

**Vilniaus Gedimino technikos universitetas**

**J. Ščemeliovas**

**INŽINERINĖS MEDŽIAGOS  
IR JŲ GAMYBOS BEI APDOROJIMO  
TECHNOLOGIJOS**

**Mokomoji knyga**

**Vilnius**  **2005**  
LEIDYKLA  
TECHNIKA

UDK 620.1(075.8)  
Šč-13

**J. Ščemeliovas. INŽINERINĖS MEDŽIAGOS IR JŲ  
GAMYBOS BEI APDOROJIMO TECHNOLOGIJOS.**  
Mokomoji knyga. Vilnius: Technika, 2005. 120 p.

Pateikta istorinė konstrukcinių medžiagų raidos apžvalga. Aprašomos klasikinės, polimerinės, dangų medžiagos ir kompozitai, jų panaudojimo sritys bei apdirbimo technologijos. Rašoma apie statyboje ir mašinų gamyboje naudojamas inžinerines medžiagas ir taikomas technologijas.

Leidinys skirtas VGTU mechanikos ir pramonės inžinerijos studijų krypties studentams (moduliai „Medžiagų mokslas“, „Medžiagų ir technologijų raida“).

Leidinį rekomendavo VGTU Mechanikos fakulteto Studijų komitetas

Recenzavo prof. dr. V. Vekteris ir doc. dr. V. Turla

VGTU leidyklos „Technika“ 770 mokomosios metodinės literatūros knyga

ISBN 9986-05-863-5

© J. Ščemeliovas, 2005  
© VGTU leidykla „Technika“, 2005

## TURINYS

ĮVADAS .....	6
1. NUO SENIAUSIŲ LAIKŲ NAUDOJAMOS MEDŽIAGOS .....	7
1.1. Akmuo .....	7
1.2. Molis .....	9
1.2.1. Molio naudojimas statyboje .....	10
1.2.2. Fajansas .....	11
1.2.3. Porcelianas .....	12
1.3. Kaulas .....	13
1.4. Mediena .....	14
2. KLASIKINĖS IR NAUJOS MEDŽIAGOS, JŲ GAMYBA BEI NAUDOJIMAS .....	17
2.1. Medžiagų savybės .....	17
2.1.1. Pagrindinės mechaninės savybės .....	18
2.2. Metalai ir jų lydiniai .....	19
2.2.1. Plienas .....	22
2.2.2. Plieno rūšys .....	23
2.2.3. Plieno suvirinamumas .....	25
2.2.4. Unikalus plienas .....	26
2.2.4.1. Damasko plienas – bulatas .....	26
2.2.4.2. Stenfordo universiteto plienas .....	28
2.3. Ketūs .....	29
2.4. Spalvotieji metalai ir jų lydiniai .....	34
2.4.1. Aliuminis ir jo lydiniai .....	36
2.4.1.1. Deformuojamieji aliuminio lydiniai .....	38
2.4.1.2. Liejamieji aliuminio lydiniai .....	39
2.4.1.3. Sukeptieji milteliniai aliuminio lydiniai .....	40
2.4.2. Varis ir jo lydiniai .....	41
2.4.2.1. Žalvaris .....	42
2.4.2.2. Bronza .....	43

2.4.3. Magnis ir jo lydiniai .....	47
2.4.4. Titanas ir jo lydiniai .....	48
2.4.5. Lydmetaliai .....	49
2.4.5.1. Žematemperatūriai lydmetaliai .....	50
2.4.5.2. Aukštemperatūriai lydmetaliai .....	52
2.5. Šalčiui atsparūs lydiniai .....	54
2.6. Kaitrai atsparūs ir kaitroje patvarūs lydiniai .....	56
2.7. Dilimui atsparios medžiagos .....	58
2.7.1. Antifrikcinės medžiagos .....	59
2.7.2. Kontaktiniam dėvėjimuisi atsparios medžiagos .....	63
2.7.3. Dilimui atsparios medžiagos, veikiamos dinaminių apkrovų .....	65
2.7.4. Abrazyviniam dilimui atsparios medžiagos .....	65
2.7.5. Kietlydiniai .....	66
2.7.6. Nemetalinės pjovimo įrankių medžiagos .....	67
2.8. Specifinių fizikinių savybių lydiniai .....	68
2.8.1. Magnetiniai lydiniai .....	68
2.8.2. Elektrovaržiniai lydiniai .....	69
2.8.3. Tamprieji ir specialiųjų šiluminių savybių lydiniai ..	70
2.9. Kompozicinės medžiagos .....	72
2.10. Polimerinės medžiagos – plastikai .....	73
2.11. Superlaidininkai .....	75
 3. TERMINIO APDOROJIMO IR DANGŲ TECHNOLOGIJOS .....	76
3.1. Plieno atkaitinimas ir normalizavimas .....	76
3.2. Plieno grūdinimas ir atleidimas .....	77
3.3. Medžiagų termomechaninis apdorojimas .....	79
3.4. Medžiagų termocheminis apdorojimas .....	80
3.5. Terminio purkštimo technologija .....	81
 4. SUVIRINIMO RAIDĄ .....	82
4.1. Kalvystė .....	83
4.1.1. Kalvystės raida .....	83

4.1.2. Kalimo įranga ir technologija .....	85
4.1.3. Kalviškasis suvirinimas .....	87
4.1.4. Kalvių gaminiai .....	88
4.2. Elektrolankinis suvirinimas .....	92
4.2.1. Pirmojo elektros energijos šaltinio sukūrimas .....	92
4.2.2. Elektros lanko atradimas ir pritaikymas .....	94
4.2.3. Pirmasis litavimo gamybinis pritaikymas .....	96
4.2.4. Elektros srovės pritaikymas suvirinimui .....	97
4.2.5. Elektros lanko naudojimas suvirinimui .....	98
4.2.6. Elektrolankinio suvirinimo raida .....	104
4.3. Dujinis suvirinimas .....	109
4.4. Dujinis pjovimas .....	111
4.5. Specialūs suvirinimo ir pjovimo būdai .....	113
4.6. Pjovimas vandens srove .....	116
Literatūra .....	119

## IVADAS

Mokslas apie inžinerines medžiagas, jų apdirbimo technologijas ir naudojimo sritis turi įtakos technikos ir statybos pažangai, o tai lemia visos pasaulinės ekonomikos raidą.

Mašinų ir prietaisų detalės, įrankiai, technologinė įranga, statybinės konstrukcijos, inžineriniai ir elektrotechnikos įrenginiai būna labai įvairūs. Jų detalės, mazgai, agregatai, konstrukcijos, eksploatuojami įvairiomis darbo sąlygomis, yra skirtingų formų ir matmenų, priklausančių nuo apkrovų dydžių bei pobūdžio, aplinkos temperatūros ir jos agresyvumo, apdirbimo bei surinkimo technologijų. Tokius skirtingus reikalavimus gali atitikti tik *tinkamai parinktos inžinerinės medžiagos ir optimalios jų gamybos, apdirbimo ir naudojimo technologijos*.

Fizikinės, mechaninės, cheminės, technologinės medžiagų savybės lemia pagrindinius inžinerinės įrangos ar statybinės konstrukcijos kokybės rodiklius: *tinkamumą darbui, patikimumą, ilgaamžiškumą*, t. y. užtikrina mašinos ar konstrukcijos galėjimą kokybiškai atlikti numatytas funkcijas per visą eksploatacijos laiką. Fizinės, mechaninės, cheminės savybės lemia medžiagų tinkamumą atlikti būtinas funkcijas, o nuo technologinių savybių priklauso jų apdirbimo sąlygos. Galimybė keisti medžiagų savybes, nekeičiant jų cheminės sudėties (pavyzdžiui, termiškai apdorojus ar temperatūroms esant arti absoliučiojo nulio), padidina medžiagų pritaikymo galimybes, labai palengvina jų apdirbimą. Medžiagų savybės ir nusidėvėjimas kinta nuo įvairių technologinių veiksnių: aukštųjų temperatūrų, didelių slėgių, klimato sąlygų, dėl įvairių mechaninių apkrovų jas eksploatuojant. Todėl labai svarbu parinkti reikiamas medžiagas ir taikyti optimalias jų apdirbimo technologijas.

Autorius yra dėkingas I. Gedzevičiui už suteiktą medžiagą apie purškimo technologijos ypatumus.

## **1. NUO SENIAUSIŲ LAIKŲ NAUDOJAMOS MEDŽIAGOS**

Akmens amžiuje (800 000–2000 metų pr. Kr.) žmonės darbo įrankius ir ginklus gamindavosi iš akmens, medžio, kaulo. Vėliau, žalvario (bronzos) amžiuje (XVI a.–VI a. pr. Kr.), pradėti gaminti įvairūs dirbiniai iš žalvario.

Lietuvoje XIII–XII a. pr. Kr. iš įvežamos žalvario žaliavos buvo gaminami baltiškieji įtveriamieji atkraštiniai ir kovos kirviai, smeigtukai, apyrankės. Kadangi žalvaris buvo brangus, gaminiams sulūžus ar sudilus, iš jų būdavo gaminami nauji dirbiniai.

Apie V a. pr. Kr. Lietuvoje pradėta naudoti geležis, kurios dalis būdavo įvežama, o kita dalis būdavo gaunama atviruose laužuose, duobėse (nepučiant oro) iš vietinės balų rūdos (II a. pr. Kr.). Vėliau oro trauka buvo sudaroma vėjo srautu, dar vėliau – pučiant orą dumplėmis. Taip gauta geležis – metalo luitas, nuvalius pelenus, būdavo įkaitinamas ir kalamas.

### **1.1. Akmuo**

Tai kieta uoliena arba jos luitas. Gamtoje, be masyvių uolienų, randama nugludintų akmens gabalų: >15 cm skersmens (riedulių) ir mažesnių (biriosiose uolienose). Akmuo kaip statybinė medžiaga ir darbo priemonė buvo naudojamas nuo neatmenamų laikų: pirmykščiai žmonės iš akmens darėsi įrankius jau prieš milijoną metų. 1998 m. prie Japonijos krantų po vandeniu buvo aptikta 27 m aukščio piramidė iš akmens blokų (kraštinės ilgis – 187 m), kurios amžius – apie 10 tūkst. metų. Iš akmens luitų pastatytos senovės Egipto faraonų piramidės (3–2 tūkst. pr. Kr.). Didžiausia iš jų – vienas iš septynių pasaulio stebuklų – Cheopso piramidė, kurios aukštis 139 m (buvo 147 m), o kraštinė – apie 230 m. Ją statė 20 metų 100 tūkst. žmonių. Tam prireikė 2,5 mln. akmens blokų, kurių kiekvienas sveria iki 15 t. Kaip tokio dydžio akmens luitai buvo apdirbti, kaip jie buvo atgabenti į vietą ir sukrauti, neaišku iki šiol. Remiantis realiausia hipoteze, piramidės statyba vyko taip: aplink

pagrindą pildavo smėlį, kad būtų galima sudėti kitą luitų eilę, tuomet vėl aplinkui pildavo smėlį ir taip – iki pat viršūnės. Užbaigus darbą smėlis būdavo nukasamas ar, laikui bėgant, jį vėjas tiesiog nupūsdavo (smėlio migracija dykumoje – įprastas dalykas). Stebina Egipto piramidžių matmenų tikslumas. Pavyzdžiui, Cheopso piramidės kraštinė yra  $108 \cdot 1,08^{10}$  m, Chefreno –  $108 \cdot 1,08^9$  m, Mikerino – 108 m. Įdomu tai, kad šie skaičiai atitinka mūsų Visatos sukūrimo principus. Tą rodo kad ir šie duomenys:

- 1) Žemės tūris –  $108 \cdot 10^{10} \text{ km}^3$ ;
- 2) Saulės masė –  $108 \cdot 10^9 \text{ t}$ ;
- 3) Žemės sukimosi aplink Saulę greitis –  $108 \cdot 10^3 \text{ km/h}$ ;
- 4) Žemės dinaminės formos koeficientas –  $108 \cdot 10^{-5}$ ;

Stabilių cheminių elementų skaičius Visatoje – 108.

Pastebėta, kad piramidėse keičiasi medžiagų fizikinės ir cheminės savybės. Pavyzdžiui, įvyksta akumuliatorių ir kondensatorių savaiminis įkrovimas, aukštesnėse temperatūrose atsiranda superlaidumas. Vanduo švarėja, jis negenda, tampa sterilus ir neužšąla net minus  $10\text{--}20^\circ \text{C}$  temperatūroje. Tačiau, sutrenkus indą, jame esantis vanduo staiga kristalizuojasi į ledą. Matyt, tai paaiškinama piramidės energetikos įtaka vandens gardelėms – trūksta kristalizacijos centrų.

Įdomus ir teigiamas piramidžių poveikis žmogui: padidėja vartojamų vaistų efektyvumas, sumažėja bakterijų bei virusų įtaka organizmui. Kaip teigia Kanados mokslininkai, šie mistiški statiniai neblogai gydo pjautines žaizdas, nudegimus, malšina skausmus. Kirliano aparatu padaryta fotografija patvirtina, kad jau po penkiolikos piramidėje praleistų minučių žmogaus biolaukas tampa geresnis. Tai aiškinama alfa ir teta bangų smegenyse suaktyvėjimo fenomenu, kuris įmanomas piramidės viduje. Nustatyta, kad kuo aukštesnė piramidė, tuo didesnis jos poveikis.

Akmeninė konstrukcija – viena iš seniausių konstrukcijų rūšių. I m. e. tūkst. dabartinės Estijos ir šiaurės Latvijos teritorijoje buvo statomi šeimyniniai kapai iš stačiakampių akmens luitų ir klojami aptvarai iš didelių akmenų. Akmuo naudotas pamatų, gynybinių

įrenginių statyboje, kadangi jis turi du didžiulius privalumus: ilgaamžiškumą ir atsparumą ugniai. Vėliau akmuo kartu su rišamąja medžiaga – moliu pradėtas naudoti pamatams, sienoms mūryti. Akmenų mūrinio stipris didesnis nei plytų ar betono mūrinio – priklausomai nuo skiedinio kokybės jis lygus 3–4,5 MPa (30–45 kg/cm<sup>2</sup>).

Seniausi iš lauko akmens sumūryti pastatai Lietuvoje siekia XIII a. Pakruojo, Joniškio r. buvo naudojamas dolomitas: iš jo buvo degamos dolomitinės kalkės, daromos tvoros. XVI–XIX a. iš dolomito buvo mūrijamos bažnyčios, malūnų, dvarų, ūkinių pastatų sienos, kolonos.

Akmens šiluminė talpa  $Q=0,84 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$  gana didelė (bet penkis kartus mažesnė negu vandens). Todėl akmuo yra gera medžiaga šilumai akumuliuoti (kaupiti), jis nuo seno naudojamas pirtyse (šilumai išlaikyti) ir būstui šildyti saulės energija: dieną akmenis įkaitina saulės spinduliai, o naktį (kai šalta) jie atiduoda šilumą, šildydami orą ar vandenį.

