kondensuojant garus. Geros kokybės dangos gaunama, kai 40–45 % išpurkštose vielose išgaruoja, o kita dalis išsilydo ir virsta lašeliais.

Paviršius dengiamas, kai nuo jo nuvalytos rūdys, oksidų plėvelės, riebalai ir kt. teršalai, pašalinta drėgmė, padidintas šiurkšumas. Užpurškiami perkaitinti iki 5 μm dydžio lašeliai ant dengiamo paviršiaus sudaro 0,005–0,015 mm metalo sluoksnį, kuris aušta apie $2 \cdot 10^7$ $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ greičiu. Danga yra smulkiagrūdės struktūros (grūdelių dydis 0,1–1 μm), dėl smūginės plastinių deformacijų gaunamas mažas dangos akytumas, didelis kietis ir geras sukibimas.

Elektroimpulsinio užpurškimo pri val umai:

- vienu impulsu formuojamas 0,005–0,015 mm sluoksnis, kelias ciklais – 0,1 mm (bendras dangos storis siekia 0,3–0,4 mm);
- plieno dangų sukibimo stipris siekia iki 100 MPa, o formuojant kryptingą dalelių srautą, – iki 200 MPa;
- užpurškiant dengiamoji detalė termiškai nepaveikiamai;
- galima gauti visų metalų ir jų lydinį, taip pat puslaidininkų, dangas;
- keičiant išpurškiamą vielą gaunamos kompozicinės dangos.

Trūkumai: naudojama aukšta įtampa, išgaruoja gana daug medžiagos, siaura procesų taikymo sritis (vidiniai cilindriniai paviršiai).

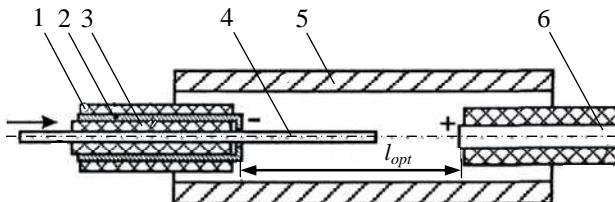
Nustatyta, kad plieno C45 ir elektroimpulsinio užpurškimo vario bei žalvario CW508L (CuZn37, arba JI63) dangų tarpusavio porų trinties koeficientas yra 5–10 kartų mažesnis, palyginti su identiškos sudėties valcuotais metalais. Dangų kietis, palyginti su išpurškiamos vielos kiečiu, taip pat pakinta, pavyzdžiui, titano dangų kietis 240 HV (vielos kietis 160–250 HV), tantalio dangų kietis apie 280 HV (vielos kietis 125 HV), volframo – 550 HV (vielos 450–500 HV). Šis pokytis paaškinamas struktūros pokyčiais. Mažo anglingumo plieno dangų kietis nesiskiria nuo elektroimpulsiniu užpurškimu suformuotų dangų kiečio, tačiau anglingo, nerūdijančio plieno dangų kietis, padengiant kryptingai išpurškštų srautu, yra 32–40 % didesnis.

Lengvai gaunamos sunkiai (*W, Mo, Ti, Ta* ir kt.) ir vidutiniškai (*Cr, Ni* ir kt.) lydių metalų ir jų lydinį dangos. Dangų sudėtis dažnai skiriasi nuo išpurkšto laidininko sudėties. Tyrimai parodė, kad dviejų komponentų – plieno (0,6 % C) ir molibdeno (*Mo*), plieno ir volframo (*W*), plieno ir tantalo (*Ta*) – dangose, didėjant *Mo*, *W*, *Ta* kiekiui, mikrokietis mažėja iki šių komponentų kiečio. Šių dangų atsparumas abrazyviniam dilimui 3–4 kartus viršija atskirų metalų atsparumą dilimui, kai dangose plieno ir *Mo* (*W* ar *Ta*) santykis yra 2:1.

Elektroimpulsinis užpurškimas naudojamas vidiniams paviršiams padengti. Galima padengti labai gilias (tarp jų ir aklinasių) kiaurymes arba tik reikiamą jų paviršiaus dalį. Skylės centre išpurkštose vielos dalelės į paviršių krinta stačiu kampu, todėl pagerėja sukibimas. Plokščumos dengiamos retai, nes susidaro nevienodo storio ir sukibimo dangos (esant 5–6 laipsnių dalelių kritimo kampui, lašeliai slysta paviršiumi). Ši trūkumą iš dalies kompenzuoja išpurškiamos srauto kreipikliai (aukštos įtampos elektrodai, esantys vienoje linijoje su išpurškiamą vielą), tačiau jie naudojami tik plonoms dangoms vakuume sudaryti.

Esant mažam padengimo atstumui, danga būna šiurkštī, jei atstumas per didelis, išpurštos vielos lašeliai aplenkia garus, todėl oksiduoja ir prastai sukimba. Dar labiau padidinus atstumą, detalės paviršius bus padengtas tik visiškai oksiduotu sluoksniu. Esant optimaliam išpurškimo atstumui, pirmiausiai paviršiu pasiekia smūginė oro banga, orą išstumiantys garai, o vėliausiai – metalo lašeliai. Optimalus išpurškimo atstumas priklauso nuo išpurškiamos vielos skersmens.

Išpurškiamoji viela ar folija tarp elektrodų tiekama ištisa (5.14 pav.) arba sukarpyta reikiamą dydžio atkarpomis. Grandinės elektrodai išpurškiamajai viela sijungiami priartinant ją atstumu, mažesniu už savaiminio jonizavimo dydį. Išpurškiamos vielos skersmuo ne didesnis kaip 2,5 mm.



5.14 pav. Elektrodų panaudojimas gilioms atviroms kiaurymėms dengti: 1 – kabelio izoliacija; 2 – elektrodas (–); 3 – vidinis kabelio izoliacijos sluoksnis; 4 – išpurškiamoji viela; 5 – dengiamoji detalė; 6 – elektrodas (+)

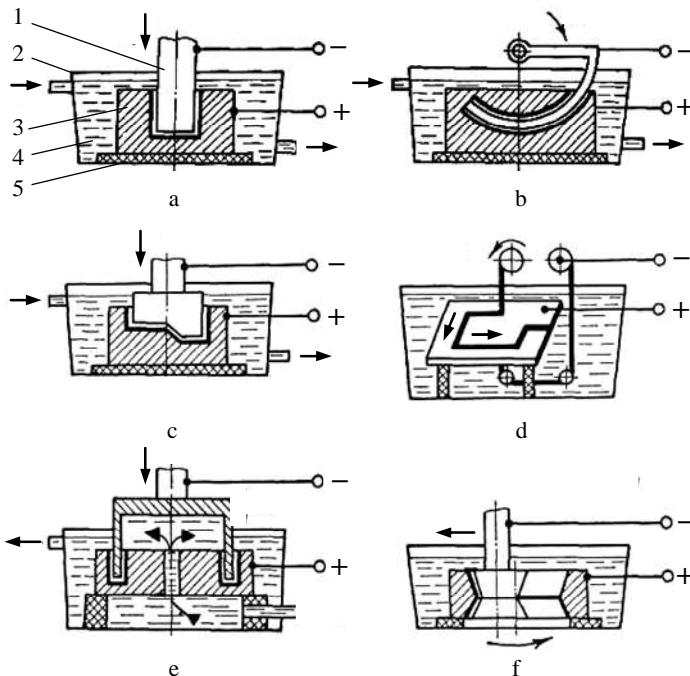
5.3. Elektrokibirkštinius apdirbimas

Elektrokibirkštinius apdirbimas (EKA) yra vienas iš daugelio procesų, kuriam eina naudojama termoelektrinė energija tam tikrai ruošinio medžiagos daliai išlydyti arba išgarinti.

Pagrindiniai EKA principai. Elektrokibirkštino 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 išspjauti ruošinius iš lašto, naudojant vielinių arba juostinių elektrodą, atliki plokščiai, apvalūjį ir vidinių šlifavimą, pjaustyti ruošinius, ženklinti ir kt. Apdirbant apvalias skyles, elektrodas gali būti sukamas apie savo ašį.

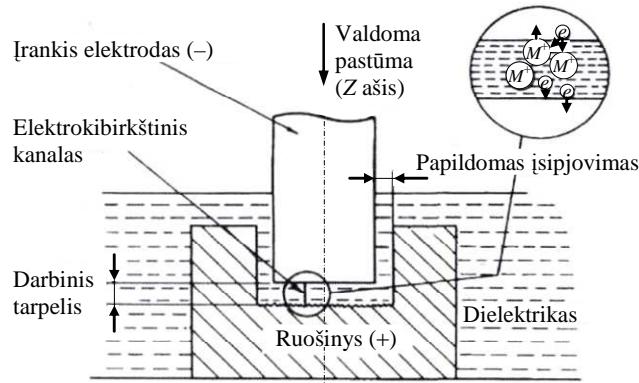
Elektrinė iškrova (impulsinis kibirkštinius išlydis) vyksta dielektriniame skystyje tarp įrankio elektrodo (katodo) ir elektriškai laidžios ruošinio medžiagos (anodo), kai tarp jų praleidžiama impulsinė elektros srovė. EKA metu į dielektrinį skystį (parafiną, vaitspiritu, mineralinę alyvą) panardintą įrankį nuo ruošinio skiria mažas tarpelis (0,01–0,5 mm). Iškrovai tarp elektrodų dielektriniame skystyje suformuoti naudojama įtampa viršija tarvelio pramušimo įtampą (prieklauso nuo tarvelio dydžio ir dielektrinio skysto izoliacinių savybių). Tarp elektrodų įkaitusios dujos jonizuojasi ir virsta plazma (8000–12000 °C temperatūroje jonizuotos dujos), susidedančia iš metalo atomų M (išgarsintų 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 ionizuojasi. Nepertraukiamai generuojant kibirkštį, toliau šalinamas metalas, kol atstumas tarp elektrodų yra tokis, 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 nutruksta 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 filtru grąžinamas atgal į darbo zoną.



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

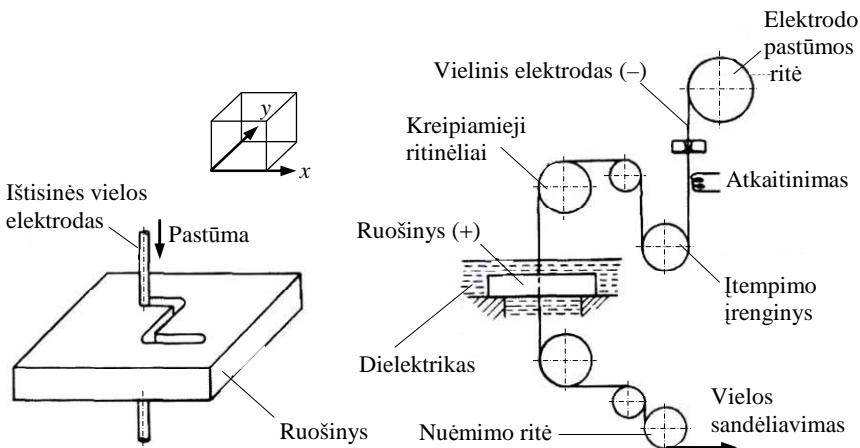
Ruošinio mechaninės charakteristikos (kietis ir tąsumas), nuo kurių priklauso medžiagos apdirbamumas, *EKA* procesui įtakos neturi, kadangi metalas šalinamas jí išgarinant. Nuo įrankio ir ruošinio nuimamas nevienodas medžiagos kiekis. Jis priklauso nuo polišumo, šiluminio laidumo, medžiagų lydymosi temperatūros,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



5.16 pav. Elektrokipirkštinio apdirbimo principas

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

Elektrodas gali būti pasvires 1,5° kampu statmenis 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 iprastinėse programinėse staklėse.



5.17 pav. Vielinio elektrodo perstūmimo schema

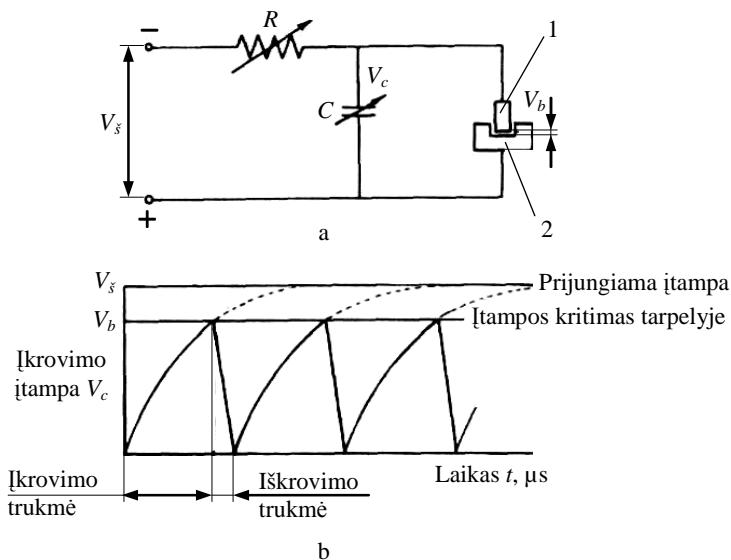
Kibirkštį generuojančios grandinės. Elektroerozinio apdirbimo metu nuo ruošinio nuimant metalą, elektrokibirkštinėse staklėse būtina generuoti kibirkštį optimaliomis apdirbimo sąlygoms sudaryti. Šie reikalavimai patenkinami prijungiant atitinkamą įtampą, leidžiančią pradėti ir palaikyti iškrovos procesą. Būtina sistema šios iškrovos intensyvumui, trukmei ir ciklams valdyti. Paprastai tai apima 2–1600 μs 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 apdirbtą paviršiaus kokybę. Trūkumai: iškrovos vyksta esant aukštai įtampai, todėl gerokai sunkėja jos valdymas, nuimama mažai metalo, intensyviai dyla elektrodas.

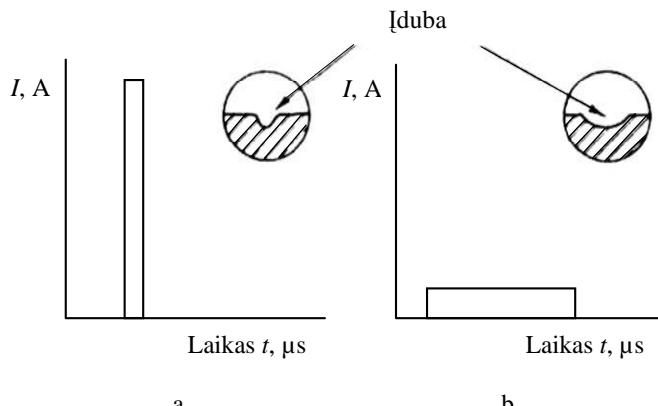
Pradedant operaciją, kondensatorius yra išskrautas. Jis per reostatą išskrauna iš nuolatinės srovės šaltinio ir tarp elektrodo ir detalės sudaroma reikiama pramušimo įtampa. Kai kondensatoriaus V_c pasiekia įtampos V_b kritimo lygi darbiname tarpelyje, praleidžiant srovę per tarpelį kondensatorius išskrauna ir metalo dalelė atskiriamas nuo ruošinio. Kibirkštis nėra nusistovėjusi, nes kondensatorius išskrauna greičiau nei gali išskrauti. Ciklas nuosekliai kartojasi, kol baigiamā operacija.

Kuo didesnė V_b vertė nuolatinės srovės šaltinio V_s atžvilgiu, tuo didesnė iškrovos energija (iškrovos energija, o kartu ir nuimamo metalo kiekis didėja didinant kondensatoriaus talpą). Optimali V_b vertė, nuimant didesnius metalo kiekius, sudaro apie 73 % V_s . Maitinimo įtampa siekia 200–400 V. Didinant varžą, ilgėja iškrovos 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 impulsu generavimo grandinė. Atskirų parametru tarpusavio priklausomybė, ribotas elektrodo medžiagų assortimentas 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 igauna 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 dielektriniams skysčiui dejonizuoti ir teršalambs pašalinti iš jo. Iškrovos energijos pastovumas leidžia gerokai padidinti apdirbimo efektyvumą.