## 1.2. Molis

*Molis – tai nuosėdinė uoliena*, sudaryta daugiausia iš molio mineralų: kaolinito, hidrožėručio, kitų aliumosilikatų, kvarco, karbonatų ir kt. Kaolinitas – tai aliumosilikatų grupės mineralas  $\text{Al}(\text{Si}_4\text{O}_{10}) \cdot (\text{OH})_8$ , kurio yra nuosėdinėje uolienoje kaoline. Jis pasižymi labai aukšta lydymosi temperatūra (~2 050 °C). Dauguma aliumosilikatų, tokių kaip lauko špatas (feldšpatai), žėrutis, vykstant žemės dūlėjimui, tampa moliu. Dėl molekulių sąveikos ir dalelių sukibimo molis yra gabalinės struktūros: apie 30 % jo dalelių skersmuo mažesnis nei 0,005 mm, likusių – tarp 0,005 ir 0,01 mm. Pagal cheminę sudėtį jame daugiausia yra: silicio dioksido –  $\text{SiO}_2$  (30–70 %), aliuminio oksido –  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (10–40 %), vandens –  $\text{H}_2\text{O}$  (5–10 %). Sudrėkintas molis sudaro plastinę tešlos pavidalo medžiagą – minklą, iš kurios galima formuoti norimus gaminius. Išdžiūvęs

išlaiko jam suteiktą formą, o išdegintas sukietėja, sutvirtėja ir gali įgyti akmens stiprumo.

Pagal atsparumą kaitrai molis skirstomas į *ugniai atsparų* (nelydujų)  $>1580\text{ }^{\circ}\text{C}$ , *sunkialydį*  $1\ 350\text{--}1\ 580\text{ }^{\circ}\text{C}$  ir *lengvalydį* (lydujų)  $<1\ 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Atsižvelgiant į molio paskirtį, nustatomos jo savybės. Pavyzdžiui, keraminiam moliui nustatomas atsparumas kaitrai, gaminių nuodžiūvis, suslūgimas juos išdeginant. Formavimo moliui svarbu nustatyti jo nelaidumą dujoms, rišamojo smėlio kiekį. Balinimui skirtas molis turi pasižymėti geromis adsorbacinėmis savybėmis. Pagal spalvą molis skirstomas į raudonmolį ir baltmolį. Moliniuose ašočiuose skystis būna šaltesnis, nes jis garuoja pro ašočio sienelės (jose yra mikrokanalų dėl molio gabalinės struktūros). Tuo vykusiai pasinaudoja šiltųjų kraštų gyventojai – jie laiko vyną būtent paprastuose neglazūruotuose moliniuose ašočiuose.

Molis, kuris turi daug žmogui reikalingų mineralų, naudojamas medicinoje: sveikatai yra naudingos gydomosios molio vonios (kaip ir purvo), be to, molis vartojamas ir kaip maisto papildas.

### 1.2.1. Molio naudojimas statyboje

Molis nuo seno naudojamas plytomis, čerpėmis, kokliams gaminti, puodžių dirbiniais. Sauso klimato kraštuose (ypač kur nėra medienos) iš molio su priedais (šiaudais, žabais, spaliais, nendrėmis) statomi namai. Molis naudojamas kaip rišamasis skiedinys, pavyzdžiui, įrengiant koklines ar plytines krosnis. Mūrinio iš plytų stiprumas priklauso nuo skiedinio kokybės lygus  $1,5\text{--}3,5\text{ MPa}$  ( $15\text{--}35\text{ kg/cm}^2$ ). Iš molio gaminamos *ugniai atsparios medžiagos*, *fajansas*, *porcelianas*. Be to, molis naudojamas kaip *adsorbentas* įvairiems skysčiams valyti, filtruoti, vynui nuskaidrinti.

### 1.2.2. Fajansas

Pavadinimas kilęs nuo Italijos miesto *Faenza*, kuriame XVII a. buvo išstobulinta fajansinių dirbinių gamyba, pavadinimo. Tai smulkiai akyta, paprastai balta keramika, padengta skaidria, bespalve glazūra.

Fajansinių dirbinių būta jau senovės Egipte. Nuo IV a. jie paplito Kinijoje, nuo XI a. – Korėjoje, Persijoje, o nuo XVI a. – Prancūzijoje, Olandijoje ir Japonijoje, vėliau – Rusijoje. Netoli Maskvos yra žymusis Kuznecovo fabrikas (dabar – Konakovo), gaminantis aukščiausios kokybės indus iš fajanso ir porceliano. Lietuvoje XVIII–XIX a. buvo paplitę M. Radvilos įsteigto Neborovo (dabartinėje Baltarusijos teritorijoje) fabriko puošnūs gaminiai. Buvo žinomas P. Puzino majolikos ir terakotos fabrikas Grūžiuose (Pasvalio r.), veikė M. Navicko ir J. Simanausko dirbtuvės Vilniuje, „Jiesios“ gamykla Kaune (XX a.).

Fajansas yra trijų rūšių: *molinis* (75–80 % baltmolio + 15–25 % kvarcinio smėlio), *kalkinis* (35–55 % baltmolio + 30–40 % kvarcinio smėlio + 5–20 % kreidos arba dolomito) ir *kietasis lauko špato* (feldšpatinis). Labiausiai paplitęs ir geriausiomis savybėmis pasižymi lauko špato fajansas, kuris susideda iš 45–65 % kaitrai atsparaus baltmolio, 25–40 % kvarcinio smėlio ir 4–10 % lauko špato. Visa žaliava sumalama specialiaje malūne, gipsinėse formose ar rankomis sukant žiedžiamąjį ratą formuojami pusgaminiai – žiediniai. Jie išdžiovinami ir išdegami 1 250–1 280 °C temperatūroje, tuomet padengiami boro ir švino glazūra (ji lengvai lydosi) ir vėl degami 1 050–1 150 °C temperatūroje, kad išsilydytų glazūra. Toliau dekoruojami dažais (piešiniais, ornamentais) ir degami trečią kartą 600–900 °C temperatūroje. Originalią dažymo technologiją taiko Bulgarijos meistrai. Dažai laikomi specialiose guminėse kriaušėse su antgaliais. Kriaušę paspaudus, pro antgalį trykšta skysti, takūs dažai. Visokių spalvų dažai išspaudžiami ant tam tikrų žiedinio vietų. Tuomet gaminys sukamas ar vartomas, o dažai, svorio jėgos

veikiami, laisvai teka ir susilieja, todėl gaunami nepakartojami spalvų deriniai bei ornamentai.

Neglazūruotas fajansas įgeria apie 10 % vandens, praleidžia skysčius, dujas, todėl iš jo daromi bakteriologiniai filtrai. Glazūruotas fajansas pasižymi geresnėmis techninėmis savybėmis, yra nelaidus vandeniui, todėl iš jo gaminami indai, santchnikos gaminiai, apdailos plytelės.

### 1.2.3. Porcelianas

Tai balta, labai sukepusi dažniausiai *glazūruota keramika*. Kinų porceliano dirbiniai (poliruotos amforos, reljefiniai ašočiai, vazos) buvo sukurti VI–VII a., o į Europą eksportuojami jau VIII a. Europoje garsėja vokiškasis Meiseno porcelianas (1710 m.), jam nenusileidžia prancūziškasis.

Porcelianas yra kietesnis, skaidresnis (plonasluoksnis), skambesnis už fajansą, jo sudėtyje būtinai yra *kaolino*. Kaolinas taip pavadintas todėl, kad pirmasis jo telkinys atrastas ir pradėtas eksploatuoti Kinijoje Kaolingo kalnuose. Tai nuosėdinė uoliena iš kaolinito  $\text{Al}(\text{Si}_4\text{O}_{10}) \cdot (\text{OH})_8$  ir kvarco bei lauko špato, žėručio, piritu ir kitų priemaišų. Jis naudojamas ugniai atsparioms medžiagoms gaminti, popieriaus, gumos, keramikos pramonėje. Kaolinas paprastai yra baltas, bet (tai priklauso nuo priemaišų) būna ir pilkas, gelsvas, rusvas, žalsvas.

Porcelianas skirstomas į kietąjį ir minkštąjį. *Kietąjį porcelianą* sudaro 50 % kaolino, 25 % kvarco ir 25 % lauko špato. Dirbiniai formuojami plastiškuoju ar liejimo būdu, degami prieš glazūravimą 1 000 °C ir po – 1 350–1 450 °C temperatūroje. Porcelianas pasižymi geromis izoliacinėmis savybėmis, atsparus ugniai, rūgštims, nelaidus vandeniui. Todėl iš jo gaminami elektros izoliatoriai, vamzdžiai, laboratoriniai reikmenys (tigliai, lėkštelės, grūstuvai), dantų protezai.

*Minkštajame porceliane* yra daugiau lauko špato, o kaolinas iš dalies pakeičiamas ugniai atspariu moliu. Dažniausiai jis naudojamas

buitiniams indams, vazoms, skulptūrėlėms, įvairioms architektūrinėms detalėms gaminti.

Gaminant aukštos kokybės servizus, kitus meno kūrinius į porcelianą dedama kaulamilčių (pvz., jų yra Kauno „Jiesios“ fabriko gaminiuose).

### 1.3. Kaulas

Tai žmogaus ir stuburinių gyvūnų rišamasis (kaulinis) audinys, sudarytas iš tankios kaulinės medžiagos ir kaulų čiulpų (smegenų), užpildančių kaulų ertmes ir jų akytąsias medžiagos ertmeles. Tai yra ląstelių ir tarpląstelinės medžiagos iš kalcio druskų ir baltymų (kolageno), todėl kaulai yra kieti ir kartu elastingi (jie labai tiko iečių antgaliams). Pati kaulinė medžiaga nevienalytė: kaulo paviršius sudarytas iš tankiosios medžiagos, o viduje yra akytoji medžiaga, kurios tarpelius užpildo čiulpai.

Senovėje darbo įrankiai, ginklai, papuošalai buvo daromi iš žvėrių ragų ir ilčių. Akmens amžiuje buvo gaminami raginiai kirviai, iečių antgaliai, žeberklai su užbarždėmis ir titnago danteliais, durklai, meškerių kabliukai, papuošalai (Lietuvoje jų randama I tūkst. pr. Kr. piliakalniuose).

Kauluose yra: 45–50 % kaulinių miltų, 14–16 % želatinos bei klijų ir 4–11 % riebalų. Todėl iš gyvūnų kaulų gaminami *kaulamilčiai* (priedas porcelianui) ir *riebalai* (naudojami maisto pramonėje), kuriuos skaidant gaunamas aukščiausios rūšies *tepalas* (tiksliems mechanizmams sutepti).

Maskvos Baumano technikos universiteto mokslininkai, tyrinėdami ultragarsinį kaulų suvirinimą ir pjovimą, nustatė, kad kaului (kaip ir plienui) būdingi *liekamieji įtempiai ir deformacijos* ir tai buvo užregistruota kaip atradimas.

#### 1.4. Mediena

Mediena yra viena iš seniausių ir plačiai naudojamų konstrukcinių medžiagų. Kaip žinoma, medžiai yra dviejų rūšių – spygliuočiai ir lapuočiai: vieni turi spyglius, kiti lapus, be to, skiriasi jų vaisiaus forma. Dauguma spygliuočių žaliuoja ištisus metus (Lietuvoje išimtis – maumedis, kuris žiemoja be spyglių). Lapuočiai Žemėje atsirado prieš 100 mln. metų, o spygliuočių amžius siekia 200–300 mln. metų.

Pagrindiniai medienos *privalumai*: lengva, ganėtinai *stipri*, *atspari smūgiams ir vibracijai*, *nesunkiai apdirbama*, *pigesnė* už kitas konstrukcines medžiagas. Medienos trūkumai: sugeria daug vandens (dėl to kinta jos matmenys ir savybės), yra degi, veikiamą biologinių ir fizinių veiksnių ilgainiui suyra (pūva). Pagrindinė medienos irimo priežastis – grybiniai pažeidimai, vabzdžių ir vabalų išgraužos, o fiziniai veiksniai, tokie kaip aplinkos temperatūra ir drėgnumas, intensyvina biologinių veiksnių poveikį.

Cheminė sausos medienos sudėtis: ~50 % anglies, ~43 % deguonies, ~6 % vandenilio, ~1 % azoto ir mineralinių medžiagų. Biologiniu požiūriu ~98 % sausos medienos sudaro ląstelių sienelės, kurios susideda iš ~50 % *celiuliozės*, ~30 % *lignino*, ~20 %, *heksozanų*, *sakų* ir *vandens*. Heksozanai naudojami *mielių ir spirito* gamyboje.

Medienos savybė išsilaikyti tam tikrą laiką nesupūvant ir nesuyrant vadinama *patvarumu*. Patvarumas priklauso nuo medienos eksploatavimo sąlygų ir nuo medžio rūšies. Sausose, gerai vėdinamose patalpose labai ilgai išsilaiko bet kokios rūšies mediena, nes nėra sąlygų grybeliams veistis.

Kitos medienos savybės, tokios kaip stiprumas (stipris), tankis, taip pat skiriasi priklausomai nuo medžio rūšies (žr. lentelę).

Kaip matome, geriausios stiprumo charakteristikos būdingos *klevui*, *uosiu*, tačiau ši mediena blogai laikosi lauke. Geromis savybėmis pasižymi *ąžuolas*, *maumedis*, tačiau jų mediena yra gana brangi. Todėl statybinėms konstrukcijoms (karkasui, gegnėms,

langams) plačiausiai naudojama pušis, eglė, nes didelis jų sakingumas lemia ilgą jų eksploatavimo laiką lauko sąlygomis. Uosio, maumedžio, ąžuolo mediena yra labai stipri, todėl puikiai tinka grindims, laiptams, baldams.

#### Medienos savybės

Medžio rūšis	Tankis, g/cm <sup>3</sup>	Patvarumas, metais		Stipris, MPa	
		sausoje patalpoje	lauke	išilgai pluošto	lenkiamasis
Klevas	0,71	1000	10	52	108
Maumedis	0,67	1800	90	54	99
Uosis	0,70	500	20	51	106
Ąžuolas	0,70	1800	120	54	94
Beržas	0,67	500	5	50	93
Pušis	0,50	1000	80	45	79
Eglė	0,46	900	50	43	76
Alksnis	0,52	400	5	37	72
Drebulė	0,50	500	3	41	69
Liepa	0,47	-	-	34	62

Blogiausios savybės būdingos liepai, drebuliui. Jų nestipri mediena naudojama įvairiems drožiniams, nors liaudies meistrų gaminami šaukštai, lopetėlės iš vyšnios yra patvaresnės. Turbūt ne veltui rusiškai žodis *liepa* (*luna*) reiškia ir klastotę. Alksnis, beržas gerai tinka pirčių vidaus įrangai ir apdailai (*alksnio patvarumas nuolatinėje drėgmėje – 800 metų !*). Lapuočiuose yra nedaug sūkų, jiems degant dūmuose būna mažiau aitriųjų medžiagų ir jie labiau tinka maistui gaminti, rūkyti.

Įdomu tai, kad *medienos stipris yra gerokai didesnis nei akmens* (3,0–4,5 MPa) *ar plytų* (1,5–3,5 MPa) *mūrinio* dėl medienos pluošto vientisumo. Ne veltui vokiečių ir austrų senieji mūriniai

pastatai yra sustiprinti mediniais rąstais, daug privalumų turi šiuolaikiniai karkasiniai statiniai, kuriems naudojamas medis.

Yra žinoma nemaža gerai išsilaikiusių medinės architektūros paminklų, turinčių 300–700 metų, pavyzdžiui, XVIII a. pradžios bažnytkaimių statiniai Kižuose (Karelija), medinis tiltas Liucernoje (Šveicarija), pastatytas 1333 m. Mediena gerai gali išsilaikyti ir būdama žemėje. Kerčėje (Rusija) buvo atkasti mediniai graikų sarkofagai, turintys beveik 2 500 metų (dabar laikomi Sankt Peterburgo Ermitaže). Novgorode archeologinių kasinėjimų metu surastos pušinės lentos, X a. naudotos gatvėms grįsti, mechaninėmis savybėmis beveik nesiskyrė nuo šių laikų medienos. Tyrimai parodė, kad medienos suirimo laipsnis (nesant grybelių ir vikšrų) priklauso nuo jos rūšies: patvariausias yra kadagys, toliau eina pušis, ąžuolas, juodalksnis, uosis, klevas, beržas. Kintanti aplinkos temperatūra ir drėgmė mažina medienos patvarumą, nes joje atsiranda plyšių, pažeidžiamas medienos vientisumas, ji greičiau užsikrečia grybelių sporomis, vyksta greitesnis grybo vystymasis. Pats efektyviausias medienos apsaugos nuo puvimo ir vabzdžių būdas yra jos įmirkymas specialiais grybeliams ir vabzdžiams nuodingais preparatais – *antiseptikais*, nuo kurių ji tampa dar ir nedegi.

Iš medienos gaminamos įvairios medinės konstrukcijos, baldai, sporto inventoriai, muzikos instrumentai. Ji naudojama laivų statyboje, mašinų gamyboje, kalnakasyboje (atramos, perdangos), kuriai, yra popieriaus ir chemijos pramonės žaliava. Kadangi spygliuočiuose, ypač pušyje, yra daug dervų, atliekamas sakimas, t. y. sākų nuleidimas ir jų surinkimas. Sakai naudojami kanifolijai ir terpentiniui (skiedikliui) gaminti, farmakologijos pramonėje (kremams, vaistams). Pavyzdžiui, *kėnių aliejus* yra gera dezinfekavimo priemonė ir puikus vaistas nuo daugelio ligų.

Mediena yra pluoštinės struktūros ir pasižymi anizotropinėmis savybėmis. Todėl, norint sumažinti deformacijas dėl kintančių aplinkos sąlygų, ji klijuojama kombinuojant skersinius ir išilginius sluoksnius. Iš klijuotos sluoksniuotosios medienos gaminami langai,

palangės, laiptai, grindys, baldai, o paskutiniu metu – ir statybinės konstrukcijos.

## **2. KLASIKINĖS IR NAUJOS MEDŽIAGOS, JŲ GAMYBA BEI NAUDOJIMAS**

Šiuolaikinių technologijų neįmanoma taikyti neišsiaiškinus seniai naudojamų ir naujų inžinerinių medžiagų savybių, kurios reglamentuojamos atitinkamais standartais.

Pagrindines inžinerines medžiagas galima suskirstyti į penkias grupes: 1) *metalai* ir jų lydiniai; 2) *plastikai* (polimerinės medžiagos); 3) *silikatinės* medžiagos (keramika ir stiklas); 4) *kompozitai* (armuoti, sluoksniuoti); 5) *organinės* medžiagos (mediena, natūrali guma).

Inžinerinių medžiagų panaudojimą lemia jų savybių visuma: mechaninis stiprumas, kietumas, atsparumas (apkrovoms, agresyviajai aplinkai, temperatūrų poveikiui), šiluminis plėtimasis ar susitraukimas ir kt. Technologijų pažanga visada susijusi su naujų medžiagų kūrimu, jų gamyba, panaudojimu. Tam būtina įvertinti inžinerinių medžiagų savybes nepamirštant jų kainos, apdirbimo savikainos ir eksploatavimo laiko.

### **2.1. Medžiagų savybės**

Racionalų inžinerinių medžiagų panaudojimą bei reikiamą ilgaamžiškumą lemia visas kompleksas jų savybių:

- *bendrosios*: tankis, drėgnumas, struktūra, pralaidumas vandeniui, dujoms;

- *mechaninės*: stiprumas (stipris), kietumas, plastiškumas, trapumas, tamprumas, smūginis tūsumas, atsparumas dilimui, nuovargiui;

- *fizikinės*: tankis, lydymosi (garavimo, kristalizacijos) temperatūra, šiluminė talpa, šiluminis ir elektrinis laidumas, magnetiškumas, pjezoelektriškumas;

- *cheminės*: atsparumas korozijai, mineralinė bei cheminė sudėtis, reagavimas (egzoterminis, endoterminis).

### 2.1.1. Pagrindinės mechaninės savybės

Medžiagos gaminiui parenkamos, atsižvelgiant į jų savybes. Dažniausiai tai mechaninės medžiagų savybės, o kitos yra svarbios specifinėmis darbo sąlygomis.

Svarbiausios *mechaninės* medžiagų charakteristikos susijusios su *deformacija* – gaminio matmenų ir formos kitimu veikiant išorinėms arba vidinėms jėgoms:

*stiprumas* – medžiagos geba priešintis deformacijai ar suardymui veikiant statinei arba dinaminei apkrovai (išorinėms jėgoms). Tempiamasis stipris: paprasto plieno ~300 MPa, ketaus ~200 MPa, pušies ~90 MPa, stiklo ~60 MPa; polietileno ~30 MPa, granito ~3 MPa);

*kietumas* – medžiagos geba priešintis kito kūno (daug už jį kietesnio) skverbimuisi į ją (gipso ~36 kgf/mm<sup>2</sup>=36 HB=360 MPa, medžio ~50 HB, paprasto plieno ~200 HB, kvarco ~1 100 HB, korundo ~2 000 HB, deimanto ~10 000 HB);

*plastiškumas* – geba deformuotis nesuyrant esant apkrovai ir išsaugoti negrįžtamai pakitusią formą apkrovą pašalinus;

*tamprumas (elastingumas)* – geba atgauti pradinį matmenį ir formą pašalinus apkrovą;

*smūginis tūsumas* – geba atlaikyti dinamines (smūgines) apkrovas;

*atsparumas dilimui* (mechaninis, korozinis) – trinties jėgų, cheminių reakcijų veikiamos medžiagos geba priešintis paviršiaus ardymui;

*atsparumas nuovargiui* – gaminio mechaninių savybių išsilaikymas, jo geba nesuirti jam deformuojantis iki leistinos ribos.

## 2.2. Metalai ir jų lydiniai

Tai cheminiai elementai ir jų lydiniai, kuriems būdingos metališkosios savybės: elektrinis ir šiluminis laidumas, kristalinė sandara, kalumas, didėjanti elektrinė varža kylant temperatūrai.

Pirmasis metalas, kurį žmogus pradėjo apdirbti, buvo auksas, kadangi jis pasižymi puikiomis savybėmis: nesioksiduoja, yra plastiškas, kalus, randamas gamtoje grynuolių pavidalu. Egipte archeologai randa auksinių dirbinių, pagamintų net prieš 8 000 m. Iš aukso galima pagaminti kelių mikronų storio foliją, kuri naudojama auksavimui difuzijos būdu. Senovėje žmonės naudojo sidabro grynuolius, varį, meteoritinę geležį.

Šeštajame tūkstantmetyje pr. Kr. pradėta lydyti metalą, atsirado karštasis kalimas ir liejininkystė. Pirmųjų geležinių dirbinių amžius siekia apie 4 000 m.

Dirbiniai iš žalvario (Artimuosiuose Rytuose, Kinijoje, Pietų Amerikoje) buvo gaminami jau bronzos amžiuje (4 tūkst. pabaiga – 1 tūkst. pr. Kr.). Tais laikais buvo naudojama meteoritinė geležis, iš jos pagamintų papuošalų aptikta senovės egiptiečių kapuose (4 tūkst. pr. Kr.). Jau XII–IX a. pr. Kr. pradėti gaminti geležiniai darbo įrankiai, ginklai (Azijoje, Egipte, Sirijoje, Užkaukazėje, Indijoje), vystoma metalurgija. Tai buvo geležies amžiaus pradžia. Graikų filosofas Aristotelis, gyvenęs 384–322 m. pr. Kr., aprašė geležies išgavimo būdą iš „specialios žemės“ – geležies rūdos.

Idomu tai, kad įvairiose religijose vienintelis darbininkijos atstovas tarp dievų yra kalvis: graikų Hefaistas, romėnų Vulkanas, slavų Svarogas (nuo rusiško žodžio *сварка* – suvirinimas). Hefaistas visada vaizduojamas kaip galiūnas su kūju ir replėmis, kuris, skirtingai nuo kitų nuolat puotaujančių dievų, dirbuojasi savo kalvėje.

Senovėje, pavyzdžiui, Kijevo Rusioje, kalvio amatas buvo labai gerbiamas. Kalvis kartu buvo ir žiniuonis, ir būrėjas, galintis iš anksto nulemti ateitį, „nukalti laimę“ (pasaga yra laimės talismanas). Baiminga pagarba kalviui atsispindėjo ir kalboje. Pavyzdžiui, rusų

kalboje žodis *коварный* „klastingas“ giminingas žodžiui *ковать* „kalti“, o žodžiai *казнь*, *казна*, *козни* „mirties bausmė, išdas, intrigos“ kilo nuo žodžio *кузнец* „kalvis“.

Tarp pavardžių, turinčių profesinę prigimtį, „kalviškosios“ pagal gausumą užima pirmąją vietą: *Kuznecov* – Rusijoje, *Koval* – Ukrainoje, *Smith* – Amerikoje, *Schmied* – Europoje.

Metalai ir jų lydiniai skirstomi į juoduosius ir spalvotuosius. *Juodieji metalai* – tai geležis (tankis  $7,87 \text{ g/cm}^3$ , t. y. ji 7,87 karto sunkesnė už vandenį) ir jos lydiniai: plienas, ketus (tankis  $\sim 7,8 \text{ g/cm}^3$ ) bei ferolydiniai (95 % visų gaminamų metalų). *Spalvotieji metalai* – tai visi kiti metalai ir jų lydiniai. Jie skirstomi į lengvuosius, kurių tankis iki  $4 \text{ g/cm}^3$  (aliuminis, magnis, berilis), sunkiuosius (švinas, varis, nikelis), tauriuosius (auksas, sidabras, platina) ir retuosius sunkialydzius metalus (molibdenas, volframas, vanadis, tantalas). Spalvotieji metalai yra daug brangesni už juoduosius. Pavyzdžiui, palyginti su paprastu plienu (kurio 1 kg kainą  $\sim 1 \text{ Lt}$ ), aliuminis ir magnis brangesni  $\sim 10$  kartų, varis  $\sim 12$  kartų, titanas  $\sim 30$  kartų, nikelis  $\sim 60$  kartų, molibdenas, volframas  $\sim 230$  kartų, vanadis  $\sim 300$  kartų, sidabras  $\sim 1\,000$  kartų, berilis  $\sim 2\,300$  kartų, tantalas  $\sim 5\,300$  kartų, auksas  $\sim 36\,000$  kartų, platina  $\sim 50\,000$  kartų. Todėl, remiantis naujomis technologijomis, spalvotuosius metalus stengiamasi pakeisti juodaisiais metalais, plastikais (polimerinėmis medžiagomis) ar kompozitais (keraminėmis medžiagomis).

*Geležis* – tai plastiškas, minkštas metalas, kurio tankis  $7,87 \text{ g/cm}^3$ . Geležies gana aukšta lydymosi temperatūra ( $1\,539^\circ \text{C}$ ), ji magnetiška iki  $769^\circ \text{C}$ . Jeigu geležyje priemaišų labai nedaug – iki 0,04 % (daugiausia anglies), tai ji išlaiko savo gamtines fizines savybes. Gamtoje geležies grynuolių nėra, nes ji būtinai oksiduojasi dėl ore esančio deguonies ( $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).

Daugiau nei prieš pusantro tūkstančio metų Indijoje buvo pagaminta 6,5 t (kitais duomenimis – 6 t) sverianti geležinė kolona, ant kurios nėra jokių rūdžių žymių, nors tiek amžių ji stovi po atviru dangumi drėgmėje, esant dideliems temperatūrų svyravimams.

Kolonos aukštis 7,3 (7,2) m, pagrindo skersmuo 41,6 (41,7) cm, viršaus skersmuo 29,5 (30,5) cm. Skaičiavimai rodo, kad šios kolonos tankis yra 8,88 (8,08) g/cm<sup>3</sup> (didesnis nei grynosios geležies!), o atlikus ekspertizę nustatyta, kad jos grynumas yra 99,72 %. Kolona išlaiko grynosios geležies savybes, jos neveikia korozija ir todėl ji yra tokia ilgaamžė. Nuo senų laikų prie kolonos plūdo minios maldininkų (dabar – turistų), kurie tikėjo, kad, kam tam, kuriam pavyks rankomis apglėbti koloną prisiglaudus prie jos nugara, tas bus laimingas visą gyvenimą. Todėl aišku, kodėl metalas kolonos apačioje yra tiesiog nupoliruotas. Iki šiol nežinoma, kaip senovės metalurgams pavyko padidinti geležies tankį ir kokia gamybos technologija buvo taikyta. Yra netgi hipotezių, kad šią koloną atvežė ir pastatė ateiviai iš kitos planetos ir ji naudojama kaip antena ryšiui su jais palaikyti. Galbūt senovės Indijos metalurgai sutrindavo kempėtąją akytą geležį į miltelius, atskirdavo priemaišas, o grynosios geležies frakcijas supresuodavo. Gautas švarios geležies frakcijas įkaitindavo iki raudonumo ir plakdavo kūjais tol, kol jos sukepėdavo į vientisą masę. Pagal šiuolaikinę terminologiją – tai miltelių metalurgijos metodas.

Senovės Indiją garsina jos metalurgų menas, jų dirbiniai stebina mus ir dabar. Pavyzdžiui, daugelyje senovės šventyklų naudotos geležinės sijos (iki 6 m), o, statant Egipto piramides, geležiniai įrankiai akmeniui apdirbti buvo vežami iš Pietų Indijos. Irane Oldšait chano kapą juosia iš indiško plieno pagamintos rankos storio grotos. Tai vientisas plieno dirbinys (sujungimų nėra), kurio gamybos technologija iki šiol neišaiškinta, tačiau yra žinoma, kad meistrai darbavosi daugiau nei septynerius metus.