Didesniems metalo kiekiams nuimti ir paviršiu i geriau apdirbtis daugelis staklių turi dviejų tipų elektros impulsų generavimo grandines – relaksacines ir impulsines.

Įrankis elektrodas. Kiekviena elektrai laidai medžiaga gali būti panaudota kaip įrankis elektrodas. Jis turi būti standus, pasižymeti nedidele santykine 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 reikiama metalo kiekį, apdirbtos 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.

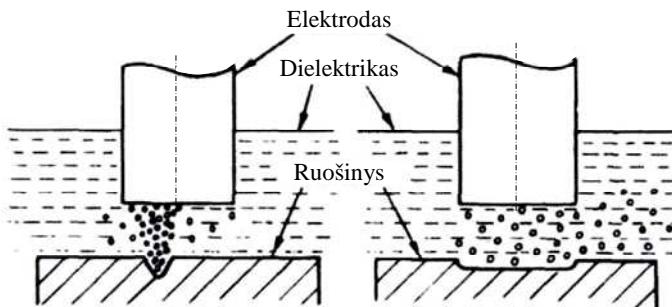
Dielektrinis skytis. Dielektrinis skytis sudaro būtinas sąlygas iškrovai atsirasti, aušina elektrodus ir erozijos produktus, iš tarpelio pašalina nepageidaujamus komponentus, sumažina šonines elektrines iškrovas tarp įrankio ir ruošinio, dėl to tiksliau apdirbama. Skytis turi būti nebrangus, nelabai klampus (gerai tekėti), užsiliepsnoti tik aukštoje temperatūroje (žema skytio virimo temperatūra riboja nupjaunamo metalo kiekį), būti netoksiškas, nesukelti korozijos, pasižymeti 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 lentelę](#)). 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 skysčis	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 mažiemis nuokrypiams, aštrioms briaunoms, pvz., štampavimo įrankių gamybai ir kt.
Parafinas	50	Gerų savybių dielektrikas, nebrangus. Naudojamas vidutinės apimties darbams, pvz., plastmasių liejimo formų, štampavimo įrankių, puansonų gamybai ir kt.
Skysta alyva	130	Naudojama didelės galios elektrokibirkštinėse staklėse, esant sudėtingesniams filtravimui; didelės apimties darbams, paruošiamajam apdirbimui, pvz., tūrių štampų gamybai

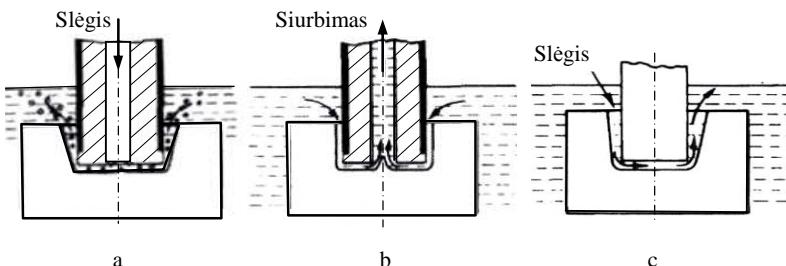
Cirkuliacinės sistemos. Elektrokibirkštinėse staklėse labai svarbu užtikrinti gerą skysčio cirkuliaciją ir filtravimą. Apdirbimo pradžioje naujas dielektrikas būna švarus, todėl pasižymi geresnėmis izoliaciinėmis savybėmis nei turintis nuosėdų. Prasidėjus elektros iškrovai, susidariusios nuosėdos pablogina 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 tarvelio 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 tarvelio pašalinimas: a – išpurškiamaja srove; b – įsiurbiamaja srove; c – šonine srovė

Paviršiaus struktūra. Kadangi iškrovos temperatūra yra aukšta (8000–12000 °C), ji gali paveikti (sukietinti, suminkštinti) kai kurių apdirbamų detalių paviršinius sluoksnius. Termiškai 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 skirtinges galios, nuimamo metalo tūris gali kisti nuo 0,01 iki 150 mm³/s (naudojant skirtinges ruošinius ir skirtinges elektrodus).
- Apdirbimo užlaida.* Nuimama 0,005–0,2 mm užlaida šonui. Minimalus suapavalinimo spindulys lygus užlaidos dydžiui.
- Kūgišumas.* Gaunamas 0,05–0,5 mm kūgišumas 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.* Apdirbtu paviršiaus šiurkšumas $R_a = 1–2 \mu\text{m}$. Galima pasiekti $R_a=0,25–1,1 \mu\text{m}$.

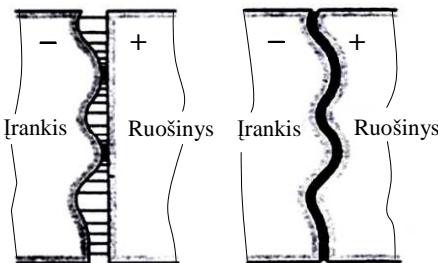
Elektrokibirkštiniu būdu apdirbamos įvairios elektrai laidžios medžiagos, bet tiksliausia šiuo būdu apdirbtai kietlydiniai, tantalas, volframė, molibdenas, sunkiai pjaunamus metalus ir jų lydinius. EKA būdas plăciai naudojamas štampams, pres-formoms, filerėms, vidaus degimo variklių detaliems, pjovimo 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 elektrolitui (vykstant elektrolizei). Proceso metu ruošinys tirpsta todėl, kad jo paviršiuje vyksta cheminės reakcijos ir paviršinis metalo sluoksnis virsta cheminiais junginiais. Pašalinamam nuo anodo metalo sluoksnui (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 viršunėse, kur mažiausias atstumas iki ruošinio (5.22 pav.). Vėliau metalo šalinimo ruošinio paviršiuje sparta suvienodėja.



5.22 pav. Elektrocheminio apdirbimo principas

(pavyzdžiui, nerūdijančiojo plieno); reikalingas galinges 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 hidrostatiniu slėgiu. Nuo elektrolito priklauso, kokia vyks cheminė reakcija. Jis perneša išskyrusią šiluminę energiją ir reakcijos produktus, ausina 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 ($NaNO_3$) tirpalas. Elektrolito varža priklauso nuo temperatūros ir koncentracijos, todėl, gaminant tikslias detales, būtina išlaikyti pastovią temperatūrą (jai kintant, keičiasi tarpas tarp įrankio ir detalės).

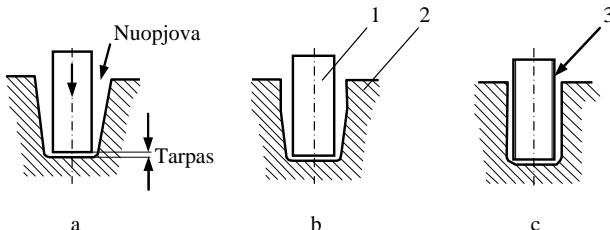
ECA naudojamas grūdintam plienui ir kitims metalams apdirbti, neapvalioms skylėms gręžti, nelygiems paviršiams liejimo formose formuoti ir kitoms metalo apdirbimo operacijoms, kurias sunku atlikti iprastiniais būdais. ECA būdu gaminamos liejimo formos, šlifuojami ir poliruojami paviršiai.

Įrankio forma. ECA įrankio forma neatitinka tikslaus savo atvaizdo detaleje, 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

Privalumai: procesas labai nausus (nepriklausomai nuo detalės kiečio ir fizikinių savybių galima pasiekti 10–20 cm^3/min metalo šalinimo sparta), elektrocheminiu būdu apdirbtose detalėse nėra vidinių įtempių ar temperatūrinų 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

medžiaga, beveik visa srovė praleidžiama įrankio judėjimo kryptimi. Maža dalis srovės teka į detalės šonus įrankio apačioje, todėl skylė būna didesnio skersmens nei įrankis.

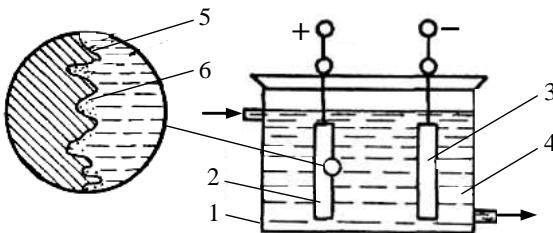


5.23 pav. ECA suformuotos kiaurymės formos priklausomybė nuo įrankio paruošimo:
 a – nepadengtas elektrodis, b – oksiduotas elektrodo paviršius, c – plonu silicio karbido arba silicio nitrido sluoksniu padengtas elektrodis; 1 – cilindro formos įrankis; 2 – apdirbamas ruošinys; 3 – izoliacinis sluoksnis

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

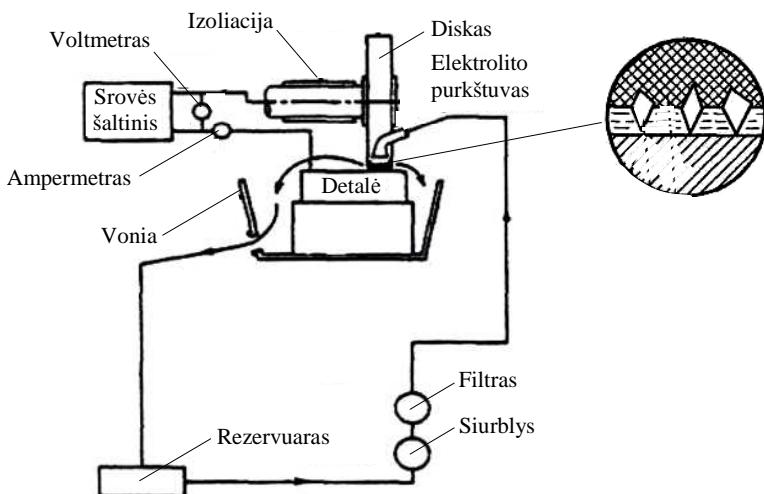
Kiti elektrocheminių apdirbimo būdai:

- Elektrocheminis poliravimas (5.24 pav.). Poliruojama elektrolito vonioje. Elektrolitas gali būti rūgščių arba šarmų tirpalai. Apdirbamas ruošinys yra anodas, o katodas yra metalinė (švininė, varinė, plieninė) plokštėlė. 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. Idubos 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 igauna 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. Elektrocheminių 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 apdirbtį, nestandžių detalių baigiamajam apdirbimui (nes nedidelės pjovimo jėgos) ir yra našesnis už iprastinį šlifavimą. Apdirbant šiuo būdu plonasienes detales, išskiria mažiau šilumos ir pasiekiamas didesnis tikslumas. Elektrolitiniam šlifavimui naudojamas iprastinis abrazyvinis diskas, kurio rišiklis (dažniausiai bakelitinis su grafito užpildu) yra laidus elektros srovei. Elektrolitas tiekiamas į tarą tarp apdirbamos detalės (anodo) ir abrazyvinio disko (katodo) abrazivo grūdelių (5.25 pav.). Vyksta elektrolizės procesas. Abrazyvinės dalelės ardo detalės paviršinių sluoksnų ir pašalina ruošinio anodinio tirpimo medžiagas vykstant įrankio ir ruošinio judesiams. ECA paspartina metalo šalinimą ir prailgina abrazyvinio disko eksplotacijos trukmę. Elektrolitinio šlifavimo metu apie 85–90 % užlaidos pašalinama anodinio tirpinimo būdu ir 10–15 % – mechaniskai. Naudojant šį apdirbimo būdą, surupoma iki 90 % abazyvinio disko ir apie 50 % sumažėja darbo išlaidos. Titaną ir legiruotąjį plieną reikia šlifuoti aluminio oksido abazyviniu disku. Taip nušlifuotame paviršiuje nėra terminių pažeidimų ir gaunamas mažesnis kaip $0,2 \mu\text{m}$ paviršiaus šiurkštumas.



5.25 pav. Elektrolitinio šlifavimo įrenginys

- Elektrocheminius veidrodiniu paviršiu šlifavimas.** Ši technologija skiriasi nuo elektrolitinio šlifavimo tuo, kad vietoj elektrolito naudojamas iprastas aušinimo skystis, o elektrolizė vyksta tarp vario katodo ir teigiamai įelektrinto abazyvinio 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 $0,3\text{--}2,0 \mu\text{m}$ skersmens dalelės, todėl veidrodinio paviršiaus kokybė pasiekiamą be poliravimo (paviršiaus šiurkštumas $R_a=2\text{--}10 \mu\text{m}$). Šiuo būdu šlifuojami lešiai, veidrodžiai, silicio plokštelės mikroschemų gamybai ir kt.

- **Elektrocheminis gręžimas fasoniniu vamzdžiu.** Naudojamas ilgomis, mažo skersmens apvaliomis arba specialios formos skylėms gręžti kietlydiniuose ir aukštos lydymosi temperatūros metalų (nikelio, kobalto, molibdeno, titano ir kt.) lydiniuose naudojant rūgštinių elektrolitą. Dažniausiai tuo pat metu gręžiama daug skylių. Elektrolitas tiekiamas atsižvelgiant į apdirbamą medžiagą. Dažniausiai naudojamas 10–20 % sieros rūgšties arba 15–30 % azoto rūgšties tirpalas. Elektrolitas tiekiamas pro rūgščiai atsparu (dažnai pagamintą iš titano) vamzdži – katodą. Katodas elektriškai izoliuojamas, išskyrus patį jo galą, kur vyksta elektrolizė. Elektrodai 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. Iš apdirbimo zoną elektrolitas tiekiamas vamzdeliu, o elektros srovė – viela. Naudojant šią technologiją galima gręžti mažesnio kaip 0,4 mm skersmens skyles, 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 spinduliaivimą, yra energijos spinduliaivimo 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 detaleje nėra liekamuų 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 kokiam spinduliuotės srauto skerspjūvyje), kryptingas (orientuotas tiksliai viena kryptimi), mažos skliaudos, stabilus, didelio skaisčio 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 detaile, todėl galima apdirbti trapias ir plonasienės 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 atliki kelią technologines operacijas įvairiose darbo vietose.

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

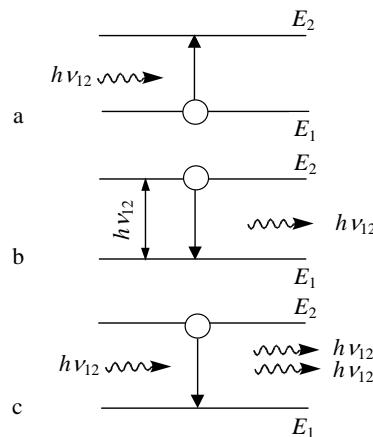
5.5.1. Lazerio veikimo principas

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

Tarkime, kad tūrio vienete 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 tokius atomus sistemą apšiestume vienspalve (monochromatine) šviesa, kurios fotonų dažnis v_{12} tokš, 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: *savaime 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).

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 sklidimo kryptys tarpusavyje yra nesuderintos. Spontaninė spinduliuotė yra nekoherentinė, nors spinduliuavimo 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 vienos fotonas galės sukelti visų jų spinduliuotę vienu metu, o šviesa, sklindanti tokia sužadinta (aktyvia) medžiaga, stiprės. Tai pasiekiamas, kai būna sužadinta daugiau nei pusė atomų. Sužadintos spinduliuotės metu išspinduliuotas fotonas yra identiškas privertusiam į spinduliuoti fotonui (turi tokią pačią energiją ir sklidimo 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.

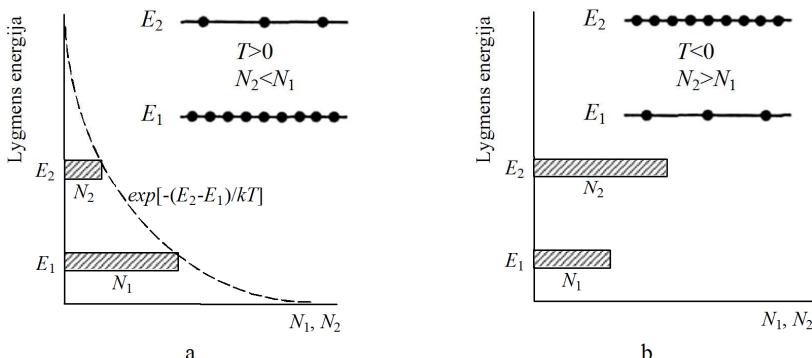


5.26 pav. Kvantinių šuolių tipai:

- a – priverstinės sugerties;
- b – spontaninis; c – sužadintas

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 turėsim šviesos absorbciją, o ne stiprinimą.



5.27 pav. Dviejų energijos lygmenų užpildymas: a – pusiausviroje sistemoje; b – nepusiausviroje, 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 – absolutinė temperatūra

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

Kaupinimo schema. Procesas, kuriuo sukuriama atomų energijos lygmenų inversija, vadinamas *aplinkos invertavimu*, arba *kaupinimu*. Sistemoje su dviem energijos lygmenimis, esant optimam 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 spinduliuotę 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 skaičiu N_2 lemia:

- kaupinimo greitis iš 1-ojo lygmens į 3-ąjį,
- 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→3 vyksta veikiant išoriniam kaupinimo šaltiniui, o šuolis 2→1 atitinka lazerinį šuolį. Trečiasis lygmuo sužadinamas dėl išorinės kaupinimo spinduliuotės, kurios dažnis v_{13} , absorbcijos. Trijų lygmenų sistemoje inversija sukuriama tarp lygmenų, iš kurių pagrindinis yra labai užpildytas. Todėl inversijai sudaryti tenka iš 1-ojo lygmens per 3-čiajį 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 susikauptu reikiamas atomų skaičius, didesnis už atomų skaičių apatiniaiame (nesužadintame) lygmenyje.

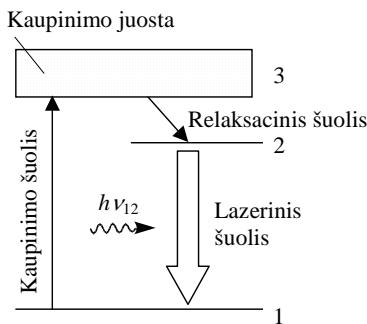
Efektyvesnės keturių lygmenų schemas, kuriose dėl kaupinimo vyksta inversija neužpildyto lygmens atžvilgiu. Čia šuolis vyksta iš 3-čiojo lygmens į 2-ąjį, kuris, esant dideliam energijų skirtumui tarp 1-ojo ir 2-ojo lygmens, yra beveik neužpildytas.

Pagrindinės lazerio dalys. Kiekvieną lazerį sudaro trys pagrindinės dalys:

1. **Aktyvioji terpė** (veiklioji lazerinė medžiaga) – šviesai stiprinti. Veikliosios medžiagos atomai, jonai arba molekules turi reikiamą struktūrą energijos lygmenų inversijai sudaryti. Lazerio aktyvioji terpė gali būti kietasis kūnas (amorfinis, 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 aktyviųios terpės tipą lazeriai skirstomi:

- **Kietojo kūno lazeriai.** Aktyvioji terpė kietojo kūno lazeryje dažniausiai yra strypfo formos skaidrus kristalas, į kurį auginant įterpiama lazerio šviesą spinduliuojančių ir stiprinančių aktyviųjų atomų. Kristalo ilgis siekia nuo kelių milimetruų 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, legiriotas 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, pavyzdžiai, 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).

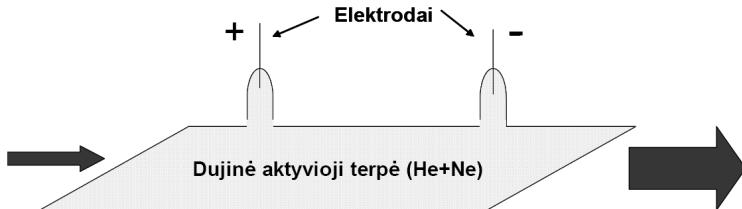


5.28 pav. Supaprastinta trijų lygmenų schema

- *Dujinai lazeriai.* Šviesą stiprinančioji terpė dujiname lazeryje gali būti inertinių dujų atomai, inertinių dujų jonai, metalo garų atomai, molekulės. Dujinių lazerių aktyvišias terpes sudaro helio, neono, anglies diokso, 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 %.
 - *CO_2 molekulių lazeris.* Generuoja nenutrūkstamą 10,6 μm skersmens 10–6000 W galios bangos srautą ir yra naudojamas objektams įkaitinti IR spinduliuotés 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 spinduliuotés 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 (vandenye, etilo ar metilo alkoholyje ir kt.). Trūkumai: dažų tirpalai dažnai nuodingi ir pavojingi aplinkai, skirtingose spektro srityse reikalingi skirtinės dažai, o tai nepatogu ir brangū.
- *Eksimeriniai lazeriai.* Šiaisiai 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 aktyvišias terpes sudaro inertinių dujų Ar_2 (lazerio bangos ilgis 126 nm), Kr_2 (148 nm), Xe_2 (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 molekulinių lazerių, jiems kaupinti naudojamas greitųjų elektronų pluoštai. Naudojami moksliuose tyrimuose, mikroelektronikoje (ėsdinti), litografijoje, plonų plėvelių gamyboje, kietiemis polimerams, keramikai ir puslaidininkiams apdirbtii, 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 puslaidininkų monokristalai ($GaAs$ ir kt.). Tai mažiausiai ir ekonomiškiausiai 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 nuolatiniu ir impulsiniu režimu (impulsinio režimo lazerių šviesos impulsų trukmė yra pikosekundės). Priklasomai nuo puslaidininkio medžiagos generuojamos 0,3–20 μm ilgio bangos. IR diapazono puslaidininkiniai lazeriai naudojami atominių ir molekulinių dujų spektroskopijoje, biologijoje, optinėse ryšių linijose ir kt.

Gamyboje dažniausiai naudojami dujiniai ir kietojo kūno lazeriai.

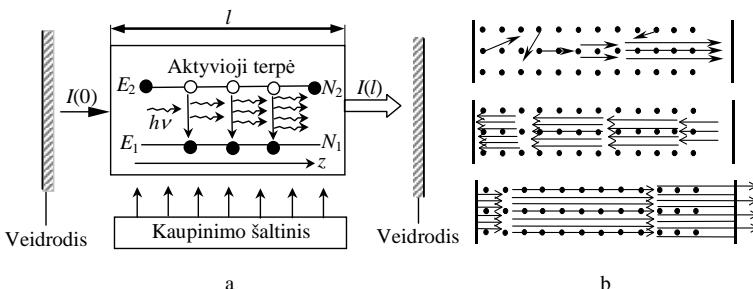
2. Kaupinimo šaltinis – aktyviosios terpės atomams iš žemesnio energijos lygmens į aukštesnį sužadinti (perkelti), t. y. atomų energijos lygmenų inversijai veikliojoje medžiagoje sukurti. Dažniausiai inversinis lygmenų užpildymas aktyviojoje terpėje vyksta optiniu (inversija gaunama medžiagai absorbuojant 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 srove (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 spontanę, žadinimo banga turi būti pakankamai intensyvi. Tai pasiekiamas aprūpant šviesos srautą veidrodžiais.



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

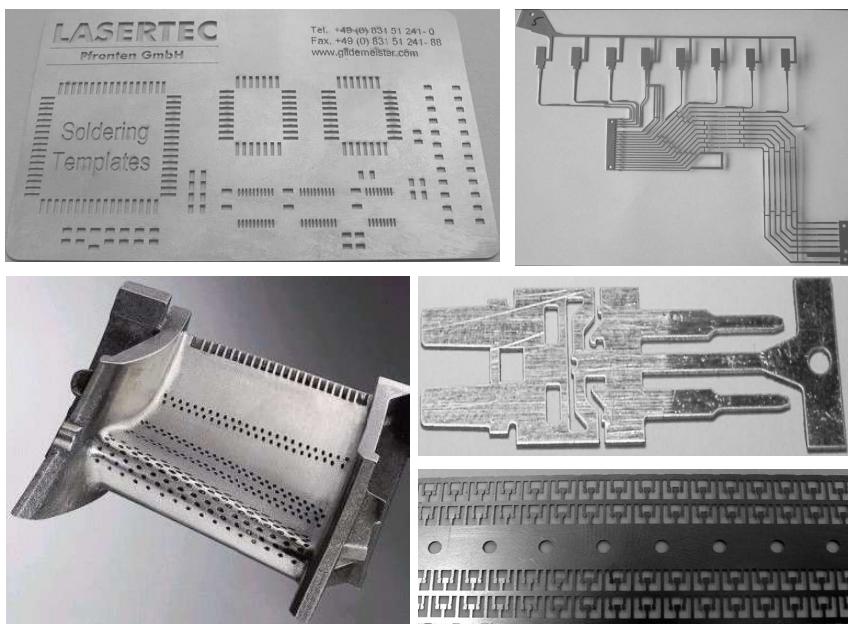
Lazeryje aktyvioji terpė būna tarp dviejų veidrodžių (5.30 pav., *a*), sudarančiu lazerio rezonatorių. Dažniausiai vienas rezonatoriaus veidrodis visiškai atspindi šviesą, kitas dalį šviesos praleidžia. Aktyviosios terpės išspinduliota išilgai rezonatoriaus ašies ir atsispindėjusi nuo rezonatoriaus veidrodžių 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 (pavyzdžiu, 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 spinduoli. Lazerių išėjimo spinduliuotė gali būti pastovi, pulsuojanti pavieniais impulsais arba impulsų seka. Pastovi spinduliuotė vadinta 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 ipjovos ir nedidelė terminio poveikio sritis, juo galima apdirbtai arba suvirinti sunkiai prieinamas apdirbamų objekto sritis. Lazeriu apdirbami tokie metalo lakštų kiekiai, kurie yra per maži, kad būtų ekonomiška juos štampuoti (5.31 pav.).



5.31 pav. Lazerinio metalų apdirbimo pavyzdžiai

Lazeris naudojamas mikromechaniniams apdirbimui, pvz., tranzistoriams, diodams silikono plokštéléje gaminti, detaléms termiškai apdroti, graviruoti (5.32 pav.), suvirinti, žymeti ir kt.

Femtosekundinio ($1fs = 10^{-15}$ s) lazerio impulsų trukmė yra gerokai trumpesnė nei laikas, per kurį šiluma išskverbia į medžiąga, todėl pjaustoma ji išlieka šalta. Lazeriu galima pjaustyti ir dinamitą, kadangi šiluma išgaruoja anksčiau, nei jis galėtų sprogti.

Ivairios formos (2D, 3D) detaléms pjauti, grežti, suvirinti gali būti panaudotos didelio tikslumo ir dinamiškumo lazerinio apdirbimo staklés (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 staklés: 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, taikių žymėjimą, priešraketinę gynybą, statybinių mašinų valdymą, lazerinių spausdinintuvų, optinių diskų grotuvų, brūkšnių kodų skaitytuvių 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, neįskraiama detalės geometrija; dėl didelio lazerio pluošto galios tankio galima apdirbtai beveik visas kietas, trapias, sunkiai lydžias ir kt. medžiagas (metalus ir nemetalines medžiagas, tarp jų ir deimantus), pjaustyti ir suvirinti detales, sukietinti ir legiriuti jų paviršių, valyti fasadus, meno kūrinius ir kt. Lazerio spinduliuote, naudojant optines ir veidrodines sistemas, galima apdirbtai sunkiai pasiekiamas vietas.

Kai kuriems lazeriniams technologiniams procesams (suvirinant detales, kietinant jų paviršių ir kt.) darbo vietoje reikia sudaryti inertinių duju terpę, specialias spinduliuotę sugeriančias dangas ir kt. Kad technologinis procesas būtų efektyvesnis, kartais tikslingo 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 dalii iki kelių milimetru paviršiaus plote) veikia apdirbamą metalo paviršiaus sritį, kuri sugeria spinduliuotę paviršiniame sluoksnyje ir greitai iškaista iki aukštos temperatūros, viršijančios kritines A_1 , A_3 reikšmes. Nustojo veikti lazerio spinduliuote, ikaitęs 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 smulkiaigrūdės struktūros į pradinę, ekspluatujant yra labai patvarus. Tradiciniai būdai sukietintas (pavyzdžiui, aplyditas kietlydinio milteliais arba metalizuotas) detalių paviršius palyginti greitai ištrupa arba sutrūkinėja dėl jų 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. Reguliujant kaitinimo ir aušinimo greitį ir metalo buvimo aukštoje temperatūroje trukmę, galima gauti reikiama detalės struktūrą ir atitinkamas savybes. Šiuo būdu galima sukietinti detalių trynimosi paviršius (ypač, kai reikia termiškai apdoroti sunkiai prieinamas vietas), pjovimo įrankių darbines briaunas, keisti kietinamojo sluoksnio gylį nepažeidžiant geometrinį matmenų (tai ypač svarbu tiksliuų 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:

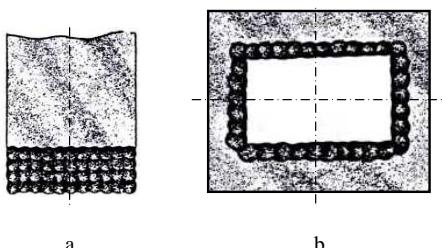
- *Paviršinis sluoksnis iškaitinamas nepažeidžiant apdirbamą paviršiaus mikrogeometrijos.* Šiuo atveju paviršius sukietėja dėl martensitinio virsmo, esant dideliems iškaitinimo ir aušinimo greičiams.
- *Paviršius išsilydo tam tikrame gylyje.* Sukietintą sluoksnį sudaro perlydyta ir grūdinimo sritys. 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 terpéje. Po lazerinio sukietinimo štampų ir presformų atsparumas dilimui padidėja 1,5–3 kartus. Sukietinimo efektyvumas priklauso nuo štamfo (presformos) konstrukcijos, štamfo elementų ir medžiagos markės.

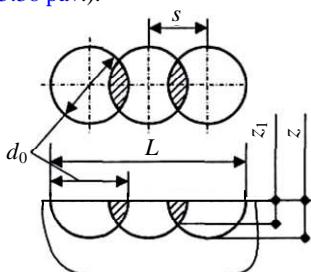
Sukietinant nuolatinės veikos technologiniai lazeriai, gaunamas storesnis ir tolygesnis sukietintas sluoksnis, procesas vyksta 2–4 kartus sparčiau negu sukietinant impulsiniais lazeriais.

Didelė problema yra mažo skersmens (iki 1,5 mm) iškirtimo puansonų ašmenų dilimas. Užgrūdinti tradiciniai metodais, jie tampa kieti, trapūs ir ekspluatuojami 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. Štamfo darbių dalij kietinimo schemas: a – iškirtimo puansonu; b – matricos

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



5.36 pav. Lazerinio sukietinimo schema:

s – apdirbimo žingsnis;
 d_0 – spinduliutės dėmės skersmuo;
 z – terminio poveikio gylis;
 z_1 – pakartotinio terminio poveikio gylis

Lazeriu sukietinamas metalo pjovimo įrankių (grąžtų, pratrauktvų, 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 trukmę, tiksliau apdirbamos detalės. Pavyzdžiu, apdirbant lazeriu sukietintais grąžtais ir pjūklais presuotas smulkinių (medienos drožlių) plokštės ir fanerą, ypač baldu gamybos pramonėje, gaunamas gerokai glotnesnis paviršius, neišlaužomi angų kraštai tose vietose, kur priartinamas ir atitraukiama įrankis.