Grynoji geležis randama tik meteoritų pavidalu. Vieni iš didžiausių – 9 m<sup>3</sup> 60 t Hobos meteoritas Namibijoje ir 1975 m. prie Takimisimos salos (Japonija) į jūrą nukritęs ~100 t meteoritas. *Meteoritinė geležis* (sideritas) pasižymi geromis antikorozinėmis savybėmis, gilioje senovėje ji buvo naudojama papuošalams, darbo įrankiams gaminti. Tačiau grynosios meteoritinės geležies yra labai

mažai, o jos mechaninės savybės – prastos. Todėl naudojami geležies lydiniai su anglimi ir kitais elementais (metalais ir nemetalais).

### 2.2.1. Plienas

Tai deformuojamasis (kalusis) *geležies lydinys*, kuriame, be *anglies* (jos yra iki 2,14 %), yra ir kitų elementų. Anglis gali būti ištirpusi geležyje (feritas, austenitas, martensitas), sudaryti cementitą  $\text{Fe}_3\text{C}$  ar kitus karbidus, būti grafito intarpų pavidalo. Iš priemaišų visada būna mangano (0,3–0,6 %), silicio (0,1–0,4 %), neišvengiama kenksmingųjų fosforo bei sieros priemaišų (po 0,01–0,05 %). Plienas paprastai gaunamas iš ketaus, metalo laužo, marteno krosnyse ar konverteriuose: Besemerio (1856 m.), Tomo (1878 m.), deguoniniuose (nuo 1977 m., tai pigiausias ir labiausiai paplitęs būdas). Geriausias, bet brangiausias plienas gaunamas lankinėje, indukcinėje ar saulės kolektoriaus krosnyse (elektrošlakinio perlydymo būdu), nes jis turi mažiausią fosforo ir sieros kiekį.

*Plieno savybės priklauso nuo jo cheminės sudėties* (nuo anglies kiekio ir legiravimo elementų), *terminio apdorojimo* (grūdinimas, atleidimas), *gaminimo technologijos* (deformacinis sukietinimas, Damasko plieno technologija). Kuo daugiau anglies, tuo plienas kietesnis, stipresnis, atsparesnis dilimui, labiau užsigrūdina, tačiau tuomet jis būna trapesnis, sunkiau apdirbamas, blogiau suvirinamas. Mažaanglis plienas (C iki 0,3 %) yra plastiškas, minkštas, lengvai deformuojamas, tekinamas, gerai virinamas, bet nesigrūdina ir yra neatsparus dilimui. Didelę įtaką plieno savybėms turi jo gaminimo ir apdirbimo technologija. Ne veltui geri peiliai, kardai gaminami taikant plakimą. Pavyzdžiui, naujo dalgio pjaunančiąją briauną būtina gerai išplakti: esant šaltajai plastinei deformacijai, įvyksta metalo deformacinis sukietinimas (rusiškai – *наклён* (nuo žodžio *кленать*) „kniedyti“), todėl išgalšti ašmenys išlieka aštrūs gerokai ilgiau.

## 2.2.2. Plieno rūšys

Plienas skirstomas pagal paskirtį, anglies kiekį jame, cheminę sudėtį, kenksmingųjų priemaišų kiekį, lydinio stingimą:

1) *pagal paskirtį:*

- a) konstrukcinis ( $C < 0,65 \%$ );
- b) įrankinis ( $0,65\text{--}1,7 \%$  C);
- c) specialusis (spyruoklinis, elektrotechninis, statybinis, atsparus korozijai, atsparus kaitrai, magnetinis).

2) *pagal anglies kiekį:*

a) neanglingasis (iki  $0,05 \%$  C) – vadinamas technine geležimi (minkštamagnetė medžiaga);

b) mažaanglis ( $0,08\text{--}0,3 \%$  C) – naudojamas šaltajam deformavimui (vynys, varžtai, kniedės), įanglinamoms detalėms, suvirinamiems gaminiams, konstrukcijoms (virintinė siūlė nesigrūdina, kai  $C < 0,3 \%$ );

c) vidutinio anglingumo ( $0,3\text{--}0,5 \%$  C) – termiškai gerinamas plienas (normalizuojamas, grūdintasis, atleistasis), skirtas mašinų detalėms gaminti (velenams, varikliams, krumpliaračiams);

d) spyruoklinis ( $0,5\text{--}0,7 \%$  C) – po grūdinimo ir atleidimo labai elastingas, bet netrapus;

e) labai anglingas ( $0,7\text{--}1,7 \%$  C, išskirtiniais atvejais – iki  $2,3 \%$  C) – įrankinis plienas, kuris užgrūdintas tampa labai kietas ir stiprus, skirtas pjovimo įrankių gamybai;

3) *pagal cheminę sudėtį:*

a) anglinis – konstrukcinis plienas, kurio žymėjimo skaičiai (pagal GOST – Rusija) rodo anglies kiekį šimtosiomis procento dalimis (markės: 08; 20; 45; ...; 85 atitinka  $0,08\text{--}0,85 \%$  C), ar įrankinis plienas, kurio skaičiai rodo anglies kiekį dešimtosiomis procento dalimis (markės: Y7; Y8; ...; Y13 atitinka  $0,7\text{--}1,3 \%$  C). Atskirą anglinių plienų grupę sudaro automatų plienas, kuriame specialiai padidinamas sieros ( $0,15\text{--}0,25 \%$  S) ir fosforo kiekis tam, kad, dirbant su tekinimo staklėmis, būtų gautos trapios drožlės. Jį žymint skaičius rodo anglies kiekį šimtosiomis procento dalimis

(markės A11, A35 atitinka 0,11–0,35 % C). Tokie plienai mažiau dilina pjovimo įrankius, neapsivelia apie juos, todėl naudojami programuojamose tekinimo staklėse. Iš tokių plienų gaminami varžtai, velenėliai, smeigės, ašys;

b) legiruotasis – su tam tikrų elementų priedais, kurie pagerina norimas plieno savybes: stiprumą, kietumą bei atsparumą: dilimui, nuovargiui, korozijai, kaitrai.

Plienai legiruojami tam tikrais elementais, siekiant gauti norimas metalo savybes. Dažniausiai tam naudojami:

chromas (Cr, X)<sup>\*</sup> – padidina stiprumą, kietumą, atsparumą korozijai, karščiui. Jeigu Cr>13 %, plienas tampa nerūdijantis (pavyzdžiui, indams naudojamas firmų „Baer“, „Cepter“ plienas turi 18 % Cr ir 10 % Ni);

nikelis (Ni, H)<sup>\*</sup> – padidina stiprumą, plastiškumą, atsparumą korozijai, smūginį tūsumą, tačiau jis kelia plieno kainą ir sunkiai pjaunamas (jo drožlė tūsi). Norilsko (Rusija) kalnų metalurgijos kombinate pagaminama apie 50 % viso pasaulio nikelio;

titanas (Ti, T)<sup>\*</sup> – padidina stiprumą, kietumą, garantuoja smulkiagrūdę plieno struktūrą ir tuo pagerina mechanines bei technologines jo savybes;

manganas (Mn, Γ)<sup>\*</sup> – padidina stiprumą, kietumą, tamprumą (1–2 %), daro plieną nemagnetinį (kai Mn>13 %);

silicis (Si, C)<sup>\*</sup> – didina plieno stiprumą ir tamprumą (1–2 % Si), padidina elektrinę varžą (elektrotechninis plienas, 1–5% Si);

---

\* Cheminių elementų simboliai rodo jų buvimą plieno markėse: pirmasis simbolis – pagal Lietuvoje įteisintus Europos Sąjungos standartus LST EN 10027 ir LST 1585 (CR 10260); antrasis – pagal Rusijos plienų standartą GOST (dviženklis skaičius markės pradžioje rodo anglies kiekį šimtosiomis procento dalimis, o skaičiai po legiravimo elementų – jų kiekį procentais. Jei skaičiaus nėra, to elemento yra apie 1 %). Pavyzdžiui, rusiško plieno I2X18H10T sudėtis yra: 0,12 % C, 18 % Cr, 10 % Ni, ~1 % Ti.

volframas (W, B)\* – padidina atsparumą karščiui, stiprumą, kietumą (ypač įrankinių plienų ~1 % W), tačiau tai yra brangus, retas metalas. Jeigu W yra 9–18 %, gaunamas greitapjovis plienas;

molibdenas (Mo, M)\* – labai pagerina įvairių plienų mechanines savybes, padidina atsparumą karščiui, pakeičia W greitapjoviuose plienuose (1 % Mo atitinka 2 % W);

vanadis (V, Φ)\* – garantuoja plienui smulkiagrūdę struktūrą;

siera (S, ...)\*, fosforas (P, Π)\* – tai kenksmingosios sunkiai pašalinamos priemaišos (po 0,01–0,05 %), didinančios plieno trapumą.

Pigiausiai plienų legiravimas yra atliekamas Mn ir Cr. Patys stipriausi (tačiau ir brangiausi) yra plienai, legiruoti Mo, W, V. Jei į plieną pridedama >50 % legiravimo elementų, tai jie vadinami ne plienais, bet lydiniais.

### 2.2.3. Plieno suvirinamumas

Sujungiant plienines detales, konstrukcijas lydomuoju suvirinimo būdu (elektrolankiniu, elektrošlakiniu, dujiniu), gaunama virintinė siūlė su galimais defektais: dendritine struktūra, dujų poromis, nemetaliniais intarpais, neįvirinimu, įvairiais įtrūkiais. Jei taikoma netinkama suvirinimo technologija, gali atsirasti šaltųjų įtrūkių po suvirinimo, gaminio eksploatavimo metu. Jeigu pliene yra daug anglies, perkaitintas prie siūlės esantis pagrindinis metalas tampa stambiagrūdis ir staigiai aušdamas užsigrūdina. Virintinei siūlei auštant susidaro dideli įtempiai ir sujungimo vietoje atsiranda karštųjų įtrūkių, ypač jei plienas nėra pakankamai plastiškas.

Todėl gerai suvirinami plienai, turintys iki 0,3 % anglies. Pavyzdžiui, tai plienai: 05; 08; 10; 15; 20; 25; Cт0 (S185)\*\* , Cт1; Cт2; Cт3 (S235JRG2, S235JRG1)\*\*.

---

\*\* Skliausteliuose nurodyti rusiškų plienų atitikmenys pagal Europos Sąjungos standartą EN 10 025.

Papildomi elementai didina plieno stiprumą ir iğrūdinamumą. Todėl legiruotojo plieno suvirinamumas įvertinamas pagal anglies ekvivalentą  $C_{ekv}$ :

$$C_{ekv} = C + \frac{Mo}{4} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{10} + \frac{V}{14} + \frac{Si}{24},$$

$Mo, Cr, Mn, Ni, V, Si$  – legiravimo elementų kiekis, %.

Jeigu  $C_{ekv} < 0,45$  %, plienas virinasi gerai. Jei  $C_{ekv} > 0,45$  %, detalėms virinti būtina taikyti reikiamą suvirinimo technologiją – terminį apdorojimą (išankstinį pakaitinimą iki 200–300 °C, o po suvirinimo – atkaitinimą) arba naudoti specialiąsias suvirinimo medžiagas (pavyzdžiui, didelio plastiškumo nikelinius elektrodus).

## 2.2.4. Unikalus plienai

### 2.2.4.1. Damasko plienas – bulatas

Plačiai išgarsėjęs bulato plienas žinomas jau 2 300 metų – nuo Aleksandro Makedoniečio žygio į Indiją laikų. Šis plienas buvo gabenamas į Sirijos miestą Damaską, kur maždaug prieš 1 800 m. buvo įkurta pirmoji didelė dirbtuvė, gaminanti šaltuosius ginklus – garsiuosius Damasko plieno kardus ir durklus. Tai buvo geriausias plienas, puikiai išlaikantis aštrumą (dėl didelio kietumo) ir elastingumą. Timūrai užkariavus Siriją (XIV a.), amatininkai ir ginklininkai buvo paimti į nelaisvę, todėl Damasko plieno gamybos technologija buvo neišsaugota. Daugelio šalių mokslininkai bandė atskleisti Damasko plieno paslaptį. Pavyzdžiui, žymusis anglų fizikas Maiklas Faradėjus bandė gauti bulatą į plieną pridėdamas aliuminio ir platinos.

Bulato gamybos technologijos buvo atkurtos tik XIX a. rusų metalurgo Pavlo Anosovo dėka: jo pagaminto (1837 m.) bulatinio

plieno durklo geležtė lengvai lankstydavosi skleisdama tyrą ir aukštą garsą, o jos poliruota briauna trupindavo geriausias angliško plieno kaltus. Damasko plieno paslaptis pasirodė esanti labai paprasta – tai pirminių medžiagų švarumas (jame yra tik geležis ir anglis – ir nieko daugiau), be to, reikia tinkamai taikyti metalo kristalizavimo technologiją. Esmė ta, kad lydinys gausiai prisotinimas švarios anglies (net iki 2 %). Lėtai aušdamas perteklinis cementitas ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) netirpsta, kaip geležyje, bet yra aptraukiamas lėtai stingstančiu minkštu metalu, sudarydamas su juo nepertraukiamą (korektišką) polimerinių grandinėlių tipo jungtį. Pirmasis kriterijus, vertinant bulato plieno kokybę, ir yra ornamentai ant metalo paviršiaus. P. Anosovas nustatė, kad geriausios savybės būdingos geležtėms su nariuotu ar tinkliniu piešiniu. Daug blogesnėmis savybėmis pasižymi bulatai, kurių raštas sudarytas iš tiesių lygiagrečių linijų. Taip buvo atrastas svarbiausias metalotyros dėsnis – metalo savybių priklausomybė nuo jo kristalinės sandaros. Bulato pagrindo ir raštų spalva rodo geležies ir anglies švarumo laipsnį: kuo tamsesnis ir labiau blizgantis paviršius, kuo ryškesni raštai, tuo švaresnis metalas. Todėl *geram plienui pagaminti būtinos didelio švarumo pirminės medžiagos – geležis ir anglis*. Gana švarios geležies rūdos buvo rasta Tagilo telkinyje (Uralas). Ji buvo perlydoma kartu su grafitu specialiuose tigliuose 1 400 °C temperatūroje (žemesnėje nei geležies lydymosi – 1 539 °C). Gautas metalas buvo lėtai kaitinamas iki šviesaus raudonumo. Kalti pradėdavo nesmarkiai, apspaudžiant liejinį iš visų pusių. Kaldavo tol, kol jis tapdavo vyšninės spalvos (850–650 °C). Vėliau gaminius tekindavo, poliruodavo ir išsėdindavo augalų sultimis ar silpnu rūgšties tirpalu – nuo jo išryškėdavo raštas ir pagerėdavo gaminio savybės. Bulatinės geležtės ploniausi ašmenys išlieka aštrūs net ilgai ją naudojant, kadangi toks *plienas vienu metu yra ir kietas, ir tšsus, ir tamprus* (elastingas). Aišku, kad ir paprasto anglinio plieno geležtę galima užgrūdinti iki bulato kietumo, tačiau ji bus trapi ir suirs po pirmojo smūgio.