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

Mašinų gamyboje lazeriniu sukietinimu padidinamas paskirstymo velenelių, krumpliaračių, vožtuvų darbinių paviršių, vožtuvų lizdų, stūmoklių žiedų griovelii ir kt. atsparumas dilimui. Atsižvelgiant į tokioms detalėms keliamus reikalavimus, gali būti sukietinama išlydant paviršinių metalo sluoksnį arba jo neišlydant. Detalės, kurias eksploatuojant veikia kontaktinės apkrovos, apdirbamos išlydant paviršinių 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 parametru, fizikinių cheminių medžiagos savybių, detalės paviršiaus švarumo ir atspindžio koeficiente. Švarūs blizgantys paviršiai kartais atspindi net iki 90 % lazerio spinduliuotės. Kuo daugiau metalas sugeria energijos, tuo giliau sukietinamas sluoksnis ir tuo kitesnis 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 pjaustytinės įvairios nemetalinės medžiagos, kurias sunku apdirbti tradiciniais pjovimo būdais. Didžiausias pjaustymo lazeriu efektyvumas gaunamas sudėtingo profilio plokštelių detalėlių 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 pluoštelių ir gauti siaurą pjūvį (keičiant spinduliuotės intensyvumą).

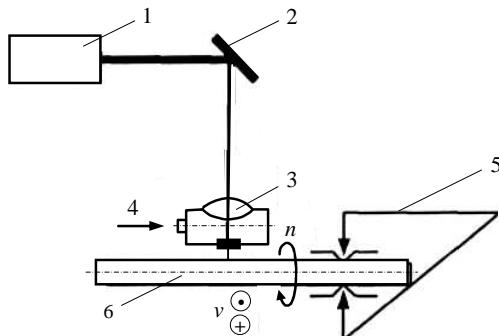
Metalai pjaunami nuolatinės veikos CO_2 lazeriais. Lazerinio pjovimo efektyvumui padidinti iš pjovimo zoną pučiamas suslėgtas deguonis, azotas, angliarūgštė arba inertinės dujos. Pjaunant metalus, paprastai naudojamas deguonis, o nemetalinėms medžiagoms pjauti naudojama inertinių dujų arba oro srovė,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

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

Plieniniai strypai pjaunami trimis būdais:

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

Norint pasiekti didžiausią pjovimo greitį, optinės fokusavimo sistemos židinys turi būti žemiau strypo paviršiaus. Tūtos, pro kurią pučiamas suslēgtas deguonis arba oras, išmetimo angos turi būti 1,2–2 mm atstumu nuo apdirbamoho strypo paviršiaus.



5.37 pav. Plieninio strypo pjovimo lazeriu schema: 1 – technologinis lazeris; 2 – atspindžio veidrodis; 3 – optinė fokusavimo sistema su tūta; 4 – tiekiamų suslēgtų 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 suslēgtas 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 srauta 0,15 MPa slėgiu, pjūvio plotis yra 1,1–1,3 mm (50 mm skersmens strypą, pagamintą iš plieno 45).

Didinant pjaunamo metalo lakšto storį, pjūvio kokybė prastėja. Norint pagerinti kokybę, būtina padidinti deguonies slėgi pjūvio zonoje. Didžiausias mažaanglio plieno lakšto storis, pjaunant 500 W galios lazeriu, siekia 10 mm. Pjaunant tokius storus lakštus, spinduliuotės iėjimo pusėje pjūvis yra švarus ir lygus, o išėjimo pusėje pjūvio briaunos būna apsilydžiusios. Pjūvio plotis keičiasi nuo 0,8–1 mm spinduliuotės iėjimo 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 aggregatinės 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 lankstus 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 užliejantį išlydytas kvarcas pašalinamas didinant lazerio galią, mažinant pjovimo greitį ir išpučiant išsilydžiusią masę iš pjūvio zonos.

Sudėtingiau lazeriu pjauti paprastą stiklą. Esant per mažai galių arba per dideliam pjovimo greičiui, neužtikrinama kiauro griovelio sublimacija. Spinduliuotės apšvietimo vietoje atsiranda skysta vonelė, todėl susidaro griovelis apvalais 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 apdirbtį geriausiai tinka CO_2 lazeriai, kurių šviesos bangos ilgis $\lambda=5-6 \mu\text{m}$.

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 kraštuse nebūna išrūkimų.

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.

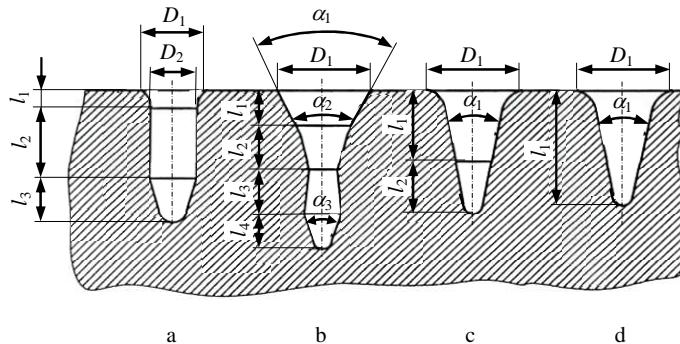
Periodinės veikos CO_2 dujų technologiniuose lazeriuose, palyginti su nuolatinės veikos lazeriais, esant didelei momentinei spinduliuotės impulso galiai, medžiaga iš apdirbimo srities akimirksniu išgarinama ir pašalinama. Ši savybė panaudojama šilumai laidžioms arba magnetinėms medžiagoms, naudojamoms 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 aklinasias. Skylių formavimas priklauso nuo lazerio impulso energijos, trukmės ir dažnio, glaudžiamojo lešio fokuso padėties apdirbamosios detalės atžvilgiu, fizikinių mechaninių apdirbamosios medžiagos savybių ir kt., o skylės forma – nuo to, kaip sufokusuojama lazerio spinduliuotė. Jeigu pluoštas nesufokusotas, tai profilis gaunamas netaisyklingos geometrinės formos.

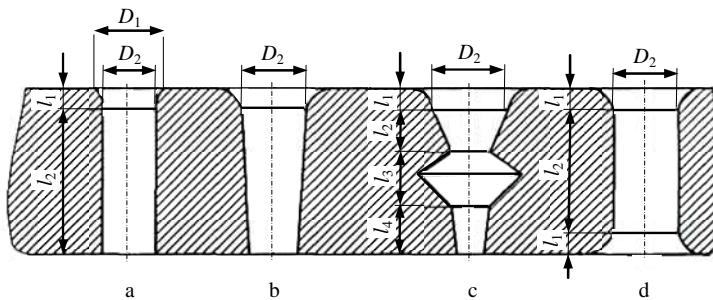
Priklasomai nuo glaudžiamojo lešio fokuso padėties apdirbamosios detalės atžvilgiu galima gauti įvairių formų aklinasias skyles ([5.38 pav.](#)). Jei fokusas yra ruošinio paviršiuje, skylė turi nedidelį jėjimo kūgi, cilindrinę dalį, kurios parametrai D_2 ir l_2 , ir kūginę dalį, kurios ilgis l_3 ([5.38 pav., a](#)). Perstumiant glaudžiamojo lešio fokusą į medžiagą, gaunamas jėjimo kūgis, cilindrinė arba kūginė dalis ir statinės formos elementas ([5.38 pav., b](#)). Jei glaudžiamojo lešio 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 (pavyzdžiu, austenitiniam pliene), sunkiau, kai medžiagos šilumos laidumas didelis (varinėse detalėse ir kt.).



5.38 pav. Tipinės aklinių skylių schemas, kai glaudžiamojo lešio fokusas yra:
a – ruošinio paviršiuje; b – perstumtas gilyn į ruošinio medžiągą;
c, d – virš ruošinio paviršiaus

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



5.39 pav. Tipinės ištisinių skylių schemas, kai glaudžiamojo lešio fokusas yra:
a, b – ruošinio paviršiuje (keičiant lazerio spinduliutės galia);
c – perstumtas į ruošinio medžiągą; d – perstumtas giliau į ruošinio medžiągą

Skylėms formuoti (gręžti) naudojami impulsiniai lazeriai. Spinduliutės tankis siekia $10^6\text{--}5\cdot10^7 \text{ W/cm}^2$, o impulso trukmė – $10^{-8}\text{--}10^{-3} \text{ s}$. 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 spinduliutės 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), aklinosiose skylėse susidaro kraterio formos dugnas.

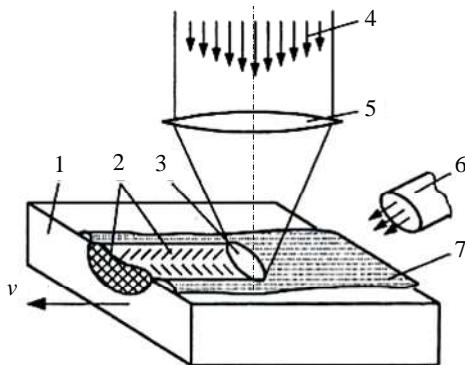
Dažniausiai lazeris naudojamas skylėms formuoti mechaniskai sunkiai apdirbamose medžiagose. Grežiant skyles lazeriu, darbo našumas, palyginti su mechaniniu skylių apdirbimu, padidėja iki 200 kartų, o palyginti su elektrokibirkštiniu būdu, – 12–15 kartų.

Vienu dviem impulsais neįmanoma gauti taisyklingos cilindro formos skylės, todėl tikslų matmenų skylės yra kalibruojamos. Lazeriu skylės kalibruojamos keičiant glaudžiamojo lešio 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 $10^4\text{--}2\cdot10^5 \text{ W/cm}^2$.

Legiravimo lazeriu procesas (5.40 pav.) yra nesudėtingas ir spartus. Detalės paviršius padengiamas legiruojamuoju elementu (molibdeno, volframo karbido, titanio 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 (janglinant, 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.). Išotinus anglimi mažaangli plieną, galima gauti smulkiagrūdę martensitinę struktūrą, kurios mikrokietis siekia 9000 MPa. Po lazerinio azotinimo plieno struktūrą sudaro martensitas, liekamasis austenitas ir kieti legiruojančiu elementų nitridai (*Fe* nitridai nėra labai kieti). Lazeriniu būdu išterpiant į plieną boro, jo struktūroje daugėja boridų (*FeB, Fe₂B, Fe₃B*), o mikrokietis padidėja iki $(12\text{--}21)\cdot10^3$ MPa. Tokie paviršiai yra atsparūs abrazyviniam dilimui. Prisotinus metalus silicio, lazerio poveikio zonoje susidaro silicidai *Fe₃Si, Fe₂Si₃, FeSi, FeSi₂*, o mikrokietis padidėja iki $(14\text{--}15)\cdot10^3$ MPa. Padidėja atsparumas dilimui, korozijai, aukštos temperatūros poveikiui.
- Metalai ir jų lydiniai (*Co, Cr, Ni, Mn, Mo, W, Ti, V*). Legiruojant susidaro persontinti kietieji tirpalai ir tarpmetaliniai junginiai. Legiruoto sluoksnio mikrokietis padidėja iki $(8\text{--}10)\cdot10^3$ MPa.
- Karbida. Jei medžiagoje yra karbidų, labai padidėja kietis ir atsparumas dilimui. Metalai legiruojami sunkiai 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 *CO₂* dujų lazeriai, kurių galia 0,5–10 kW. Impulsinės veikos technologiniai lazeriai legiravimui nelabai tinkta, nes dėl galingo impulsinio spinduliavimo legiravimo elementai detalės paviršiuje išskaidomi, legiruotas sluoksnis būna nevienodo storio, prastos kokybės ir banguotas. Kad lazeriu legiruotas paviršius būtų lygus ir glotonus, 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 ipurškiama metalų (pvz., chromo, nikelio, volframio ir kt.) arba jų junginių miltelių. Veikiami lazerio spinduliuotės milteliai išsilydo (dar prieš pasiekdamis medžiagos paviršių), išsilydę milteliai ir pagrindinė masė dešimtuoj milimetro dalių gylyje susimaišo ir abu sluoksniai gerai mechaniskai 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 plokštelyse didelio greičiu. Veikiant sufokusuotu lazerio spinduliuotės pluoštu, lokaliai išgarinami medžiagos paviršiaus sluoksniai. Pagal suraižytas takelių linijas plokštelynės mechaniskai 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 tinkta 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 tinkta kietojo kūno *Nd:YAG* (neodimio aliuminio itrio granato), *CO₂* impulsiniai ir periodinės veikos 10–100 W galios lazeriai. Galima žymėti greitai judančius objektus, kurie matomi plika akimi arba pro mikroskopą. Kai impulsu 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 projektuoamas į apdirbamą paviršių. Naudojant atitinkamus trafaretus arba šablonus, detalės paviršiuje lengva išgarinti ženklą, numerį, simbolį. Tokius trafaretus optiminio 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 duobetas (tekstūruotas) paviršius.

Paviršiaus tekstūra keičiamā keičiant impulsų galią, jų pasikartojimo dažnį arba apdirbamos detalės slinkimo greitį. Lazeriu tekstuoti metalo paviršius sukietėja, lėčiau dyla ir pasidaro atsparesnis, kai formuojami karštai plastikai.

Balansavimas. Lazeris gali būti naudojamas tiksliams 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 trukmę.

Besisukančios detalės paviršiuje galina lazerio spinduliute išgarinama medžiaga. Spinduliuotės impulso galios tankis 10^7 – 10^8 W/cm², impulso trukmė 10^{-8} – $5 \cdot 10^{-5}$ s. Esant tokiemis lazerio spinduliuotės parametram, galima tiksliai dinaminiu režimu subalansuoti detales ir mazgus, besisukančius 100000 r/min ir didesniu greičiu. Balansuoti skirti įrenginiai turi elektronines sistemas disbalanco 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 kitaip būdais. Dažniausiai naudojami sudėtiniai lazeriniai apdirbimo būdai:

Lazerinis mechaninis apdirbimas. Apdirbant medžiagas lazeriniu mechaniniu būdu (pavyzdžiu, tekinant, frezuojant, drožiant ir kt.), pjovimo sritis prieš pat pjovimo įrankį įkaitinama lazerio spinduliute. 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 apdirbamajoje srityje.

Lazerinis plastinis būdas taikomas baigiamosioms technologinėms operacijoms, siekiant padidinti detalės paviršinių sluoksnių kietį ir stipri, atsparumą dilimui ir nuovargui. Lazerio spinduliuote įkaitintas metalo paviršius yra veikiamas mechaniskai: paviršius daužomas rutuliukais, juo rideinami tam tikra jėga prispausti ritinėliai, veikiamai įvairaus stiprio mechaniniais impulsais ir kt. Dėl to pasikeičia metalo paviršiaus

struktūra. Sukietinimo laipsnis tuo didesnis, kuo minkštesnis metalas. Pavyzdžiu, negrūdinto plieno kietis padidėja 2–3 kartus, o užgrūdinto – tik 15–40 %. Didžiausias paviršiaus kietis yra šiuo metodu apdirbtu austenitinės, feritinės ir martensitinės struktūros plieno, mažiausias – perlitinės ir sorbitinės struktūros plieno.

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

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

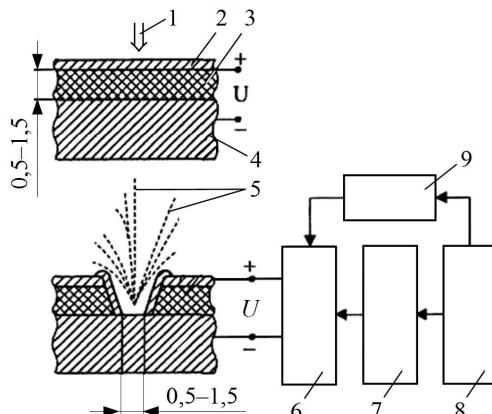
Lazerinis smūginis apdirbimas. Šiuo būdu sukietinami spalvotųjų metalų ir jų lydinių paviršiniai sluoksniai. Jie yra veikiami stipriais mechaniniais impulsais, susidarančiais dėl lazerio spinduliutės šiluminės energijos staigaus virsmo mechanine energija. Veikiant medžiagos paviršių (padengtą spinduliutę sugeriančia danga) 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 mechaniskai 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 mechaniskai sukietinami aliuminio, vario, magnio ir jų lydinių paviršiniai sluoksniai.

Lazerinis hidrosmūginis apdirbimas. Mažos skylės gali būti išvalomos hidrauline smūgine banga, susidarančia dėl to, kad lazerio spinduliutės energiją labai staigiai sugeria skystis. Šiuo būdu galima išvalyti termiškai apdorotų detalų mažo skersmens skyles. Daugelio tiksliu detalių (pavyzdžiu, kuro purkštukuose) terminio grūdinimo procese mažos skylės (0,2 mm skersmens ir didesnės) oksiduoja, užsiteršia ir užsikemša. Užgrūdintų detalių skylės paprastai valomos mechaniskai: pragréžiamos ir išplaunamos žibalu. Panardinus purkštuką į lazerio spinduliutę sugeriančią terpę, pavyzdžiu, skystą fosfata, ir paveikus ją lazerio spinduliute, įvyksta sprogimas, nes spinduliutės energiją labai greitai sugeria skystis. Skystyje susidariusi hidrodinaminio smūgio banga dideliu slėgiu išstumia skyti po skyles ir jas mechaniskai išvalo.

Lazerinis plazminis apdirbimas. Svarbiausi veiksnių yra plazmos telkinys ir aplinkos duju slėgis. Valdant spinduliutės energiją ir duju slėgi, galima keisti poveikio lazeriu pobūdį. Veikiamu 10^7 – 10^{10} W/cm² galios tankio lazerio spinduliute supančiose dujose, medžiaga išgarinama. Esant didelei spinduliutės energijai supančiose dujose, susidaro plazmos telkinys. Veikiant lazerio spinduliute ir plazmos pluošteliu, galima keisti apdirbamosios medžiagos paviršiaus savybes. Pavyzdžiu, paveikus molibdeno plokštelię azoto duju aplinkoje 10^7 W/cm² galios tankio spinduliute esant 1 ms 1 MPa slėgiui, joje pramušama skylė. Esant 10 MPa slėgiui, plokšteliė net nesilydo. **Lazerinis termocheminis apdirbimas.** Šis apdirbimo būdas apima duju aplinkoje paviršiuje vykstančius procesus, pavyzdžiu, oksidavimą, padengimą, ėsdinimą ir kt. Lazerio spinduliute, esant 10^6 W/cm² galios tankiui, lokalaij įkaitinamas medžiagos paviršius ir suaktyvinamos tame 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 paveikiamą stipriu magnetiniu lauku. Auštant išlydytam metalui, iš austenito susidaro martensitinė adatinė struktūra. Tuo pat metu veikia stiprus magnetinis laukas, kuris sukelia dideles sluoksnų 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, suketinamas medžiagų paviršius, nusodinamos galvaninės dangos ir kt. Pavyzdžiui, paveikus 1–3 ms lazerio impulsu folija padengtą tekstolito plokštelię, kurios abi pusės laidžios elektrai ir prijungtos prie nuolatinės srovės šaltinio, pramuštos skylės sienelės pasidengia plonu 5–20 μm išgarinto vario dalelyčių 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 ($U=150\text{--}800\text{ V}$)

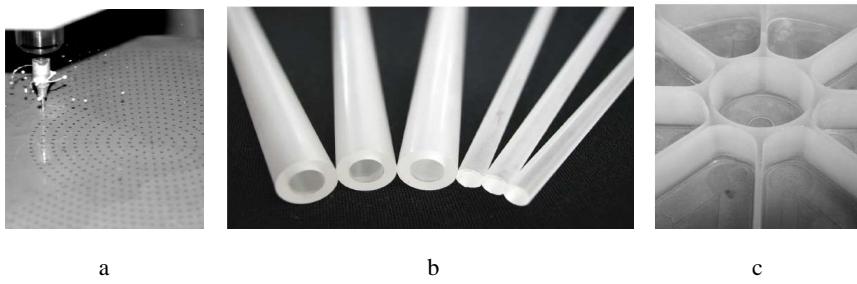
5.5.3.7. Spinduliuotę sugeriančios dangos

Bet kokio lazerinio poveikio medžiagai atveju svarbu ne tiek spinduliuotės galia, kiek gebėjimas sugerti krintanči spinduliuotės srautą. Pavyzdžiui, CO_2 duju lazeris spinduliuoja 10,6 μm , o kietojo kūno neodimio stiklo lazeris – 1,06 μm 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 $\lambda=1,06\text{ }\mu\text{m}$. Vadinas, 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 sugeriamąjį gebą (absorbciją) ir technologinio proceso našumą. Daugumos metalų sugeriamoji geba didėja mažėjant λ .

Sugeriamają gebą galima padidinti panaudojus specialias dangas (10–40 μm storio plėveles, miltelius, emulsijas), didinant metalo paviršiaus šiurkštumą, keliant paviršiaus temperatūrą ir kt. Nuo dangos cheminės sudėties priklauso spinduliuotės sugeriamojį gebą, kartu sukinetinamo sluoksnio storis ir detalės paviršiaus kietis. Pavyzdžiui, padengus nerūdijantį plieną Fe_2S_3 dangą, sugeriamoji geba gali padidėti iki 80 % (esant bangos ilgiui 10,6 μm). Plačiai naudojamos Al_2O_3 , fosfatinės – $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$, $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$ ($\text{MnFe})_5\cdot(\text{H}_2\text{PO}_4)_4\cdot4\text{H}_2\text{O}$ 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 savaimė 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 apdirbtii. Ultragarsu apdirbamos kietos ir trapios medžiagos (5.42 pav.): deimantas, keramika, stiklas, taip pat specialiųjų mechaninių savybių medžiagos, pavyzdžiui, titan, karščiu i atsparūs lydiniai ir kt. Galima apdirbtii ir kietlydinus, tačiau tai brangu (labai intensyviai dyla įrankis).



5.42 pav. Ultragarsinio apdirbimo pavyzdžiai: a – silicio plokštéléje suformuotos skylės ($\varnothing 0,5 \times 11 \text{ mm}$); b – lazdelės iš safyro; c – plonų sienelių (<1 mm) apdirbimas

5.6.1. Ultragarsinio proceso pagrindai

Ultragarsinis medžiagų apdirbimas yra pagristas ultragarsinių virpesių, kurių dažnis $f > 16000 \text{ Hz}$, sklidimo įvairiose terpēse specifiniai efektais. Ultragaro bangos sklinda nuo virpesių šaltinio. Jei materialioje aplinkoje yra sužadinami ultragarsiniai virpesiai, tai aplinkos dalelės pradeda virpēti 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.

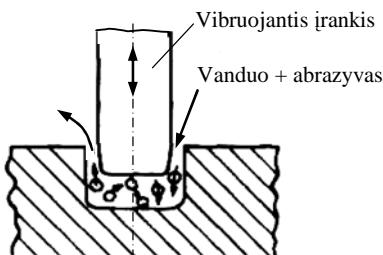
Ultragarso bangos dar skirstomos pagal dalelių virpesių kryptį. Kai dalelių virpesių kryptis sutampa su bangos sklidimo kryptimi, tokios bangos vadinamos *išilginėmis*. Kai dalelių virpesių kryptis yra statmena bangos sklidimo kryptei, tokios bangos vadinamos *skersinėmis*. Skysčiuose ir dujose sklinda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

Skysčiuose ir dujose ultragarso nuostoliai daugiausiai susidaro dėl vidinės trinties (klampumo) ir šilumos laidumo. Kietuosiuse 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), pasižymintos nevienualytiškumu, poringumu ir kt., pvz., plastikai, guma, pluoštinės medžiagos ir kt. Tokio tipo medžiagos dažniausiai naudojamos garso izoliacijai.

Ultragarsinio apdirbimo principas. Įrankiui, kurio skerspjūvis panašus į ruošinyje apdirbamos išemos formą, ultragarsinio dažnio diapazone suteikiami ašiniai mažų amplitudžių virpesiai (5.43 pav.). Abrazyvo grūdeliai, 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.

Ultragarsinio 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 ultragarsinio apdirbimo schema

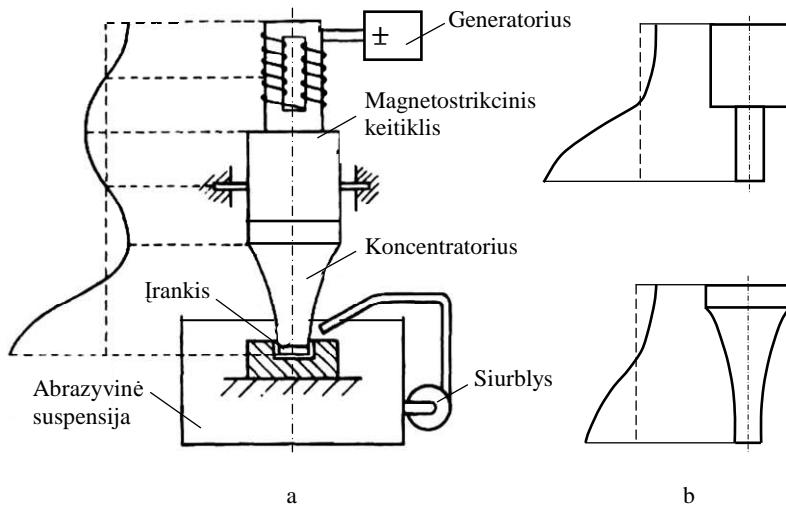
Ruošiniai apdirbami abrazyvinės suspensijos vonioje. Prie ruošinio priartinamas įrankis, prityvirtintas prie koncentratoriaus (5.44 pav.). Koncentratoriaus sujungtas su magnetostrikcine šerdimi, kurią aušina pratekantis vanduo. Šerdies virpesius sužadina ultragarsinio dažnio generatorius. Abrazyvinė suspensija į vonią tiekiama 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.* Ultragarsiniams apdirbimui naudojami magnetostriktiniai, o kartais ir pjezoelektriniai keitikliai. Magnetostriktiniuose 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. lydinių) paketo. Įmagnetinus šerdį, pakinta jos matmenys (magnetostriktijos efektas), t. y. sumažėja skerspjūvis, padidėja ilgis. Šerdies virpesių amplitudė siekia 2–5 μm . Virpesių amplitudėi padidinti prie šerdies tvirtinamas koncentratorius.
- *Koncentratorius.* Suprojektuotas taip, kad keitiklio amplitudė 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 virpesiu dažniu, tuomet įvyksta rezonansas. Keitiklis, koncentratorius ir įrankis turi virpēti 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 transformatorius) tipai ir jų sukuriama 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 suspensijoje;
- apdirbamo paviršiaus geometrija.

Abrazyvas. Abrazyvo grūdelių tipas, dydis ir koncentracija turi didelę įtaką ultragarsiniams 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 grūdolio dydį. Didžiausias intensyvumas gaunamas, kai grūdolio 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 kitesni už apdirbamą medžiągą. 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 jų kitesnis 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 atvirkštinių kūgiškumų arba įrankio darbiniam paviršiui 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 ultragarsiniams apdirbimui. Privalumai – įrankio ilgalaikišumas, aukštasis darbo našumas.

Ultragarsinio apdirbimo staklės ([5.46 pav.](#), *a*, *b*). Jomis apdirbamos kietos (deimantai, kietlydinis, grūdintasis plienas) ir trapios (keramika, stiklas, kvarcas ir kt.) medžiagos. Pagrindiniai staklių elementai – stovas, stalas ir kreipiamosių, akustiniai elementai, skysčio tiekimo sistema, pastūmos mechanizmas. Ultragarsinėse staklėse naudojamas specialus, originalios konstrukcijos staklių suklys ([5.46 pav.](#), *c*). Virpesius sukelia Jame itvirtintas magnetostrikcinis arba pjezokeraminis keitiklis (jį maitina elektrinis aukštojo dažnio generatorius). Jame pritvirtintas darbo įrankis (peilis, gražtas, sriegtuvas) virpina abrazyvų suspensija tepamą apdirbamos detalės paviršių; vyksta paviršiaus erozija, dėl to sparčiau nuimama drožlė, lengvai 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 (stampams, presformoms ir sudėtingos konfigūracijos detalėms tiksliai ir glotnai apdirbtai, detalėms žymeti, skylėms gręžti) ir specializuotosios (sriegiu išsiesti) ultragarsinio apdirbimo staklės.



[5.45 pav.](#) Deimantinis įrankis



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 (elektrokibirkštiniš, elektroimpulsiniš) apdirbimas. Tačiau ultragarsu, skirtingai nuo elektroerozinių apdirbimo būdų, galima apdirbti ne tik elektrai laidžias, bet ir izoliaciniem savybėmis pasižyminčias medžiagas.

Kriterijus, kuriuo vadovaujantis gali būti nustatoma, ar medžiaga tinkama apdirbti ultragarsu, yra trapumo koeficientas k_b , išreiškiamas atsparumo šlyčiai ir atsparumo atplėšimui santykiu. Kuo šis koeficientas didesnis, tuo labiau medžiaga tinkama apdirbti ultragarsu. Pavyzdžiu, 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 apdirbti ultragarsiniais metodais, kadangi nepasiekiamas norimas efektas (nupjaunamo metalo tūrio vienetui sunaudojama labai daug energijos plastiškai deformatuoti).

Detalių apdirbimo ultragarsu operacijos:

- kai apdirbama detalė nejudė – fasoninių kiaurujų ir aklinujų skylių formavimas, išorinių paviršių profiliavimas, graviravimas, kreivų ašių skylių sudarymas;
- kai apdirbama detalė juda įrankio atžvilgiu – tekinimas, frezavimas, šlifavimas, sriegio ipjovimas, pjaustymas ir kt.

5.6.2.1. Kiaurujų ir aklinujų skylių formavimas

Įrankis, veikiamas ultragarsinių virpesių ir pastovios spaudimo jėgos abrazyvinės suspensijos aplinkoje, palaipsniu 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 ipjovimo 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 štampų 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 tolimesniams apdirbimui);
- *rupsis skylės apdirbimas ultragarsu*, naudojant stambesnius abrazyvinius grūdelius (įrankio matmuo 0,25 mm mažesnis už numatomą gauti skylės skersmenį);
- *glotnusis skylės paviršiaus apdirbimas ultragarsu*, naudojant smulkesnius abrazyvinius grūdelius (įrankio matmuo 0,1 mm mažesnis už numatomą gauti skylės skersmenį);
- *baigiamasis skylės paviršių apdirbimas ultragarsu* švelniais režimais.

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

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

Ultragarsinio apdirbimo metu vyksta du procesai:

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

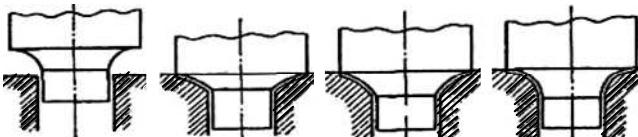
Norint padidinti apdirbimo ultragarsu našumą, abrazyvinė suspensija turi cirkuliuoти. Naudojami du skirtini abrazyvinės suspensijos priverstinės cirkuliacijos būdai: vakuuminis ir slėginis (apdirbimo našumas padidėja iki 5 kartų). Apdirbant slėginiu būdu, įrankyje arba apdirbamamoje detalėje yra technologinė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

Ultragarsinio apdirbimo našumas priklauso nuo

- *abrazyvinių grūdelių dydžio* – mažėjant abrazyvinių grūdelių dydžiui, mažėja ir apdirbimo našumas, tačiau kuo smulkesni abrazyviniai grūdeliai, tuo didesnis apdirbimo tikslumas;
- *abrazyvinių grūdelių koncentracijos suspensijoje* – esant optimaliai koncentracijai, abrazyviniai grūdeliai apdirbamame paviršiuje išsidėsto vienu sluoksniu; esant didesnei koncentracijai, darbo zonoje abrazyviniai grūdeliai 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 išiskverbtį į apdirbamą medžiagą. Optimalus įrankio virpesių amplitudės ir abrazyvinio grūdelio dydžio santykis 0,6–0,8.