#### 2.2.4.2. Stenfordo universiteto plienas

Pastaraisiais metais Stenfordo universitete (JAV) buvo atlikti labai anglingų plienų tyrimai. Nepaisant to, kad tokia pliene yra daug anglies (1–2,3 % C !), jis išlieka plastiškas ir 600–800 °C temperatūroje. Tokios plieno savybės gautos plastiškai apdirbant metalą, sudarytą iš labai smulkių ferito ir cementito grūdelių. Plieną įkaitindavo iki austenitinio intervalo ir ilgą laiką laikydavo, kad visiškai ištirtų visas karbidas. Austenitinės-cementitinės struktūros metalas būdavo tolygiai mechaniškai deformuojamas. Tai suplonina austenito grūdelius, skatina naujų gardelių susidarymą, formuojant atsitiktinai paskirstytas dislokacijas. Grūdinant šiek tiek aukštesne nei  $A_1$  (727 °C) temperatūra susidaro toks smulkiagrūdis martensitas, kad jo struktūros neįmanoma pamatyti įprastiniais optiniais metodais. Vadinasi, ultrasmulkių minkštosios (feritinės) ir kietosios fazės (cementito) tolyginis grūdelių pasiskirstymas yra pagrindinė sąlyga, norint gauti didelio stiprumo, tačiau plastišką labai anglingą plieną. Superplonų ferito grūdelių ribose didelės dalies geležies atomų judrumas yra didesnis, o difuzija milijoną kartų didesnė nei pagrinde.

Laikantis šios prielaidos suvirinimas buvo atliekamas valcavimo būdu plienui esant kieto būvio 650 °C temperatūroje. Mokslininkai sukūrė labai anglingo plieno plokštelių suvirinimo su mažangliu plienu technologiją. Dėl didelio grūdelių ribų skaičiaus gerai valosi sujungiami paviršiai (priemaišinių atomų nuotėkis) ir dėl atomų difuzijos per paviršių sandūrą susidaro kietųjų fazių ryšiai. Virinant kieto būvio plieną, gaunamas *kompozitas – dvisluoksnis plienas*, kuris nesisluoksniuoja net lenkiamas 180° kampu. Tai rodo stiprius naujos medžiagos metalurginius ryšius.

Panašiu būdu Stenfordo universitete buvo sukurtas labai gausiai anglingas (C iki 2,3 % !) mikroninės feritinės struktūros plienas su labai mažais cementito ( $Fe_3C$ ) grūdeliais. Tokiam plienui būdingos nepaprastos ir vertingos savybės: 1) jis yra labai plastiškas ir stiprus ( $R_m \sim 1\,500$  MPa) 650–800 °C temperatūroje (paprasto

plieno stiprumo riba  $R_m \sim 400$  MPa); 2) kambario temperatūroje jo stipris  $R_m \sim 1\,000$  MPa, o santykinis ištįsimas (pailgėjimas)  $A=10$  % (plieno 60 charakteristikos: 119 MPa ir 6 %); 3) po grūdinimo  $750^\circ$  C temperatūroje jo kietumas siekia 80 HRC ( $\sim 900$  HB), o didžiausias naudojamų grūdintųjų plienų kietumas siekia  $\sim 600$  HB; 4) *sluoksniuotam kompoziciniam metalui* aukštose temperatūrose būdingi stiprūs metalurginiai ryšiai ir superplastiškumas.

Tokių plienų kūrimo technologija panaši į Damasko plieno ar senovės japonų sluoksniuotų kardų gamybos technologiją. Matyt, teisūs buvo senovės išminčiai, kurie teigė: „Visa, kas yra, jau buvo“.

### 2.3. Ketus

Ketus – tai Fe-C lydinys, kuriame anglies yra 2,14–6,67 %. Paprastai ketuje būna 2–4 % C, visada yra Si, Mn, S, P, o, norint jam suteikti tam tikrų savybių, naudojami legiravimo elementai: Cr, Ni, Si, V, Al, Cu, Mo, Mn, Ce. *Ketus – trapi medžiaga* (dėl didelio C kiekio). Jis gaunamas aukštakrosnėse iš geležies rūdos. Didžioji ketaus dalis (85 %) perdirbama į plieną (*perdirbamasis ketus*), likęs ketus naudojamas fasoninėms detalėms gaminti liejimo būdu (*liejamasis ketus*).

Lietuvoje iš vietinės balų rūdos XVI–XVII a. buvo liejamos ketaus patrankos. Didžiausios patrankų ir sviedinių liejyklos buvo Vilniuje, Valkininkuose, Kaune. Vilniuje, Pavilnio rajone, nuo gražios Pūčkorių atodangos (jos pavadinimas kilęs nuo rusiško žodžio *пушка*, *пушка* „patranka“) atsiveria ne tik puikus Belmonto parko (vadinamo Lietuvos Šveicarija) vaizdas, bet ir matyti patrankų gamyklos liekanos. Didelės reikšmės ketaus liejyklų plėtrai turėjo geležinkeliai, nuo 1862 m. sujungę Vilnių ir Kauną su Peterburgu, Varšuva, Prūsija, leidimas nuo 1861 metų iš užsienio be muitų įvežti metalą ir baudžios panaikinimas. Buvo įsteigtos didelės liejyklos: Kaune Šmito (1862 m.), N. Rekošo gamykla „Minerva“ (1863 m.), „Mars“ (1869 m.), Vilniuje Cimermano (1864 m.), Šiauliuose Zubovo. 1913 m. jau veikė 12 didesnių

liejyklų ir per metus buvo pagaminama ~12 000 t liejinių. Po Antrojo pasaulinio karo buvo atstatytos ir įrengtos naujos liejyklos: „Žalgirio“ staklių gamykloje, Kuro aparatūros gamykloje (Vilniuje), „Baltijos“ laivų statykloje (Klaipėdoje), „Kaitros“ gamykloje (Lentvaryje) ir „Centrolitas“ (Kaune – 1962 m.). 1976 m. Lietuvoje veikė 44 liejyklos, liejimo cechai ir barai, gaminantys staklių, laivų statybos, elektrotechnikos ir maisto pramonės gaminius, traktorių, automobilių atsargines dalis, buitinius reikmenis, meno dirbinius.

Pagal mikrostruktūrą ketus būna *baltasis*, *kalusis*, *pilkasis*, pagal cheminę sudėtį – paprastas (nelegiruotas) ir *legiruotasis*.

*Baltajame ketuje* (cementitiniame) beveik visa anglis yra susijungusi į cementitą  $\text{Fe}_3\text{C}$ , jo lūžis yra baltos spalvos.

Baltasis ketus susidaro greitai aušinant Fe-C lydinius arba kai juose yra nedidelis kiekis silicio, kuris skatina cheminį anglies susijungimą su geležimi ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Dėl cementito jis yra kietas ir trapus, pasižymi geromis liejimo savybėmis, yra atsparus dilimui, tačiau labai sunkiai apdirbamas pjovimu. Todėl baltasis ketus mašinų gamyboje naudojamas retai. Iš jo liejamos dykančios detalės, o dažniausiai jis perdirbamas į plieną ir kalųjį ketų.

*Kalusis ketus* – tai atkaitintas baltasis ketus (jis įkaitinamas iki ~900 °C, išlaikomas ir lėtai aušinamas). Dėl dribsnių formos grafito kalusis ketus yra plastiškesnis, stiprus ir tšsus, tačiau yra *nekalamas* (nes suirtų). Jis yra *brangesnis* už kitos rūšies ketų ir naudojamas labai svarbioms, sudėtingos konfigūracijos detalėms lieti. Iš šio ketaus liejami sudėtingo profilio plonasieniai gaminiai, kurie yra veikiami dinaminių apkrovų, t. y. automobilių (pvz., diferencialo korpusas), traktorių, staklių detalės. Pagal rusišką standartą GOST 1215 kalusis ketus žymimas КЧ30-6...КЧ80-1,5 (КЧ – ковкий чугун). Pirmasis skaičius rodo stiprį  $R_m$ , išreikštą  $\text{kgf/mm}^2$ , antrasis – santykinį ištįsimą  $A$ , %. Pavyzdžiui, ketaus КЧ30-6 stipris 30  $\text{kgf/mm}^2$  (300 MPa), o santykinis ištįsimas – 6 % (Lietuvoje ketus žymimas pagal ES standartą – LST EN 1560:2002).

*Pilkajame ketuje* beveik visa anglis ( $C=2,8\text{--}3,8$  %) yra plokštelinio laisvojo grafito pavidalo, jo metalinį pagrindą sudaro

ferito-perlito mišinys, o lūžis yra pilkos matinės spalvos. Pilkasis ketus gaunamas lėtai aušinant Fe-C lydinius, kuriuose yra didesnis silicio kiekis (1,2–3 %). Grafitas susidaro aukštos temperatūros skilant cementitui:  $\text{Fe}_3\text{C} = 3\text{Fe} + \text{C}$ . Jis gerai apdirbamas pjovimu, pasižymi geromis antifrikinėmis savybėmis, yra atsparus dilimui, gniuždymui, slopina vibracijas, turi geras *liejamąsias* savybes: lydidas takus (jo žemesnė liejimo temperatūra), mažai susitraukia atvėsus. Pilkasis ketus *pigus*, tačiau jis yra neatsparus tempimui ir gana trapus. Iš jo liejami radiatoriai, vamzdžiai, krosnys, židinių kapsulės, staklių stovai, mašinų rėmai, krumpliaračiai. Pilkasis ketus žymimas raidėmis, reiškiančiomis jo rūšį, ir skaičiais, paprastai rodančiais stiprumo ribą  $R_m$  (stiprį),  $\text{kgf/mm}^2$  (pagal Rusijos standartą GOST 1412), arba MPa (pagal Lietuvoje įteisintą Europos Sąjungos standartą LST EN 1560:2002 (EN 1561)). Pavyzdžiui, rusiško ketaus ЧЧ20 (*серый чугуn*) stipris  $R_m=20 \text{ kgf/mm}^2$ , jis atitinka Europos Sąjungos ketų EN-GJL-200 ( $R_m=200 \text{ MPa}$ ).

*Modifikuotasis pilkasis ketus* gaunamas naudojant modifikatorius – dažniausiai ferosilicį su aliuminiu arba kalciu, kurie ketuje sudaro atitinkamus oksidus:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ . Jame yra 2–3 % Si, todėl jis mažiau trapus, atsparesnis pleišėjimui.

*Stiprusis ketus* gaunamas modifikuojant ketų Mg, Ca, Ce (ceriu). Jis yra su rutulinės (sferoidinės) formos grafitu, labai stiprus, tačiau plastiškesnis už pilkąjį su padidintu smūginiu tūsumu. Žymimas raidėmis, reiškiančiomis jo rūšį, ir skaičiais, rodančiais stiprumo ribą  $R_m$  (stiprį),  $\text{kgf/mm}^2$  (pagal Rusijos standartą GOST 7293), arba MPa (pagal Europos Sąjungos standartą EN 1563). Pavyzdžiui, rusiško ketaus ВЧ80 (ВЧ – *высокопрочный чугуn*) stipris  $R_m=80 \text{ kgf/mm}^2$ , jis atitinka Europos Sąjungos ketų EN-GJS-800-2 ( $R_m=800 \text{ MPa}$ , santykinis ištįsimas  $A=2 \%$ ). Stipriojo ketaus mechaninės savybės ypač priklauso nuo terminio apdorojimo (grūdinimo ir atleidimo), jis pakeičia plieno liejinius bei valcuotuosius gaminius. Iš šio ketaus gaminamos *detalės*, *veikiamos visų įmanomų apkrovų*: statinių, dinaminių, ciklinių, tempimo-gniuždymo, lenkimo, sukimo (krumpliaračiai, alkūniniai velenai,

movos, automobilių karteriai, užpakaliniai tiltai, stūmoklių žiedai, presų stovai ir kt.).

*Legiruotasis ketus* yra su Cr, Ni, V, Al, Cu, Mo ir kitų elementų priedais. Todėl jis yra specialiosios paskirties ir reikiamų savybių: nerūdijantis, *antifrikcinis*, *atsparus dilimui*, *korozijai*, *karščiui*, skirtas *meno dirbiniams lieti*. Pagal Rusijos standartą GOST 7769 specialiųjų savybių ketaus markės pradžioje rašoma raidė Ч (*чугун*), po jos einanti raidė ir skaičius rodo legiravimo elementą ir jo kiekį procentais. Pavyzdžiui, ketaus ЧХХМД sudėtis: 3 % C; po 1 % Ni, Cr, Mo; 0,35 % Cu.

*Antifrikcinio* ketaus yra mažas trinties koeficientas, kad būtų mažas slydimo paviršių dilimas. Tam derinamas grafito intarpų, ferito ir perlito santykis, kad grafitas taptų kietuoju tepalu: ištrupėjus slydimo paviršiuje grafito intarpams, atsiradusiose tuštumose gerai laikosi tepalas. Pagal GOST 1585 antifrikcinis pilkasis ketus žymimas raidėmis АЧС (*антифрикционный чугун серый*). Vokiškas standartas DIN 1691 dar nurodo svarbiausią antifrikcinio ketaus parametą – *kietumą* pagal Brinelį (HB 170–240).

*Atspariame dilimui* ketuje nėra grafito (nes jis minkštas), o jame esanti anglis sudaro cementitą ar legiravimo elementų karbidus. Legiruojamas Cr (iki 28 %), Ni (iki 5 %), Cu (iki 2 %). Pavyzdžiui, ketus ЧН4Х2 (pagal GOST 7769) turi 2,6 % C, 4%Ni, 2 % Cr.

*Atspariame korozijai* ketuje paprastai yra C (~3 %), Cr (iki 28 %), Si (iki 18 %), Ni (iki 15 %), Mn (iki 7 %), Mo (iki 4 %), Cu (iki 1 %). Iš šio ketaus gaminamos detalės, atsparios korozijai (dauguma ir karščiui) rūgščių, šarmų ir druskų tirpaluose. Pavyzdžiui, stūmokliniams siurbliams gaminti naudojamas ketus ЧС17М3 (pagal GOST 7769) turi 17 % Si ir 3 % Mo.

*Karščiui atsparus* ketus (atsparus oksidacijai aukštose temperatūrose) būna aliumininis (Al iki 32 %), chrominis (Cr iki 3 %) ir silicinis (Si apie 5 %). Iš šio ketaus gaminamos įvairių krosnių, turbininių variklių, kompresorių detalės, stiklo liejimo formos, tigliai ir pan. Pavyzdžiui, terminių krosnių gamybai

naudojamas aliumininis ketus ЧЮ7Х2, kuriame yra 7 % Al ir 2 % Cr (pagal GOST 7769).