5.47 pav. Laipsniškas kietlydinio matricos paviršių formavimas įrankiu komplektu

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

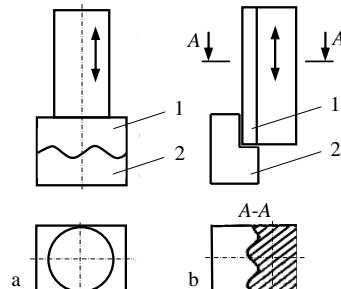
Apdirbant ultragarsu apskritos formos kietlydinio matricas, apdirbamai detailei rekomenduojama suteikti sukamajį judesį, nes taip išvengiama paviršių apdirbimo defektų dėl kavitacijos. Skylės, suapvalinimai ir kitokie elementai formuojami palaipsniui, naudojant įrankių komplektą (5.47 pav.).

5.6.2.2. Detalės paviršių apdirbimas ultragarsu

Suteikiant apdirbamai detailei pastumą (išilginę, skersinę) įrankio atžvilgiu, galima atliliki frezavimo, šlifavimo, tekinimo, pjaustymo, graviravimo ir net sriegių išjovimo operacijas, analogiškas iprastinėms metalo pjovimo operacijoms klasiniais įrankiais.

Profilavimas. Detalių paviršiai profiliuojami įrankiu, kurio galinis arba šoninis paviršiai turi reikiamaus profilio (5.48 pav.). Taip dažniausiai apdirbami puansonai iš kietlydinių.

5.48 pav. Detalės paviršių ultragarsinis profilavimas įrankiais, kurių profilius: a – galinis; b – šoninis; 1 – įrankis; 2 – apdirbamomoji detalė



Frezavimas. Ultragarsinio frezavimo operacija dažniausiai naudojama formuoti uždaruo arba pusiau uždaruo 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 detailei suteikiamas sukamasis judesys.

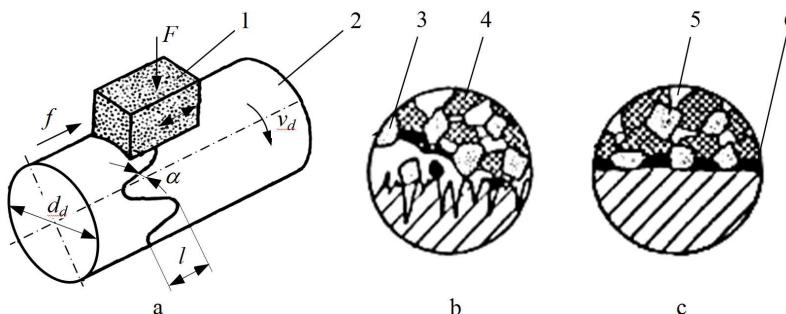
Šlifavimas. Ultragarsinio plokščiojo šlifavimo operacija yra analogiška ultragarsinio frezavimo operacijai. Įrankis yra virpinamas apdirbamuo paviršiaus normalės kryptimi, detalei suteikiamas reikiamas pastūmos. Į apdirbimo zoną gausiai tiekiama abrazyvinė suspensija. Palyginti su išprastinio šlifavimo operacija, gaunamos mažesnės pjovimo jėgos, apdirbtame paviršiuje nebūna mikrotrūkumų ar pridėginimo žymų.

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

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

5.6.2.3. Ultragarsinis superfinišavimas

Išprastinis superfinišavimas. Superfinišavimas yra baigiamasis detalių apdirbimo būdas, kai naudojami vienas arba du abrazyviniai (ar deimantiniai) strypeliai. Šiam apdirbimui būdingi švytuojančios 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 – grūdelis; 4 – rišiklis; 5 – tuštuma; 6 – šlamas; d_g – detalės skersmuo; l – strypelio švytavimo eiga; F – strypelio prispaudimo jėga; v_d – detalės apskritiminis greitis; s_{is} – strypelio (detalės) išilginė pastūma; α – sinusoidinio pėdsako kampus

Superfinuojant abrazyvinis strypelis spaudžiamas prie detalės, kurios paviršius yra šiurkštus (5.49 pav., b). Padidėjus slėgis išplėšia labiausiai apkrautus grūdelius. 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. Susidarę šlamas išsidėsto paviršinio sluoksnio ir strypelio tuštumose. Kai mikronelygumų keteros nugludintos (5.49 pav., c), pjovimo procesas nevyksta.

Superfinišavimas naudojamas detalių, dirbančių slydimo ir riedėjimo trinties salygomis, savybėmis pagerinti (šiuo procesu galima sumažinti paviršiaus šiurkštumą iki $R_z=0,1\text{--}0,05 \mu\text{m}$), detalės formos tikslumui padidinti, defektiniams paviršinio metalo sluoksniniams susidariusių šlifujant, pašalinti ir paviršiniams sluoksniniams sustiprinti.

Iprastinio 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 abrazyviniai grūdelių dalis pereina savo pėdsaku (mažėja pjovimo tikimybė).

Panaudojus ultragarsą superfinišavimui, našumas, palyginti su iprastiniu 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 $R_a=0,02\text{--}0,08 \mu\text{m}$ 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 tame 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 nuovargui.

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 apdirbtu 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 nejakaista, paviršiniame sluoksnje nebūna mikrotrūkimų ir pridegimų.

Paviršiaus šiurkštumas yra tiesiogiai proporcingas vidutiniams abrazyviniams grūdelių dydžiui. Kuo mažesnii abrazyviniai grūdeliai, tuo glotniai apdirbamas paviršius.

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

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

Ultragarsu apdirbtu 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 tiekiama abrazyvinė suspensija ir kai iš apdirbimo zonas nepakankamai gerai pašalinamos atliekos. Pastovi prispaudimo jėga ir virpesių amplitudė didesnės įtakos įrankio dilimui neturi. Apdirbimo tikslumas mažėja:

- dėl įrankių veikiančių žalingų skersinių virpesių, nes dėl to iškraipomi skylės matmenys ir forma (dažniausiai skersiniai virpesiai atsiranda dėl ultragarsinio apdirbimo staklių ir jų įtaisų geometrinė netikslumė, netinkamo kai kurių mazgų surinkimo ir kitų priežascių);
- 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 ašmeniniaių 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 sukimasis ir ašinė jėga ir kt.

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

Ultragarsinių virpesių pjovimo procese ypač efektyvūs grežiant ir sriegiant nedidelio skersmens skyles titanu ir nerūdijančio plieno detalėse. Dirbant įprastiniu būdu, t. y. nesant ultragarsinių virpesių, grežti ir sriegti mažų skersmenų skyles 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 didesnį apdirbimo tikslumą ir išgręžti bei išriegti mažo skersmens ir gilius (skylės gylis didesnis kaip 10·D, čia D – skylės skersmuo) skyles.

Ultragarsinių virpesių panaudojimas skysčiuose ir dujose. Dažų įsigérimo 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 tokį procesą priskiriamas medžiagų prisotinimas ir dažymas, odu 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. Panaujodus ultragarsą, skysčio išstinimo procesas paspartėja apie 8 kartus. Todėl, apžiūrėjus odos pjūvi 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 prisisotinusi.

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

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

Panaujodus ultragarsą paaikėjo, 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 aluminio lydinį valandą laiko priės sustingimą, iš jo beveik pasišalina nereikalingos dujos.

Dujų dalelių sukimimas, 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 ($N > N_k$), gerokai suaktyvėja dujų šalinimo iš lydalo procesas.

5.6.5. Ultragarsinis valymas

Ultragarso panaujimas 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. veiksnių. 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 tirpdymu.

Ultragarsinis valymas paprastai trunka nuo kelių sekundžių iki 15 minučių ir priklauso nuo nešvarumų pobūdžio ir jų kieko valomo paviršiaus ploto vienetė. Jeigu detalės paviršiuje nešvarumų yra daugiau kaip 200 mg/m^2 , ultragarsinį valymą tikslinga derinti su cheminiais būdais. Tokiu atveju aukštai paviršiaus kokybei pasiekti ultragarsinių laukų reikia naudoti tik paskutinėje valymo stadioje.

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 (hidraulinuose presuose šie slėgiai siekia apie 0,01–0,2 KPa, arba 10–200 atmosferų), tačiau skysčiai labai neatsparūs tempimo įtempiams.

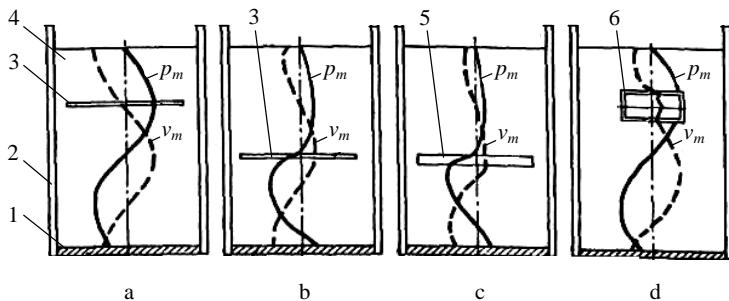
Pereinant garso bangos fazei, skystis retėja ir trūkinėja. Trūkimo vietose susidaro maži dujų burbuliukai, vadinami *kavitacionais burbuliukais*. Maži burbuliukai susilieja į didesnius, o šie, perėjus bangai, susitraukia. Susitraukimo metu susidaro vietiniai slėgiai, siekiantys šimtus atmosferų. Dėl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

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

Paprastos formos (neturinčios aklinių skylių ir griovelii) detalės gali būti nuvalytos įrenginiuose, dirbančiuose 18–25 kHz dažniu. Sudėtingos formos (turinčios kreivų paviršių, aklinių skylių ir griovelii) detalės ne visada gerai nuvalomos apdirbant šiais dažniais, nes tokio dažnio bangų ilgai 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 milimetru atstumu nuo šaltinio. Valymo procese panaujojus tampruosius aukštojo dažnio (200–1600 kHz) virpesius, gerokai sutrumpėja ultragarsinių virpesių banga, padidėja darbinės terpės dalelių pagreitis, todėl valymo procesas gali vykti esant didesniams atstumui nuo spinduliavimo šaltinio.

Kartais naudinga valomajį 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 pastoviui 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 tampliuju virpesių greičio ir svyruojančio slėgio amplitudžių pasiskirstymas ultragarsinėje vonioje: a – detalė slėgio verpete; b – detalė greičio verpete; c – masyvi detalė slėgio verpete; d – tuščiavidurė detalė slėgio verpete; v_m – tampliuju virpesių greičio amplitudė (punktirinė linija); p_m – svyruojančio slėgio amplitudė (ištisinė linija); 1 – virpesių šaltinio diafragma; 2 – vonios sienelės; 3 – plokštelių pavidalo detalė; 4 – skystis; 5 – masyvi detalė; 6 – stačiakampė tuščiavidurė detalė

5.6.5.2. Valymo terpių parinkimas

Valymo terpė 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 mechaniskai, 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 neatspartūs;
- 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 skyriu ir nereaguojantys (šiuo atveju terpė, nuvalydamas nuo detalės paviršių nešvarumus, neturi chemiškai reaguoti su detalės medžiaga arba cheminę sąveiką turi būti gerokai lėtesnė už patį valymo procesą ir neturi sukelti detalės ar medžiagos fizinių mechaninių savybių pažeidimų).

Jeigu nešvarumai tvirtai susijungę su valomuoju paviršiumi, chemiškai nereaguojant su valymo terpe ir jei jų kavitacinis atsparumas lygus detalės medžiagos kavitacioniam atsparumui ar jį virsija, tai tokiai nešvarumų negalima pašalinti ultragarsu.

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

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

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

Galvanine danga padengtomis detalėms valyti naudojami organiniai tirpikliai (freonas 113, trichloretilenas ir kt.). Jais valant nereikia detalių apsaugoti nuo korozijos, jas lengviau išdžiovinti. Organiniai tirpikliai negalima nuvalyti plėvelių, turinčių didelį kavitacinių atsparumą, chemiškai nereaguojančių su valymo skysčiu (poliravimo pastos ir kt.). Panašiems nešvarumams valyti geriau naudoti vandeninius, šarminius arba neutralius tirpalus su paviršiu aktyvinančiais priedais. Naudojant tokius tirpalus formuoja didesnio erozinio aktyvumo kavitacinė sritis ir gerokai efektyviau mechaniskai ardoma plėvelę.

Gamyboje įvairios metalinės detalės valomos daugiakomponenčiais šarminiais tirpalais, sumaišytais iš kelių skirtingu šarminių druskų ir paviršiu aktyvinančiu 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 schemas, 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 atlkti, prijungus prie detalių krepšio vibratorių arba vibrnuojant 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, aklino sioms skylėms, kanalams apdirbtis. 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 sukeliama akustinio kontakto tarp detalės ir keitiklio metu. Detale tampa antriniu spinduliavimo šaltiniu, todėl valymo procesas vyksta ne tik dėl sukelto ultragarso skystyje, bet ir dėl pačios detalės virpesių, kurie sukelia nešvarumų sluoksniaivimąsi. Apdirbant didelių matmenų detales, reikia keisti keitiklio vietą, nes sumažėja ultragarsinių virpesių intensyvumas dėl cilindrinio ultragarso bangos pobūdžio.

5.7. Apdirbimas sprogimu

Apdirbimo sprogimu metu dėl susidariusių dujų plėtimosi ruošiniai deformuojami labai didelio greičio (siekių keliolika tūkstančių metrų per sekundę) smūgio bangą. Sprogimo metu susidaręs slėgis į apdirbamą ruošinį perduodamas per skystą, birią arba kietą terpę (vanduo, parafinas, guma ir kt.).

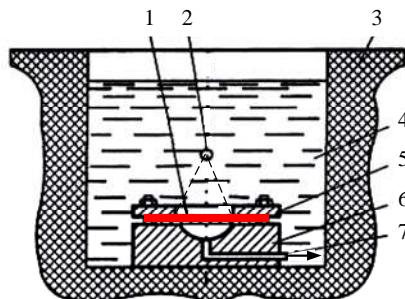
Smūgio bangos parametrai priklauso nuo deformavimo bangos parametru ir terpės mechaninių savybių (suspaudimo laipsnio ir tankio). Žinant detonacinės bangos parametrus, galima apskaičiuoti pradinius smūgio bangos parametrus.

Sprogdinamuju štampavimui gaminamos įvairios detalės iš plieno, spalvotųjų metalų ir jų lydinių (ypač plačiai šis metodas taikomas sudėtingos formos detalėms gaminti). Sprogdinimu padidinamas paviršinio sluoksnio kietis, stipris ir kt.

5.7.1. Hidraulinis štampavimas

Naudojant sprogstamias medžiagas, iš plokščių arba fasoninių lakštinių ruošinių štampuojamos įvairios detalės (daugiausia didelių matmenų ruošiniai iš metalų ir jų lydinių). Sprogdinant dažniausiai štampuojama vandenye. Hidraulinio sprogimo metu susidariusi energija štampuojamam ruošiniui perduodama smūgio bangą ir vandens srautu. *Privalumai:* palyginti su tradiciniais štampavimo būdais, naudojama paprastesnės konstrukcijos įranga, nėra puansonos, didelės energetinės galimybės ir kt.