*Karštyje stiprus* ketus (mechanškai stiprus aukštoje temperatūroje) turi daug Ni (11–34 %), jis yra nemagnetinis, atsparus dilimui, korozijai šarmuose, rūgščių tirpaluose, jūros vandenyje, tačiau yra gana brangus. Jis gali būti papildomai legiruotas Mn (iki 7 %), Cu (iki 6 %), Cr (iki 3 %), Nb (niobiu). Šio ketaus pagrindinės charakteristikos: *stipris* ( $R_m=370\text{--}500$  MPa) ir *santykinis ištįsimas* ( $A=7\text{--}25$  %). Iš karštyje stipraus ketaus gaminamos stūmoklių galvutės, siurblių korpusai, kuro aparatūros detalės, nemagnetinės detalės.

*Ketus meniniams liejiniams* daugeliu atvejų pakeičia vario lydinis (iš bronzos, žalvario), kadangi yra daug pigesnis. Pilkajam ir stipriajam ketui, kaip ir vario lydiniam, būdingos geros liejimo savybės (geras takumas) ir atsparumas atmosferos poveikiui. Todėl jis plačiai naudojamas skulptūroms ir kitoms architektūrinėms detalėms bei meno dirbiniams lieti. Pagrindinė liejimo charakteristika – metalo takumas, kuris priklauso nuo ketuje esančių sieros (S) ir fosforo (P) priemaišų. S skatina ketaus balinimą, blogina takumą, todėl jos kiekis apribotas iki 0,12 %. P gerina metalo takumą, didina atsparumą atmosferos poveikiui ir (skirtingai nei pliene) yra naudinga priemaiša, kurios gali būti iki 1 %. Geriausios kokybės meno gaminiams lieti naudojamas specialusis ketus, išlydytas medžio anglimi, jame yra  $\leq 0,03$  % S ir  $\leq 0,3$  P (rusiškai: ЛД1, ЛД2, ЛД3). Dažnai meniniams liejiniams naudojamas paprastas *pilkasis ketus* ЧЧ10 (EN-GJL-100), ЧЧ15, ЧЧ20 (EN-GJL-200), o didelėms architektūrinėms detalėms (kolonomis, turėklams) lieti tinka *stiprusis ketus* ВЧ35 (EN-GJS-350-22), ВЧ40, ВЧ45, ВЧ50 (EN-GJS-500-7).

## 2.4. Spalvotieji metalai ir jų lydiniai

Technikoje plačiai naudojami įvairūs *spalvotieji metalai*. Faktiškai tai yra visi metalai, išskyrus geležį, kuriuos pagal savybes galima suskirstyti į grupes:

1. *Sunkieji metalai* – Ir (iridis, jo tankis  $\gamma \sim 22 \text{ g/cm}^3$ , t. y. jis dvigubai sunkesnis už Pb!), Hg ( $13,5 \text{ g/cm}^3$ ), Pb ( $11 \text{ g/cm}^3$ ), Bi (bismutas,  $10 \text{ g/cm}^3$ ), Cu, Ni (po  $\sim 9 \text{ g/cm}^3$ ), Mn ( $7,3 \text{ g/cm}^3$ ), Cr ( $7,2 \text{ g/cm}^3$ ), Sn, Zn (alavas, cinkas,  $\sim 7 \text{ g/cm}^3$ ); Sb (stibis,  $6,7 \text{ g/cm}^3$ ), Zr (cirkonis,  $6,5 \text{ g/cm}^3$ ).
2. *Lengvieji metalai* – Li (litis,  $\gamma \sim 0,53 \text{ g/cm}^3$ !), Ca, Mg ( $1,5, 1,7 \text{ g/cm}^3$ ), Be (berilis,  $1,9 \text{ g/cm}^3$ ), Al ( $2,7 \text{ g/cm}^3$ ), Sr (stroncis,  $2,6 \text{ g/cm}^3$ ), Ti (titanas,  $4,5 \text{ g/cm}^3$ ).
3. *Taurieji metalai* – Au, Ag, Pt (platina), Pd (paladis), Rh (rodas).
4. *Nelabai lydūs metalai* – W (volframas), Ta (tantalas), Mo (molibdenas), V (vanadis), Nb (niobis), Ir (iridis).
5. *Labai lydūs metalai* – Hg (gyvsidabris), Ga (galis), In (indis), Li (litis), Sn (alavas), Bi, Pb, Cd (kadmis), Zn (cinkas).
6. *Radioaktyvieji metalai* – U, Ra (radis), Th (toris), Ac (aktinis), Pa (protaktinis).
7. *Šarminiai metalai* – Li (litis), Na, K, Rb (rubidis), Cs (cezis).
8. *Retieji metalai* – Ga (galis), Ge, Tl (talas), Sc (skandis), Hf (hafnis), In (indis), Y (itris), Co (kobaltas), Ce (ceris), Re (renis), La (lantanas), Gd (gadolinis), Nd (neodimis).

Jau 3 500 m. pr. Kr. buvo naudojami penki spalvotieji metalai (Au, Ag, Cu, Sn, Pb), o iki mūsų eros – dar dešimt metalų (Bi, K, Na, Ca, Mg, Co – kobaltas, Zn, Hg, Sb – stibis, As – arsenas). Pavyzdžiui, stibis (rus. *сурьма*) Babilonijoje naudotas jau 3 000 m. pr. Kr. kosmetikoje ir indų gamyboje, o arseno (rus. *мышьяк* nuo žodžio *мышь* „pelė“) preparatais buvo naikinamos ne vien pelės ir žiurkės. Iki XX a. vidurio pradėta naudoti dar 60 naujų spalvotųjų metalų. Pavyzdžiui, XX a. penktajame dešimtmetyje atrasti galis ir

germanis (nuo žodžio *Germany* – Vokietija) davė pradžią puslaidininkinių medžiagų gamybai, o tai turėjo įtakos elektroninės pramonės atsiradimui bei supertakumo realizavimui.

Esant tokiai spalvotųjų metalų gausai, kai kurių iš jų pavadinimai kartais painiojami. Pavyzdžiui, radis (Ra) – pavojingas, radioaktyvusis metalas – sumaišomas su rodžiu (Rh) – platinos (Pt) grupės metalu, kuris kartu su Pt naudojamas juvelyriniams dirbiniams. Kartais, netiksliai užrašius metalų pavadinimus, supainiojami visiškai skirtingas savybes turintys ceris (Ce) su ceziu (Cs) ar iridis (Ir) su indžiu (In).

*Ceris – retasis metalas*, kurio tankis beveik kaip plieno, juo legiruojami Mg, Al lydiniai ir jo dedama gaminant nuo radioaktyviojo spinduliavimo netamsėjantį stiklą. Iš Ce gaminami akmenėliai žiebtuvėliams, trasuojančiųjų kulų antgaliai, kadangi ore jis užsiliepsnoja jau 170 °C temperatūroje. *Cezis (Cs) yra šarminis metalas*, lengvesnis už Al, jis lydosi jau 29 °C temperatūroje, savaime užsiliepsnoja ore. Jo radioaktyvusis izotopas <sup>137</sup>Cs naudojamas radioterapijoje ir yra viena kenksmingiausių atliekų, susidarančių gaminant branduolinę energiją.

*Iridis – sunkiausias, nelabai lydus metalas* ( $t_{lyd.}=2\,400\text{ °C}$ ), gaunamas kartu su platina iš rūdų, naudojamas elektrotechnikoje, termoporų gamybai ir kaip katalizatorius, o *Indžio (In) yra labai žema lydymosi temperatūra* (156 °C), todėl jis naudojamas kaip lydmetalis jungiant metalus su stiklu, keramika. Be to, In naudojamas slydimo guoliuose, branduolinėje technikoje, juo dengiami reflektorių, veidrodžių paviršiai.

XVIII a. vystėsi pirometalurgija (nuo graikiško žodžio *pyr* „ugnis“), ir metalai buvo išgaunami redukuojant rūdą. Iš pradžių pašalinamos kenksmingosios priemaišos (ypač S), išdeginant rūdą. Siera išdega, tačiau jos vietą užima deguonis. Deguonis pašalinamas jungiant jį su C, H, Si, iš Cr, Ti, Mn – naudojant pigesnę už juos Al.

Dalis atrastųjų retųjų spalvotųjų metalų ilgą laiką buvo niekur nenaudojami. Laikui bėgant jie buvo pritaikyti ir netgi pakeitė ar suteikė naujų norimų savybių žinomiems metalų lydiniams.

Pavyzdžiui, neodimis Nd (kilęs nuo graikiškų žodžių *neos* – naujas ir *didymos* – dvynys) ir gadolinis Gd padidino magnio lydinių atsparumą karščiui, o lantanoido tulio Tm radioaktyvusis izotopas  $^{170}\text{Tm}$  buvo panaudotas kuriant portatyvinį rentgeno aparatą. Be to, gadolinis naudojamas feromagnetikų gamyboje, magnetiniuose lydiniuose, atominių reaktorių reguliuojamuose strypuose, o neodimio yra Mg, Al, Ti lydiniuose, kurie naudojami lėktuvų ir kosminių laivų statyboje. Neodimis dar taikomas lazerinėje technikoje: neodimio jonai  $\text{Nd}^{3+}$  yra aktyvioji priemonė lazerio stikluose.

Plačiausiai naudojami Al, Cu, ir Mg lydiniai, Ti (titanas), Zn (cinkas), Ni, Pb, Sn (alavas). Spalvotieji metalai įeina į daugelio lydinių sudėtį, pasižymi kitomis savybėmis nei geležis, dėl to kartais yra nepakeičiami.

#### 2.4.1. Aliuminis ir jo lydiniai

Grynas *aliuminis* (Al) – sidabriškai baltas, lengvas ( $\gamma=2,7 \text{ g/cm}^3$ ), plastiškas, bet nestiprus metalas. Al kietumas pagal Brinelį HB 170, stipris  $R_m=50 \text{ MPa}$ , santykinis ištįsimas  $A=50 \%$ , lydymosi temperatūra  $t_{\text{lyd.}}=660 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Iš metalų aliuminis labiausiai paplitęs gamtoje (sudaro beveik 9 % Žemės plutos masės, Fe ~4 %, Ca ~3 %), randamas tik junginiuose, daugiausia – aliumosilikatuose. Aliuminis gaunamas iš rūdų: boksito, alūnito, kaolinito (kuris yra ir žaliava porcelianui gaminti). Jis išgaunamas elektrolizės būdu. Pirmiau rūdos perdirbamos į aliuminio oksidą ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), o iš jo, pridėjus kriolito, Al ir Na fluoridų, elektrolize išlydomas metalinis Al. Elektrolizerio viršuje yra anodas (iš antracito, kokso, akmenų anglių). Apačioje, tiglio formos grafitiniame katode, yra aliuminio oksidas, ištirpintas išlydytame kriolite  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ . Tekant galingai elektros srovei, iš  $\text{Al}_2\text{O}_3$  išsiskiria grynas Al, kuris nupilamas. Neišvengiamos aliuminio priemaišos (Fe, Si, Mn, Cu, Zn, Cr) didina aliuminio kietumą bei

stiprumą, tačiau mažina jo elektrinį laidumą, plastiškumą, atsparumą korozijai.

*Aliuminis – geras elektros ir šilumos laidininkas* (po Ag ir Cu). Po geležies lydinų tai dažniausiai naudojamas metalas. Jis yra chemiškai aktyvus, dėl to jo paviršiuje susidaro tanki patvari Al oksido ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) plėvelė, sauganti nuo korozijos ore, vandenyje, koncentruotoje azoto ir daugelyje organinių rūgščių. Todėl Al ir jo lydiniai naudojami maisto pramonėje, buityje, statyboje (pvz., langų rėmams). Tačiau Al neatsparus korozijai druskos rūgšties bei šarmų aplinkoje. Todėl Al gaminiai, eksploatuojami lauko sąlygomis, laikui bėgant yra ardomi dėl rūgščiojo lietaus poveikio.

Aliuminio, kaip legiruojančiojo priedo, pridėjus į Cu, Mg, Ti, Fe lydinius, pakeičia jų savybes. Al lydiniai (~90 % Al) būna su Cu, Mg, Zn, Si, Mn, Li, Cd, Cr, Ni. Dažniausiai naudojami daugiakomponenčiai aliuminio lydiniai, kuriuose esantys legiravimo elementai tarpusavyje sudaro sunkiai aliuminyje tirpstančias fazes:  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ,  $\text{CuMgAl}_5\text{Mg}_5$  ir kt.

Tokie lydiniai pasižymi geresnėmis mechaninėmis ir technologinėmis savybėmis (jie būna stipresni, geriau liejami, apdirbami pjovimu), bet mažiau atsparūs korozijai (ypač legiruoti Cu). *Virinant Al* ir jo lydinius kyla problemų dėl patvarios ir nelydzios  $\text{Al}_2\text{O}_3$  plėvelės ( $t_{\text{lyd}} = 2\,050\text{ }^\circ\text{C}$ ). Todėl prieš pat suvirinimą *būtina nuvalyti oksido plėvelę* taikant katodinę valymą (apgęžtojo poliškumo srovę: „+“ ant elektrodo) arba kintamąją (impulsinę) srovę, kad būtų suardyta patvari aliuminio oksido plėvelė.

Lietuvoje aliuminio ir jo deformuojamųjų lydinų žymėjimas atliekamas remiantis Europos Sąjungos standartais LST EN 753–1(2), o lydinų būsenų ir jų terminių apdorojimų žymėjimas atliekamas pagal LST EN 515. Pavyzdžiui, lydinyje  $\text{AlCu4Mg1}$  yra ~4 % vario ir ~1 % magnio.

Pirmieji aliuminio lydiniai pramonėje pradėti naudoti XIX a. antrojoje pusėje. Tai buvo nestiprūs ir neatsparūs korozijai *siluminai* (Al-Si lydiniai). XX a. pradžioje sukurti *duraliuminiai* (Al-Cu-Mg-Mn lydiniai), kurių daug naudojama elektrotechnikoje, mašinų

gamyboje, elektronikoje. Aliuminiu dengiami plieniniai dirbiniai (dėl antikoroziinių savybių), teleskopų veidrodžiai, jo milteliai naudojami metalurgijoje, miltelių technologijose (*sukepintieji aliuminio lydiniai* ir pudra – dažų gamyboje).

Lietuvoje iš aliuminio lydinų gaminamos mašinų, prietaisų detalės, namų apyvokos reikmenys ir kiti dirbiniai.

Pagal gamybos būdą ir technologines savybes skiriami *deformuojamieji ir liejamieji aliuminio lydiniai* (tarp jų ir sukepintieji), kurie gali būti termiškai stiprinami ar nestiprinami.

#### **2.4.1.1. Deformuojamieji aliuminio lydiniai**

Deformuojamieji lydiniai sudaro ~80 % visų Al lydinų. Jie turi būti plastiški, kad nesuirėtų, esant būtinoms apkrovoms.

Termiškai nestiprinami lydiniai gaunami legiruojant aliuminį Mn ar Mg, o termiškai stiprinami – legiruojant Cu, Mg, Mn su galimais nedideliais Si, Zn, Cr priedais. Iš jų labiausiai paplitę *duraliuminis* – Al, Cu (2–5 %), Mg (0,2–2 %), Mn (0,3–1 %) lydinys, *avialis* – Al, Si, Mg, Mn lydinys, *superduraliuminis* – Al, Si, Cu, Mg, Mn lydinys.

*Termiškai nestiprinami lydiniai* (pvz., AlMn1, kurio stipris  $R_m=130$  MPa, kietumas HB 30, o santykinis ištįsimas  $A=23$  %) yra plastiški, atsparūs korozijai, gerai suvirinami. Jie naudojami statyboje (langų ir durų rėmams, stogų dangoms), iš jų gaminamos laivų, orlaivių, raketų, vagonų, šaldytuvų, suvirintų rezervuarų, vamzdinių detalės.

*Duraliuminis* (pvz., AlCu4Mg1, kurio  $R_m=230$  MPa, HB 42,  $A=10$  %) užgrūdintas išlieka plastiškas ( $R_m=430$  MPa, HB 105,  $A=10$  %). Jį galima štampuoti, iš jo gaminamos lėktuvų konstrukcijos, automobilių kėbulai, vamzdžiai, viela. Tačiau duraliuminis neatsparus korozijai, todėl dažnai valcuojamas su plonais gryno Al išoriniais sluoksniais (plakiravimas).

*Avialis* (pvz., AlSiMg) yra mažiau legiruotas ir ne toks stiprus kaip duraliuminis, bet plastiškesnis ( $A=20$ – $23$  %), geriau apdirbamas

pjovimu, atsparesnis korozijai. Iš jo kalamos lėktuvų dalys, malūnsparnių sraigčiai, gaminami lakštai, folija.

*Stipriausias* iš deformuojamųjų Al lydinų yra Al, Zn, Mg, Cu lydinys (pvz., AlZn5,5MgCu). Užgrūdinto lydinio stipris  $R_m=580$  MPa, kietumas – HB 150 ir santykinis ištįsimas – tik  $A=7$  %. Lydinys sunkiai apdirbamas mechaniškai, jame esantis Cu mažina jo atsparumą korozijai, todėl jis dažnai plakiruojamas grynu Al.

*Slydimo guoliams* naudojamas Al lydinys su ~6 % Sn, ~1 % Cu, ~1 % Ni, kuris yra patvaresnis ir pigesnis už alavo lydinius.

#### 2.4.1.2. Liejamieji aliuminio lydiniai

Liejamiesiems lydiniams būtinos *geros liejimo savybės*: žema lydymosi temperatūra (680–780 °C); geras išlydyto metalo takumas, kad visiškai užpildytų liejimo formą; išlydytas metalas turi minimaliai absorbuoti dujas, kad nesusidarytų dujų porų; aušdamas metalas turi mažai trauktis, kad neatsirastų įtrūkių.

Lietinėms detalėms gaminti paprastai naudojami Al lydiniai, legiruoti Si, Cu, Mg. Juose dar gali būti šiek tiek Ti, Zn, Zr (cirkonio). Liejamieji aliuminio lydiniai žymimi pagal Rusijos standartą GOST 1583 arba pagal Lietuvoje įteisintus Europos Sąjungos standartus LST EN 1780-1(2). Pavyzdžiui, rusiškas lydinys AK12M2 (pagal senąjį standartą – AJ15, raidė „A“ reiškia Al, „K“ – кремний – Si, „M“ – медь – Cu) atitinka europinį lydinį AlSi12Cu2, kuriame Si – 12 % ir Cu – 2 %.

*Geriausiomis liejamosiomis savybėmis pasižymi Al-Si lydiniai*, kurie vadinami *siluminais* (5–13 % Si). Nelegiruoti siluminai termiškai nestiprinami. Legiruotieji siluminai gali būti termiškai apdorojami grūdinant ir sendinant. Jie labai gerai liejami, suvirinami, pjaunami, tačiau nėra stiprūs, o jų darbo temperatūra yra iki 200 °C. Iš siluminų liejami variklių stūmokliai, cilindų blokų galvutės, karteriai ir kitos fasoninės automobilių ir lėktuvų detalės.

Liejamieji *Al-Si-Cu lydiniai yra stipresni* negu siluminai. Jie išsaugo pakankamai geras mechanines savybes iki 250 °C tempera-

tūros, bet yra mažiau atsparūs korozijai. Palyginti su nelegiruotais siluminiais, Al-Si-Cu lydiniai lengviau apdorojami pjovimu, geriau virinami, termiškai stiprinami. Iš šių lydinų liejami automobilių vidaus degimo variklių blokai.

*Al-Cu lydiniai* galima termiškai sustiprinti, bet jų liejamosios savybės yra blogesnės. Jie blogai suvirinami, yra mažai atsparūs korozijai. Iš tokių lydinų liejamos svarbios, apkrautos detalės, kurių darbo temperatūra – iki 300 °C.

Geromis mechaninėmis savybėmis pasižymi *Al-Mg lydiniai* (4–10 % Mg). Palyginti su siluminiais ir Al-Cu lydiniais, jie plastiškesni, atsparesni korozijai, tačiau jų liejamosios savybės yra blogesnės, o darbo temperatūra – tik iki 80 °C. Al-Mg lydiniai naudojami maisto ir chemijos pramonėje, buitiniuose prietaisuose.

*Al-Zn-Mg lydiniai* atsparūs korozijai, neblogai suvirinami. Palyginti su Al-Cu ir Al-Mg lydiniais, jie pasižymi geromis liejamosiomis savybėmis. Po grūdinimo ir sendinimo šie lydiniai įgyja gerų mechaninių savybių, o jų darbo temperatūra yra iki 150 °C. Iš Al-Zn-Mg lydinų daugiausia gaminami prietaisų detalių liejiniai.

#### **2.4.1.3. Sukepintieji milteliniai aliuminio lydiniai**

Atskirą aliuminio lydinų grupę sudaro sukepintieji milteliniai aliuminio lydiniai, gaminami pagal specialią technologiją: išlydytas techniškai grynas Al (gali būti kartu su aliuminio oksidu) išpurškiamas azoto ir deguonies mišiniu. Susidarę milteliai briketuojami ir sukepinami 600 °C temperatūroje. Iš šių briketų valcuojami pusgaminiai: strypai, profiliai ir pan. Tokie Al lydiniai atsparūs kaitrai (t. y. išlaiko geras mechanines savybes 300–900 °C temperatūroje), yra ypač atsparūs korozijai, stiprūs (jų stipris  $R_m = 120\text{--}400$  MPa), lengvai apdorojami pjaunant, bet yra neplastiški (santykinis ištįsimas  $A = 2\text{--}4$  %), virinami neblogai. Sukepintuosiuose milteliniuose Al lydiniuose gali būti iki 15 % nelydžiosios fazės ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), todėl jų lydymosi temperatūra yra ~2 000 °C.

Iš sukepintųjų miltelinių aliuminio lydinių valcuojami strypeliai, įvairūs profiliai, vamzdžiai, o pastaruoju metu pradėti gaminti net lengvųjų automobilių kėbulai.

#### 2.4.2. Varis ir jo lydiniai

Varis – sunkus ( $\gamma \sim 9 \text{ g/cm}^3$ ) rusvos spalvos metalas, jo lydymosi temperatūra  $\sim 1080^\circ\text{C}$ . Iš visų techninių metalų vario šiluminis ir elektrinis laidumas didžiausias (po sidabro). Jis atsparus atmosferinei ir povandeninei (gėlame ir jūros vandenyje) korozijai, daugeliui organinių rūgščių, šarmų, bet neatsparus azotui, sieros rūgščiai, amoniakui. Techninis varis yra minkštas, nestiprus (jo stipris  $R_m \sim 230 \text{ MPa}$ , kietumas HB 35), tačiau labai plastiškas (santykinis ištįsimas  $A = 50\%$ ). *Cu galima sustiprinti taikant deformacinį sukietinimą* (šalta deformuojant), tačiau tai labai sumažina jo plastiškumą.

Varis labai technologiškas, gerai tempiamas, lituojamas, valcuojamas, virinamas, tačiau dėl didelio tankio ir klampumo blogai pjaunamas staklėmis.

Pagrindinės techninio vario priemaišos yra Fe, Ni, Pb, Sn, Bi (bismutas), Sb (stibis), As (arsenas), S, O. Jos sumažina elektrinį bei šiluminį laidumą, plastiškumą ir korozinį atsparumą. Varis gaminamas įvairaus švarumo (99,0–99,99 % Cu). Švaresnis varis naudojamas elektros laidams gaminti, labiau užterštas – vario lydiniais gaminti. Vario priemaišos *Pb, Bi, S, O sudaro gerai lydžius junginius*. Pavyzdžiui, Cu-Pb eutektika lydosi  $326^\circ\text{C}$ , o Cu-Bi – net  $270^\circ\text{C}$  temperatūroje. Todėl su šiomis priemaišomis Cu darosi trapus karštos būsenos, todėl jų kiekis neturi viršyti 0,002 %.

Varis ir jo lydiniai (išskyrus Cu-Ni lydinis) reaguoja su organinėmis rūgštimis, sudarydami nuodingus junginius. Todėl kontaktuojančio su maistu Cu, žalvario ar bronzos paviršių būtina padengti alavu arba sidabru.

Europos Sąjungoje taikomos dvi vario ir vario lydinių žymėjimo sistemos – skaitmeninė (pagal tarptautinį standartą

ISO/TR 7003) ir cheminiais simboliais (ISO 1190-1). Pavyzdžiui, lydinio CS790P simboliai reiškia: „C“ – Cu, „S“ – pridėtinis metalas suvirinimui ir litavimui, 790 – skaičius, kuris priskiriamas konkrečiai medžiagai, „P“ – vario, švino ir cinko lydinys. Vario ir vario lydinių būsenas ir jų terminį apdorojimą reglamentuoja LST EN 1173.

Varis – vienas iš pirmųjų metalų, kuriuos žmogus pradėjo naudoti, kadangi gamtoje jis randamas ir grynuolių pavidalu. Jau 3 500 m. pr. Kr. egiptiečiai iš jo gamino įvairius dirbinius; bronzą mokėta lydyti 2 800 m. pr. Kr. Dabar apie 50 % Cu sunaudojama elektros laidininkų gamybai. Jis naudojamas lydmetaliams, stogų skardai ir kaip bazinis metalas gaminant *žalvarį ir bronzą*.

#### **2.4.2.1. Žalvaris**

*Žalvaris* – tai vario lydinys, kurio svarbiausias legiravimo elementas yra cinkas (Zn). Didinant žalvaryje cinko kiekį iki 30 % didėja jo plastiškumas, didinant jį iki 43 % – stiprumas. Būtent Zn sustiprina lydinį, daro jį plastiškesnį, atsparesnį dilimui, tačiau sumažina jo atsparumą korozijai bei elektrinį ir šiluminį laidumą. Žalvaris lengvai liejamas, o plastiškai deformuojant – sukietinamas. Plastiškumą jis atgauna atkaitintas 600–700 °C temperatūroje (rekristalizacija).

Žalvariai, kaip ir visi spalvotojų metalų lydiniai, skirstomi į deformuojamuosius ir liejamuosius (GOST 15527). Iš deformuojamųjų žalvarių dirbiniai gaminami juos presuojant, valcuojant, tempiant. Žalvario markėje nurodomi legiravimo elementai ir apytikslis jų kiekis procentais. Pavyzdžiui, rusiškas lydinys Л190 (Л – латунь „žalvaris“) atitinka europinį CuZn10 (pagal DIN 17660), kuriame vario yra 90 %, o cinko – 10 %. Liejamasis žalvaris žymimas raide „G“ markės pradžioje. Pavyzdžiui, lydinyje G-CuZn15Si4 yra Zn ~15 % ir Si ~4 %.

Be cinko, žalvaryje gali būti įvairių legiravimo elementų (Al, Mn, Fe, Sn, Si, Ni, P, As, Pb) jo mechaninėms, antikorozinėms, technologinėms savybėms pagerinti. Fosforo (P ~0,2 %) ir arseno

(As ~ 0,04 %) dedama, siekiant išvengti plyšinės korozijos (ypač kai Zn > 20 %). Švinas pagerina žalvario apdirbamumą pjovimu, todėl juo legiruoti žalvariai dažnai vadinami *automatiniais* (pvz., ЛС60-1, CuZn39Pb0,5). Al, Sn, Si, Ni (iki 8 %) gerina žalvario liejamąsias savybes. Alavas padidina žalvario korozinį stiprumą ir atsparumą jūros vandenyje ir toks lydinys dažnai vadinamas *jūriniu žalvariu* (pvz., ЛО70-1). Nikelis padidina žalvario stiprumą ir atsparumą korozijai. Manganas padidina jo stiprumą ir atsparumą korozijai legiruojant aliuminiu, geležimi, alavu. Silicis padidina jo kietumą, stiprumą, o kartu su švinu labai pagerina antifrikcines savybes. Dėl to švinu-siliciu legiruoti žalvariai naudojami šildymo guolių įvorėms gaminti. Legiruotas aliuminiu (CuZn40Al2), nikeliu (CuZn35Ni) žalvaris naudojamas labai apkrautoms slystančioms mašinų detalėms.

Žalvaris naudotas Artimuosiuose Rytuose jau III tūkst. pr. Kr. Iki XVIII a. jis buvo lydomas iš vario su cinko rūda ir medžio anglimis. XVI a. pr. Kr. žalvarį pradėta naudoti ir Lietuvoje (žalvario amžius). Nuo XIX a. jis lydomas kartu su cinku.

Iš žalvario liejami papuošalai, spaudimu gaminamos šovinių tūtelės, indai, kalamos monetos, liejamos dylančios bei agresyviojoje aplinkoje naudojamos detalės: prietaisų krumpliaračiai, sliekinės pavaros, įvorės, įdėklai, tarpinės ir kt.

#### **2.4.2.2. Bronza**

*Bronza* – tai vario lydinys su įvairiais cheminiais elementais (Sn, Al, Si, Pb, Be, Ni, Cr, Mn, Ti, P, Fe), išskyrus lydinius, kurių svarbiausias legiravimo elementas yra cinkas (nes tai – žalvaris), ir lydinius su nikeliu. Supaprastintai galima teigti, kad bronzos – tai vario lydiniai be cinko (Zn) (išimtį sudaro lydiniai, kuriuose brangus alavas (Sn) iš dalies pakeičiamas pigiu Zn). Bronzos atsparesnės korozijai nei žalvariai, brangesnės ir dažniausiai vadinamos pagal pagrindinio legiravimo elemento pavadinimą: *alavinė, silicinė, aliumininė, švininė, berilinė, chrominė, nikelinė*.