Pagrindinę technologinę įrangą sudaro matrica (gaminamos vientisinės ir surenkamos iš plieno, ketaus, gelžbetonio ir kt. medžiagų), prispaudimo įtaisas, oro šalinimo sistema ir sprogmenų tvirtinimo įrenginys.



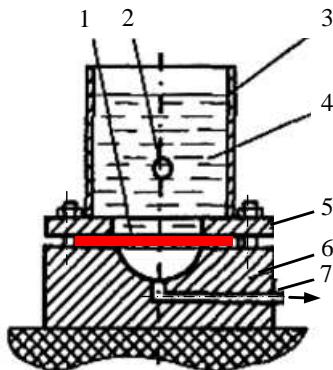
5.51 pav. Hidraulinio štampavimo schema: 1 – ruošinys; 2 – sprogstamoji medžiaga; 3 – betoninė vonia; 4 – vanduo; 5 – prispaudiklis; 6 – matrica; 7 – vakuumo sudarymo sistema

Ruošinys 1 ([5.51 pav.](#)) dedamas ant matricos 6 ir prispaudžiamas žiedu 5. Tam tikru atstumu nuo ruošinio kabinamas sprogmuo 2. Visa tai panardinama į vonią 3 su vandeniu 4. Energija, kuri išsiskiria sprogimo metu, deformuoja ruošinį ir suteikia jam matricos formą. Kad apatinėje matricos dalyje esantis oras netrukdytų apdirbimo procesui, jis iš matricos ertmės išsiurbiamas vakuuminiu siurbliu 7.

Kai smūgio bangos perdavimo terpė yra vanduo, matricos darbiniai paviršiai dengiami korozijai atsparia danga arba į vandenį dedama korozijos inhibitorių.

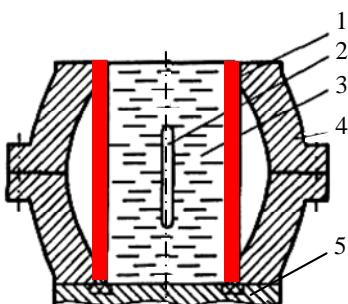
Vonios (baseinai) gaminamos iš plieno arba gelžbetonio metaline danga. Vonios vidus yra du arba tris kartus didesnis už štampuojamąjį detalę, o vonios sienelių storis parenkamas tokis, kad atlaikytų slėgi, kuris susidaro sprogstant. Metalinės vonios statomos ant betoninių pamatų, gelžbetoninės vonios metaline danga įleidžiamos į žemę.

Štampuojant labai didelių matmenų ir nedaug detalių, vietoj vonios naudojamos vienkartinės talpyklos (5.52 pav.), kurios suvra sprogimo metu. Jos gaminamos iš kartono, faneros, polietileno, skardos ir kitų medžiagų. Tokios talpyklos turi išlaikyti tam tikrą vandens kiekį.



5.52 pav. Sprogdinamasis apdirbimas naudojant vienkartinės vandens talpyklas:
 1 – ruošinys;
 2 – sprogmuo;
 3 – vienkartinė vandens talpykla;
 4 – vanduo

Vamzdžiams išplėsti (5.53 pav.) vanduo, kaip perdavimo terpė, pilamas tiesiog į ruošinio vidų. Sprogmenys tvirtinami tiksliai per ruošinių centrą. Našesnė sprogmenų tvirtinimo operacija, kai jie tvirtinami ant plūdės.

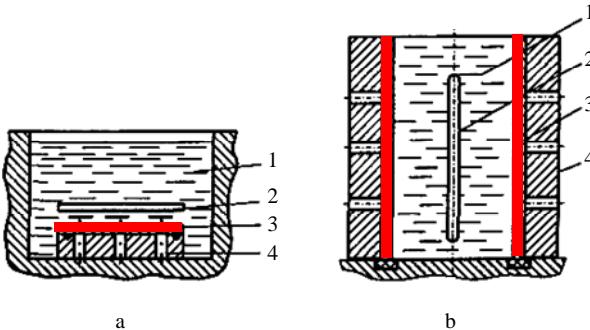


5.53 pav. Vamzdžio išplėtimas:
 1 – ruošinys;
 2 – sprogmuo;
 3 – vanduo;
 4 – matrica;
 5 – laikiklis;

Ruošiant hidraulinio štampavimo technologiją, labai svarbu ne tik tinkamai sudaryti technologinę proceso schemą, bet ir teisingai pasirinkti pagrindinius proceso parametrus: sprogstamosios medžiagos kiekį (apskaičiuojamas), formą, atstumą nuo sprogstamosios medžiagos iki ruošinio ir kt.

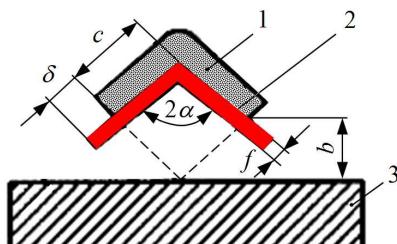
5.7.2. Pramušimas ir pjaustymas

Sprogdinimu galima pramušti skyles (5.54 pav.), iškirsti įvairios formos detales, pjaustyti.



5.54 pav. Skylių pramušimo schemas: *a* – plokščiame ruošinyje; *b* – vamzdyme;
1 – perdavimo terpė; 2 – sprogmuo; 3 – ruošinys; 4 – matrica

Sprogimo energiją galima panaudoti plieniniams lakštams ir valcuotiemis profiliams pjaustyti (5.55 pav.).



5.55 pav. Metalo pjaustymo schema:
1 – sprogmuo;
2 – ruošinys;
3 – laikiklis

5.1 lentelė. Įvairių medžiagų ruošinių pjaunamo metalo storis

Medžiaga	Pjovimo gylis, mm
Varis	18,0
Žalvaris	16,0
Aliuminis	38,0
Aliuminio lydinus	28,0
Mažaanglis plienas	12,0
Nerūdijantysis plienas	9,4
Švinas	33,0

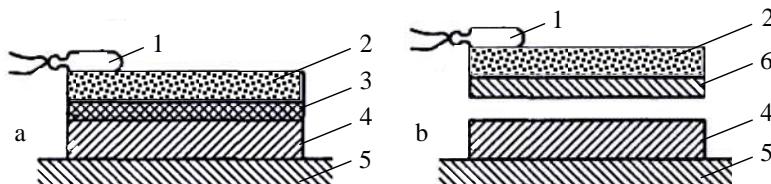
Pjaunamo metalo storis (5.1 lentelė) priklauso nuo medžiagos metalinio laikiklio storio ir kampo 2α .

5.7.3. Paviršių sustiprinimas sprogimui

Sprogimu padidinamas paviršinio sluoksnio kietis, atsparumas dilimui ir ilgalaikiškumas. Šiuo būdu sustiprinamos detalės iš plieno, spalvotųjų metalų ir jų lydiniai.

Naudojamos dvi pagrindinės sustiprinimo sprogimui schemas (5.56 pav.):

1. Kontaktinis sustiprinimas smūgio bangą (5.56 pav., a). Metalas sustiprinamas dėl pagrindinės ir atspindžio smūgių bangų, kurios susidaro sprogimo metu. Sprogmuo 2 dedamas ant detalės 4, pritvirtintos prie pagrindo 5. Tarp detalės ir sprogmens gali būti tarpiklis 3. *Apdirbimo privalumai:* tinkamai plokštiems ir kreiviesiems paviršiams (ypač sudėtingo profilio), kurių negalima sustiprinti plastinio deformavimo metodais, sustiprinamas gerokai storesnis sluoksnis ir kt.
2. Sustiprinimas kietu kūnu, kuris po sprogimo krinta ant apdirbamos detalės (5.56 pav., b). Krintančioji plokštė 6 dedama tam tikru atstumu nuo stiprinamo paviršiaus. Jos greitis ir smūgio energija priklauso nuo sprogstamosios medžiagos kieko ir tipo, taip pat nuo atstumo iki stiprinamojo paviršiaus. *Apdirbimo trūkumas* – naudojamas tik plokštiems paviršiams sustiprinti.



5.56 pav. Sustiprinimo sprogimui schemas: a – kontaktinis sustiprinimas smūgio bangą; b – sustiprinimas krintančiuoju kietu kūnu; 1 – detonatorius; 2 – sprogmuo; 3 – tarpiklis; 4 – stiprinama detalė; 5 – pagrindas; 6 – krintančioji plokštė

Sustiprinimas sprogimui plačiai taikomas statybos, kalnakasybos ir mašinų detalėms stiprinti, taip pat atskiriems geležinkelio elementams (pavyzdžiu, po apdirbimo sprogimui geležinkelio kryžinių ilgalaikiškumas padidėja iki 300 %), kai kurių kosminiu laivų detalėms, pagamintoms iš anglinio ir nerūdijančiojo plieno, aluminio, titanio ir kt.

5.8. Elektronpluoščio apdirbimas

Apdirbimas elektronų pluoštu pagrįstas tuo, kad elektronų pluošto kinetinė energija paverčiamą šilumine. Keičiant elektronų greitį ir elektronų pluošto tankį, galima labai sukoncentruoti šiluminę energiją ir ją nukreipti į bet kurį apdirbamą 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 (vakuumo lydoma, kai reikia gauti ypač grynus metalus), garinimas,

terminis apdorojimas, skylių pramušimas (perforavimas), smulkų detalių, fasoninių skylių ir griovelii išpjovimas (pvz., gaminant filjeres), karščiu 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 µm) skylės, apdirbamos sunkiai pjaustomos ir lengvai besioksiduojančios medžiagos (apdirbama vakuumė), padengiami detalių paviršiai nuo kelių mikrometrų iki milimetro dešimtujų dalių storio danga.

Elektronų pluoštą nukreipus į apdirbamą detalęs paviršių, jis, veikiamas didelės energijos mikroimpulsu, įkaista iki austenitinės sandaros tiksliai nustatytae plote. Nutraukus kaitinimą, paviršius užsigrūdina ir sukietėja. Paviršiaus kietis po apdirbimo elektronų pluoštu būna 1–2 vienetais pagal Rokvelo skalę didesnis negu po išprastinio 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 vakuumė būdus (pavyzdžiu, indukcinį arba lankinį): lydymo metu labiau įkaitinamas skystas metalas, lengviau pašalinamos priemaišos, vyksta fiziniai cheminiai procesai, kurie, lydant kitais būdais, nespėja ivykti iki galo arba apskritai neįmanomi.

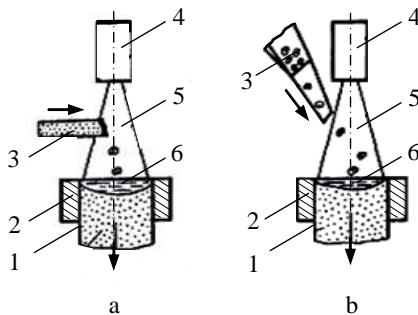
Lydant metalą vakuumė, Jame gerokai sumažeja dujų (ypač deguonies), kaitinamos suskyla kai kurios žalingos priemaišos (nitridai, karbidai, oksidai), t. y. vyksta perlydomo metalo rafinavimas (metalas turi mažiau nemetalinių intarpų).

Dauguma lydinių, kurių pagrindą sudaro titan, volfram, molibdenas, niobis ir kiti chemiškai aktyvūs metalai, yra išlydyti vakuumė.

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

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

5.57 pav. Elektronpluoštis perlydymas: a – perlydomas strypas; b – perlydoma bira medžiaga (milteliai, granulės); 1 – liejinas; 2 – tiglis; 3 – perlydomas metalas; 4 – elektroninis projektorius; 5 – elektronų pluoštas; 6 – skystas metalas



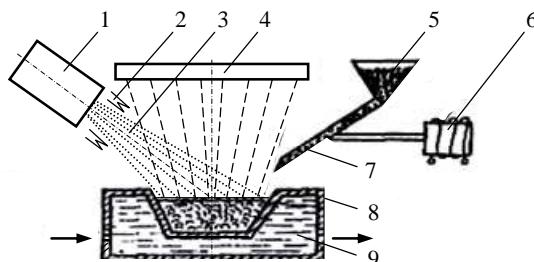
5.8.2. Elektronpluoštis medžiagų garinimas

Medžiagų garinimas elektronų pluoštu plėčiai taikomas plonų dangų technologijoje. Skirtingai nuo kitų dengimo būdų, kuriuose garintuvu paviršius kaitinamas per tieglio sienelę arba aukštatemperatūriniu kaitinimo elementu, elektronų pluoštas tiesiogiai kaitina dengiamosios medžiagos paviršiu (5.58 pav.).

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

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

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



5.58 pav. Dangos užgarinimo įrenginys: 1 – elektroninis prožektorius; 2 – pluošto kreipimo sistema; 3 – elektronų pluošto srautas; 4 – padéklas (dengiamoji detalė); 5 – bunkeris su dengiamaja 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 skirtinį medžiagų dangas, pavyzdžiu, taip gaunama trisluoksnė pseudolydinio danga, sudaryta iš 90 % Ti , 6 % Al ir 4 % V .

Elektroniniu pluoštu galima garinti ir nemetalines medžiagas, pavyzdžiu, 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 apdirbtai toms medžiagoms, kurias sunku apdirbtai tradiciniais pjovimo būdais.

Aukšto slėgio vandens čiurkšle apdirbama:

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

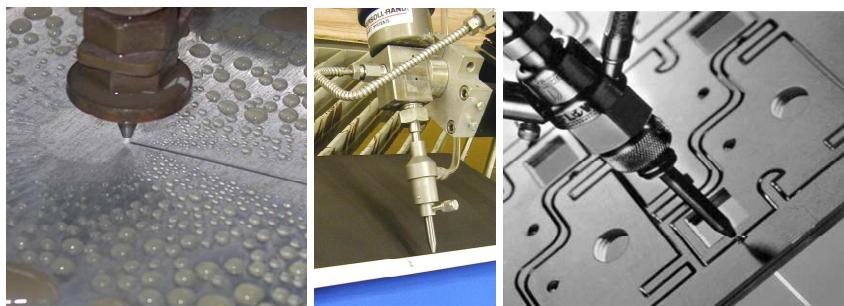
Dažniausiai šiuo būdu apdirbami (pjauustomi, gręžiami, graviruojami ir kt.) stiklas, keramika ir šiuolaikiniai lydiniai, kurių negalima perkaitinti, taip pat kompozicinės, korėtos struktūros medžiagų detalės, smulkinių (medienos drožlių) plokštės, plastikai ir labai plonos detalės (5.59 pav.). Apdirbtos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

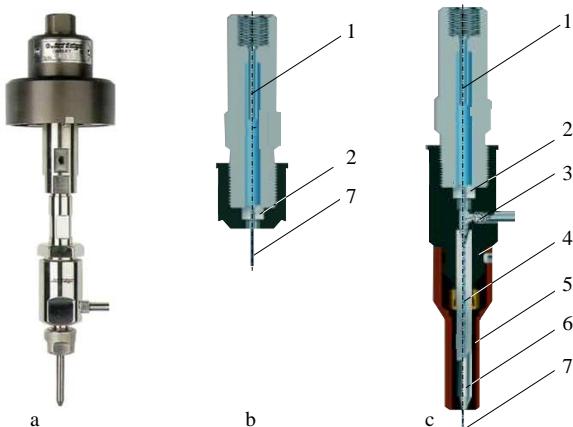
5.9.1. Apdirbimo vandens ir abrazyvo čiurkšle technologija

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



5.60 pav. Apdirbimas vandens čiurkšle

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



5.61 pav. Vandens čiurkšlės piovimo galvutės: a – piovimo galvutės bendras vaizdas; b – „Waterknife“ piovimo galvutė; c – „Paser“ piovimo 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 igreitinti abrazyvo daleles. Dėl didelio vandens greičio maišymo kameroje susidaro išretėjimas, todėl i ją įtraukiamas abrazyvas ir vandens čiurkšlė maišoma su abrazyvinėmis dalelėmis (abrazyvas i piovimo įrankį tiekiamas specialiu dozatoriumi). Fokusavimo tūtoje (dažniausiai 60–80 mm ilgio ir 0,8–1,2 mm skersmens) abrazyvinės dalelės igreitinamas ir fokusuojamas. 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 reikiama 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.

Priklasomai nuo įrenginio konstrukcijos ir siurblio našumo gali būti viena, dvi (universaliuose įrenginiuose) arba trys ir daugiau piovimo galvucių (specializuotuose įrenginiuose). Apdirbant ruošinį, piovimo 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 guminus audinius ir

kt.). Likusiai čiurkšlės energijai slopinti naudojamas vanduo (pjaustoma virš 700–800 mm gylio vandens rezervuaro, kuriame absorbuojama čiurkšlės energija).

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

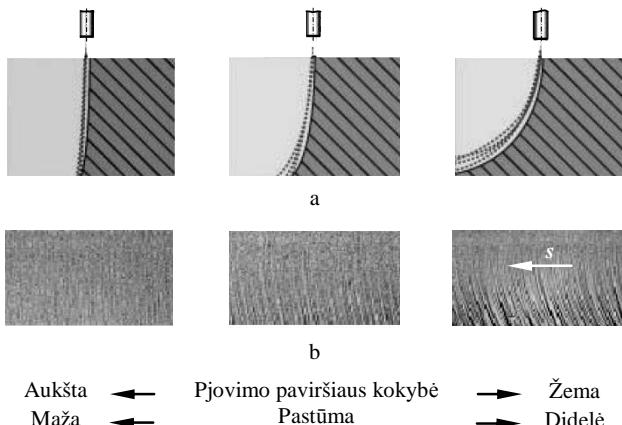
5.9.2. Pjovimas vandens ir abrazyvo čiurkšlė

Kietoms medžiagoms pjauti naudojamos abrazyvo dalelės, kurias vanduo nukreipia į pjovimo vietą. Kiekviena iš šių dalelių paviršių apdoroja mikropjovimų. Dažniausiai gaminio išpjovimas iš ruošinio pradedamas formuojant (gręžiant) skylę.

Naudojami trys ruošinio gręžimo būdai:

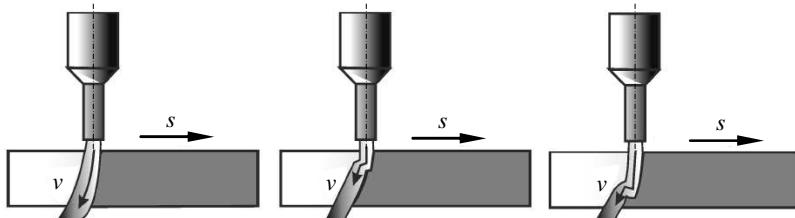
1. Nejudančia pjovimo galvute – vandens ir abrazyvo čiurkšlė išteka pjovimo galvutei nejudant. Sklyje susidaro didelis slėgis, kuris slopina čiurkšlę, o aklinojoje sklyje atispindėjusi čiurkšlė gali pažeisti abrazyvo tūtą.
2. Apskritiminu jadesiu – pjovimo galvutė juda apskritiminu jadesiu. Esant siauroms išémoms, apskritiminio jadesio spindulys gali būti per didelis.
3. Slankiojamuoju jadesiu – galvutė juda tiesiaeigiu slenkamuoju jadesiu. 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 statmenų; b – pjovimo paviršiaus kokybė

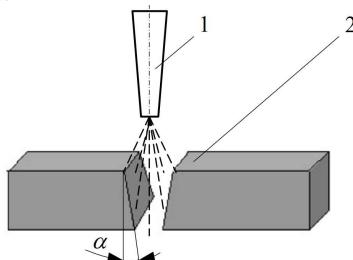
Didėjant pastūmai, pjaunamajame paviršiuje susidaro laiptelis (5.63 pav.), kurį veikia pagrindinė čiurkšlės energija. Po šio laiptelio pjovimas ne tokis efektyvus. Čiurkšlės intensyvai pjaunamas ir žemyn stumiamas laiptelis didėja ir platėja. Šis laiptelių susidarymo ir išnykimo ciklas nenutrukstamas,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



5.63 pav. Laiptelio susidarymo schema didėjant pastūmai

Pjūvio plotį lemia tūtos skersmuo (kuo jis didesnis, tuo pjūvis platesnis). Čiurkšlės išėjimo 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 pastūmą, kampus mažėja iki 1° , tačiau pernelyg sumažinus pastūmą, ruošinio viduje galimas plačiausias pjūvis.



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

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 abrazivo.

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 abrazivo.

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, tame nėra mikrotrūkimų, terminių pakitimų (sukietinimo ir kt.), šlako ir degenų, nesusidaro užvartos;
- pjaunamos kietos, minkštос, akytos, jautrios temperatūrai ir slėgiui (pvz., plastiku dengta skarda), armuotos, net lipnios medžiagos;
- didelis pjovimo našumas bei tikslumas ($\pm 0,1$ mm);
- išpjaujanamas mažo kampo išėmös;
- 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 pastumą;
- 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, minkštias medžiagas iki 200 mm, akytas bei minkštias medžiagas – iki 300 mm storio. Kuo medžiaga kietesnė ir storesnė, tuo lėčiau pjaunama.

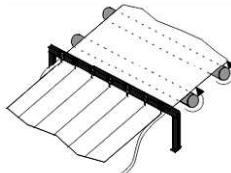
Lazerinis pjovimas yra pranašesnis už pjovimą vandens čiurkšle, kai reikia pjauti iki 6 mm spalvotuosius metalus, iki 20 mm konstrukcijų ir iki 12 mm nerūdijantių plienų. Kai sluoksnis storesnis kaip 25 mm, pjaunama vandens čiurkšle.

Plona čiurkšle išpjaujanamas paprastos ir precizinės geometrinės formos detalės (5.59 pav.). Daugeliu atveju apdirbimo tikslumas prilygsta apdirbimo frezavimo staklėmis tikslumu.

Pjovimo vandens čiurkšle panaudojimas:

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

- *akmens apdorojimo versle* – pjaustomos sienų ir grindų dekoracijos iš granito, marmuro, keraminių plytelų 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 koordinacių 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 pjaunamu konstrukcinių medžiagų storis

Konstrukcinė medžiaga	Pjūvis lazeriu, mm	Pjūvis vandens čiurkšle, mm	
		kokybėškas	rupus
Nerūdijantis plienas	iki 12	iki 30	iki 60
Statybinis plienas	iki 20	iki 30	iki 60
Irrankinis plienas	iki 15	iki 30	iki 60
Aliuminis	iki 8	iki 40	iki 80
Varis, žalvaris, bronza	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

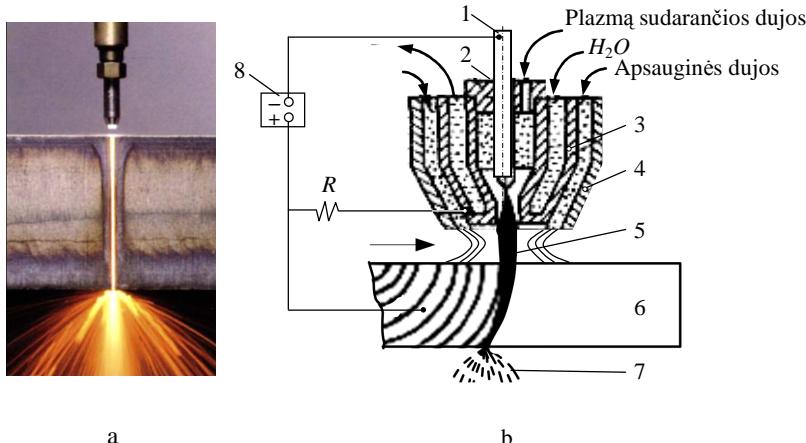
Kanados kompanija „Flow“ Las Vegaso mieste (JAV) vykusioje pramoninės technikos parodoje „Fabtech International & AWS Welding show 2008“ pademonstravo 6-šių ašių robotizuotas pjovimo vandens srove sistemas, kuriomis galima suformuoti sudėtingus trimačius raižinius (5.66 pav.). Palyginti su egzistuojančiais skaitmeniniu būdu valdomais (*computer numerically controlled, CNC*) 5 ašių įrenginiais, naujasis produktas yra universalus, gali būti perderinamas įvairiausiems gaminiams gaminti, juo pagamintų gaminiių 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 lydiniam ir kt. pjauti. Didžiausias našumas pasiekiamas pjauant 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 volframovo elektrodo ir detalės sukuriamas nuolatinės srovės lankas. Plazma (jonizuotos dujos), kurios temperatūra 10000–30000 °C, nukreipiama į apdirbamą ruošinį paviršių, išlydo ir pašalina pjaunamą medžiagą iš pjūvio vietas.



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. Prosesė naudojami specialūs *CO*₂ arba azoto ekrano antgaliai. Vietoj dujinio ekrano gali būti naudojamas vandens purškimo antgalis, kuris dar labiau susiduria liepsnų. Plienas pjaunamas 80 % azoto ir 20 % deguonies mišiniu arba tik azotu, naudojant vandens ekrana.

Lakštams pjauti parenkama 120–400 V įtampa. Priklasomai nuo pjaunamos medžiagos ir pjovimo greičio, srovė gali būti 20–1000 A.

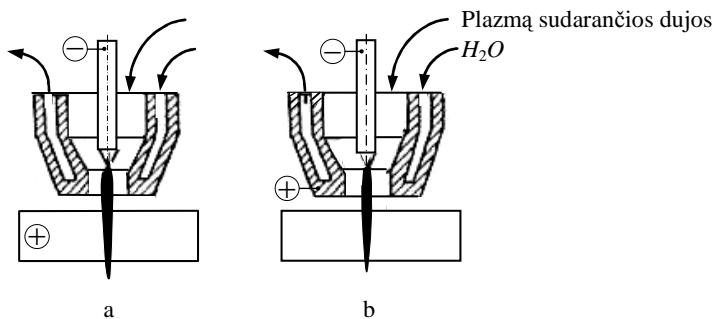
Paprastai automatinio pjovimo įrenginio stalas yra panardintas į vandenį iki pjaunamos detalės apačios. Plazmos dujos nupučia taip pat dujomis tapusio metalo daleles į vandenį, kur jos sustingsta. Prie degiklio prijungtas antgalis sukuria vandens ekrana aplink lanką. Tai sumažina pjauant kylančių triukšmų.

Plazminio pjovimo privalumai: galima pjauti bet kokį metalą ar lydinį (iprastiniu 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

Plazminiu lanku formuojamos skylės, išpjauunami (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.



5.69 pav. Plazminis pjovimas: a – tiesioginis; b – netiesioginis

Mikroplazminis pjovimas. Mikroplazminiu lanku 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.

Literatūra

1. Bočkus S., 2013. Medžiagų inžinerija. 1 dalis. Kaunas: Technologija, 215 p.
2. Jonušas R., Kalpokas J., Lazaravičius P., Jankauskas V., 2004. Koncentruotos energijos metodų taikymas apdirbant medžiagas. Kaunas: Technologija, 272 p.
3. Kulikauskas L., Ambroza P., Juodis A. ir kt., 1991. Konstrukcinių medžiagų technologija ir medžiagotyra. Vilnius: Mokslas, 364 p..
4. Naruškevičius J., Petrovičėvas V., 2010. Suvirinimas. Vilnius: Senoja, 240 p.
5. Ostaševičius V., Dundulis R., 2004. Technologiniai įrenginiai ir įrankiai. Kaunas: Technologija, 608 p.
6. Šniuolis R., 2005. Inžinerinės medžiagos. Sandara, savybės, panaudojimas. Šiauliai: Lucilijus, 256 p.
7. Udras, G., Jatulis, G., 2006. Medžiagų pjaustymo modernūs būdai. Profesinio mokymo metodikos centras. Vilnius, 80 p.
8. Valiulis A. V., 2007. Legiruotieji plienai ir jų suvirinimas. Vadovėlis. Vilnius: Technika, 248 p.
9. Ares J. A., 2006. Metal: Forming, Forging, and Soldering Techniques. Barron's Educational Series, 160 p.
10. Askeland D. R., Wright W. J., 2013. Essentials of Materials Science & Engineering. Cengage Learning, 678 p.
11. Brandt D. A., Warner J. C., 2004. Metallurgy Fundamentals. Goodheart-Wilcox Publisher, 301 p.
12. Callister W., 2006. Materials Science and Engineering: An Introduction. John Wiley & Sons, 832 p.
13. Cambell J., 2004. Castings Practice: The Ten Rules of Castings. Butterworth-Heinemann, 224 p.
14. Cary H., Helzer S., 2004. Modern Welding Technology. Prentice Hall, 736 p.
15. Chastain S., Chastain S. D., 2004. Metal Casting: A Sand Casting Manual for the Small Foundry. Chastain Publishing, 192 p.
16. Duley W. W., 1998. Laser Welding. Wiley-Interscience, 251 p.
17. Finch R., 2007. Welder's Handbook: A Guide to Plasma Cutting, Oxyacetylene, ARC, MIG and TIG Welding, 160 p.
18. Hosford W. F., Caddell R. M., 2007. Metal Forming: Mechanics and Metallurgy. Cambridge University Press, 328 p.
19. Hosford W. F., 2005. Physical Metallurgy (Materials Engineering). CRC, 520 p.
20. Karen R., 2004. Welding Basics, 144 p.
21. Moniz B., 2003. Metallurgy. American Technical Publishers, 554 p.
22. Finch R., 2007. Welder's Handbook: A Guide to Plasma Cutting, Oxyacetylene, ARC, MIG and TIG Welding, 160 p.
23. Stephenson D., 2005. Metal Cutting Theory and Practice. CRC, 864 p.
24. Szumera S., 2002. The Metal Stamping Process. Industrial Press, 224 p.
25. Wagoner R., Chenot J., 2005. Metal Forming Analysis. Cambridge University Press, 390 p.
26. Walker J. R., Polanin W. R., 2004. Arc Welding. Goodheart-Willcox Co, 192 p.
27. <http://www.karbonas.lt/> Geriausias būdas visoms medžiagoms pjauti.
28. <http://www.serpantinas.com/> Suvirinimas

Šniuolis, Raimondas

Šn-13 Medžiagų inžinerija / Raimondas Šniuolis. – Šiauliai: Šiaulių universitetas, 2014. – 193 psl.: iliustr.

Leidinyje nagrinėjami metalurginiai juodujų ir spalvotųjų metalų gavybos procesai, pramonėje taikomi ruošinių ir mašinų detalių formavimo būdai: liejimas, apdirbimas spaudimu, suvirinimas, koncentruotos energijos ir kitų netradicinių metodų technologiniai procesai, šių procesų fiziniai pagrindai ir taikymo galimybės apdirbtį medžiagas.

Leidinys skirtas techniškųjų specialybių studentams ir įmonių specialistams, norintiems plačiau išnagrinėti šiuolaikinius apdirbimo modifikuojant paviršinius sluoksnius būdus ir technologinius procesus

UDK 620.1(075.8)

Šn-13

ISBN 978-609-468-007-6

Raimondas Šniuolis

MEDŽIAGŲ INŽINERIJA

Mokomoji knyga

Kalbos redaktorė Genovaitė Lapinskaitė

Pasirašyta spaudai 2014-06-16. 9,7 leidyb. apsk. l. Tiražas 25. Užsakymas 2928.

Išleido ir spausdino UAB „BMK Leidykla“, J. Jasinsko g. 16, Vilnius LT-03163

info@bmkleidykla.lt, www.bmkleidykla.lt

ISBN 978-609-468-007-6



9 786094 680076