Rusijoje bronzos ženklamos pagal GOST standartus, o Europoje dažnai pagal DIN standartus. Pavyzdžiui, *deformuojamoji alavinė* bronzos reglamentuojama standartais GOST 5017, DIN 17662; *liejamoji alavinė* bronzos – GOST 613, DIN 1703; *silicinė bronzos* – GOST 18175, DIN 17666. Bronzų markėse nurodomi tik legiravimo elementai ir jų kiekiai procentais, o vario kiekis neparodamas. Pavyzdžiui, rusiška aliumininė bronzos (*бронза*) БрАМц 9-4 atitinka europinę CuAl9Mn4, jų sudėtyje yra: Al – 9 %, Mn – 4 %, likusi dalis – varis.

*Alavinė bronzos* yra seniausiai naudojama, ji pasižymi geriausiomis mechaninėmis savybėmis, geromis liejamosiomis savybėmis, labai atspari korozijai. Ši bronzos pasižymi geromis antifrikcinėmis savybėmis, tačiau yra dvigubai brangesnė už varį. Kuo joje daugiau alavo (Sn), tuo ji stipresnė, bet ne tokia plastiška.

Bronzos, kurių komponentai yra vien varis ir alavas, yra ganėtinai brangios (~20–30 kartų brangesnės už paprastą plieną). Taupant alavą (už Cu jis brangesnis ~3–15 kartų !) bei siekiant pagerinti mechanines, technologines ir eksploatacines alavinių bronzų savybes, jos yra legiruojamos Zn, Pb, Ni, P. Pakeitus dalį alavo (Sn lieka 3–6 %) *cinku*, pagerėja bronzos mechaninės ir liejamosios savybės, *švinu* – antifrikcinės savybės. Kadangi cinkas ir švinas pigesni už varį, tai tokių bronzų kainos daug mažesnės. *Nikelis* susmulkina lydinio struktūrą, mažina jo poringumą, pagerina mechanines savybes ir atsparumą korozijai. *Fosforas* (~1 %) gerina liejamąsias savybes (kaip ir ketaus), didina liejinių stiprumą, kietumą, tamprumą, pasipriešinimą dilimui ir gerina jų antifrikcines savybes.

Senovėje (jau 4 000 m. pr. Kr.) iš alavinės bronzos buvo gaminami ginklai, papuošalai, darbo įrankiai, viduramžiais lieti varpai ir pabūklai. XIX a. pradėtos gaminti garo mašinų dalys, antifrikcinės įvorės, krumpliaračiai.

Iš alavinės deformuojamosios bronzos (iki 6 % Sn) gaminamos spyruoklinės detalės (ypač elektrotechnikos prietaisuose), slystančios mašinų detalės, o iš alavinės liejamosios bronzos (iki 12 % Sn) –

korozijai ir dilimui atsparios detalės, slydimo guoliai. Tokios bronzos naudojamos meniniam liejimui, vandentiekų ir garotiekų armatūrai, laivų įrangai, antifrikinėms detalėms lieti.

Alavinės bronzos pakaitalas – apytiksliai perpus pigesnė *silicinė bronz*a, kurioje paprastai yra 1–3,5 % Si. Ji atspari korozijai, plastiška, todėl gerai apdirbama spaudimu. Silicinė bronza tinkama suvirinimui, puikiai lituojama (naudojama kaip lydmetalis aukštatemperatūriam litavimui), patenkinamai apdirbama pjovimu, tačiau jos liejamosios savybės blogesnės nei alavinių ar aliumininių bronzų.

Silicinės bronzos legiruojamos Mn, Ni, Pb, norint pagerinti jų savybes. Manganas ir nikelis padidina tokių bronzų stiprumą ir kietumą, o Mn gerokai padidina tamprumo ribą. Švinas gerina jų antifrikcines ir pjovimo savybes. Nikeliu legiruotas bronzas galima stiprinti jas termiškai apdorojant (pvz., bronza БрKH1-3, atitinkanti europinį lydinį CuNi3Si, turi 3 % nikelio ir ~1 % silicio).

Iš silicinės bronzos gaminamos svarbios *antifrikinės* įvorės (kreipiamosios), laivų ir variklių detalės, membranos, chemijos pramonės įrenginiai, spyruoklės, radiotechnikos detalių elementai ir kt.

*Aliumininė bronz*a, kaip ir silicinė, yra pigesnė nei alavinė ir gali būti jos pakaitalas. Ši bronza yra stipresnė už alavinę, atspari korozijai ir dilimui, pasižymi geromis antifrikinėmis savybėmis, bet yra sunkiau liejama ir deformuojama (kai kurios rūšys – tik pakaitintos). Paprastai aliumininėje bronzoje yra 5–11 % Al, o jos savybėms gerinti ji legiruojama Ni, Mn, Fe, Pb. Nikelis ir geležis padidina aliumininės bronzos stiprumą, manganas padaro šią bronzą atsparesnę korozijai ir palengvina jos mechaninį apdirbimą, pridėjus švino, pagerėja jos antifrikinės savybės. Tokios bronzos gali būti stiprinamos termiškai. Pavyzdžiui, rusiška bronza БрAMц9-2 (pagal GOST 18175), atitinkanti europinį lydinį CuAl9Mn2 (pagal DIN 17666), turintį 9 % aliuminio ir 2 % mangano, gali būti termiškai apdorojama (grūdinant ir atleidžiant).

Aliumininė bronzos yra gražios išvaizdos, iš jos gaminamos įvairios mašinų ir laivų detalės (krumpliaračiai, įvorės, sraigčiai, siurblių korpusai), kalamos monetos, medaliai.

*Švininė bronzos* yra nestipri ( $R_m \sim 60$  MPa,  $A \sim 3-8\%$ ), bet pasižymi geromis antifrikcinėmis savybėmis, atspari smūgiams. Todėl iš jos gaminami daugiausia slydimo ir bimetaliniai guolių įdėklai. Minkšti švino kristalai išsidėsto ant vario grūdelių ribų, ir tokia struktūra užtikrina geras antifrikcines savybes. Mechaninėms savybėms pagerinti švininės bronzos legiruojamos Sn ir Ni.

*Berilinė bronzos* paprastai turi  $\sim 2\%$  Be (pvz., rusiška bronzos БрБ2). Ji yra labai brangi, bet ypač stipri (negrūdintos bronzos stipris  $R_m$  – iki 500 MPa), tampri, atspari korozijai, dilimui, nuovargiui, laidus elektrai bei šilumai. Atlaiko temperatūrą nuo  $-200$  iki  $+250$  °C, dar legiruojama Ni ir Ti (pvz., БрБНТ1,9). Gaminius iš berilinės bronzos lengva tekinti, virinti ir apdoroti termiškai (po stiprinimo grūdinant ir sendinant jų  $R_m$  siekia iki 1 300 MPa, santykinis ištįsimas  $A = 3-5\%$ ), tačiau ji 5–10 kartų brangesnė už kitas bronzas.

Berilinė bronzos naudojama svarbioms prietaisų spyruoklėms, spyruokliuojančioms detalėms, kontaktams, svarbiems elektrotechnikos ir elektronikos prietaisams (pvz., aviacijoje), nekibirkščiujantiems nuo smūgių įrankiams (galimoje sprogimo aplinkoje) gaminti. Berilis yra toksiškas, todėl berilinės bronzos negalima naudoti maisto pramonės įrenginiuose.

*Chrominė bronzos* atspari kaitrai, laidus elektrai ir šilumai. Ji naudojama mašinų kolektoriams, kontaktinio suvirinimo elektrodams gaminti.

*Nikelinė bronzos* pasižymi puikiomis plastinėmis savybėmis, dideliu koroziniu atsparumu, tačiau ji yra gana brangi (dėl daug kainuojančio nikelio).

### 2.4.3. Magnis ir jo lydiniai

Magnis yra *lengviausias pramoninis metalas* ( $\gamma = 1,74 \text{ g/cm}^3$ ). Jam būdinga sidabriškai balta spalva ir nedidelė lydymosi temperatūra ( $650^\circ\text{C}$ ). Kaitinamas grynas magnis intensyviai oksiduojasi, o  $623^\circ\text{C}$  temperatūroje savaime užsidega. Jo milteliai bei *drožlės gali savaime užsidegti* net kambario temperatūroje. Grynas magnis lengvai apdirbamas pjovimu, jis neatsparus korozijai, o pagrindinės mechaninės jo savybės prastos: stipris  $R_m \sim 110 \text{ MPa}$ , santykinis ištįsimas  $A \sim 7\%$ , todėl kaip konstrukcinė medžiaga grynas magnis nenaudojamas. Daug vertingesni magnio lydiniai, kuriems būdingos specifinės savybės: mažas svoris, gana didelis stiprumas, sugebėjimas atlaikyti smūgines apkrovas bei gesinti vibracijas. Magnio lydiniai, palyginti su aliuminio ar vario, *geriau apdorojami pjovimu. Jie lengviau šlifuojami bei poliruojami*. Pagrindiniai šių lydinų trūkumai yra mažas korozinis atsparumas, sudėtinga liejimo technologija bei atliekų polinkis savaime užsidegti. Technikoje dažniausiai naudojami magnio lydiniai su aliuminiu ( $\sim 10\% \text{ Al}$ ), cinku (iki  $6\% \text{ Zn}$ ) ir manganu (iki  $2,5\% \text{ Mn}$ ). Siekiant pagerinti mechanines ir antikoroazines savybes jie papildomai legiruojami Zr, Ni, Si, Ti, Be, Cd, Nd (neodinu).

Daugelį magnio lydinų galima sustiprinti apdorojant termiškai. Jie būna deformuojamieji ir liejamieji (kaip ir Al). Rusijoje gaminami deformuojamieji Mg lydiniai žymimi (pagal GOST) raidėmis „MA“ ir sąlyginiu markės skaičiumi. Šie lydiniai būna įvairių sistemų: Mg-Mn, Mg-Al-Zn, Mn-Zn-Zr, kurie deformuojami karštos būsenos ( $300\text{--}500^\circ\text{C}$ ). Pavyzdžiui, lydinys MA5 atitinka europinį lydinį (pagal DIN) MgAl8Zn ( $8\% \text{ Al}$ ,  $\sim 1\% \text{ Zn}$ ). Liejamieji lydiniai žymimi raidėmis „MJ“. Jų cheminė sudėtis artima deformuojamųjų lydinų cheminei sudėčiai (pvz., rusiškas MJ15 atitinka europinį G-MgAl8Zn). Lietų gaminių struktūra dažnai būna stambiagrūdė, todėl jų mechaninės savybės blogesnės nei deformuojamųjų.

Magnio lydiniai naudojami automobiliuose (stabdžių būgnai, variklių karteriai), radijo aparatuose, pirotechnikoje, aviacijoje, atominiuose reaktoriuose (nes nesąveikauja su uranu). Dauguma magnio lydinių neatsparūs korozijai, todėl gaminiai dengiami apsauginėmis oksidų plėvelėmis ir dažomi.

#### 2.4.4. Titanas ir jo lydiniai

Titanas – *lengvas* ( $\gamma = 4,5 \text{ g/cm}^3$ ), *stiprus*, pilkos spalvos metalas, kurio lydymosi temperatūra 1 663 °C (aukštesnė nei plieno). Stiprumu titanas prilygsta plienui, gerai deformuojamas, jo *atsparumas korozijai didesnis už nerūdijančio plieno, gerai suvirinamas* inertinėse dujose, tačiau blogai apdirbamas pjovimu. Jis vidutiniškai *dvigubai brangesnis už nerūdijantį chromo nikelio plieną* (pvz., X18H10T).

Techninio titano (99,4–99,5 % Ti) stipris  $R_m = 300\text{--}500 \text{ MPa}$ , santykinis ištįsimas  $A = 20\text{--}30 \%$ . Kenksmingosios titano priemaišos yra N, C, O ir H. Jos padidina titano kietumą bei stiprumą, tačiau sumažina plastiškumą ir atsparumą korozijai.

*Titanas stiprus ir neigiamose temperatūrose (iki –270 °C), o neužterštas vandeniliu ( $H < 0,002 \%$ ) išlieka ir plastiškas.* Kylant temperatūrai titano stiprumas mažėja (250 °C temperatūroje jo stipris  $R_m$  sumažėja maždaug perpus).

*Titano lydiniai pasižymi geromis mechaninėmis savybėmis, dažnai yra atsparesni už titaną, turi mažą šiluminę laidumą, yra nemagnetiški.* Pagrindinis legiravimo elementas titano lydiniuose yra aliuminis, kuris padidina jų šiluminį stabilumą (geros mechaninės savybės išlieka gana aukštoje temperatūroje, lydiniai mažiau oksiduojasi). Kartu su aliuminiu titano lydiniai legiruojami V, Mo, Cr, Fe, Mn, Zr, Sn, Nb, Ta, W. Pavyzdžiui, rusiškas deformuojamasis lydinys BT6 (pagal GOST) atitinka europinį TiAl6V4 (pagal DIN), kuriame yra 6 % Al ir 4 % V. Tokių lydinių stipris siekia 1 100 MPa ir mažai krinta kylant temperatūrai (iki

650 °C). Šie lydiniai atsparūs korozijai, gerai virinami, tačiau yra ne tokie plastiški.

Titano lydiniai pasižymi *geromis liejamosiomis savybėmis*, tačiau jų liejimą apsunkina metalo cheminis aktyvumas. Todėl titano lydiniai lydomi bei išpilstomi vakuume arba neutraliosiose dujose. Liejiniams skirti titano lydiniai turi panašią cheminę sudėtį kaip ir deformuojamieji lydiniai, pavyzdžiui, BT6Л (raidė „Л“ pagal GOST rodo, kad tai liejamasis lydinys). Lietų detalių mechaninės savybės blogesnės negu detalių, gaminamų deformavimu arba pjovimu, nes titano liejiniai termiškai nestiprinami.

Titano lydiniai *labai atsparūs korozijai agresyviose terpėse net aukštose temperatūrose*. Todėl jie plačiai naudojami mašinų, lėktuvų, kosminių laivų gamyboje, laivų statyboje (korpusai, sraigčiai, torpedos), chemijos pramonėje.

#### **2.4.5. Lydmetaliai**

*Lydmetaliai* – tai įvairių metalų lydiniai, kurie išlydyti *suvilgo jungiamų medžiagų paviršius, o susikristalizavę* (sustingę) *sudaro lituotinę sujungimą*. Skirtingai nuo suvirinimo (lankinio, dujinio), jungiamos medžiagos neišsilydo, o tarp jų lieka lydmetalio tarp sluoksnis. Jeigu tarpelis tarp jungiamų paviršių pakankamai mažas, pvz., ~0,01–0,3 mm (įvairiems metalams ir lydiniams yra skirtingas diapazonas), tai skystas lydmetalio, kapiliarinių jėgų veikiamas, pats skverbiasi (teka) tarp jungiamų medžiagų, t. y. vyksta *kapiliarinis litavimas*. Toks litavimas plačiai taikomas elektrotechnikos, elektronikos elementams sujungti, gręžimo, pjovimo įrankiams gaminti (pvz., gerai žinomi „pobeditiniai“ grąžtai, pjūklai – prie įrankių pagrindo prilituojami pjaunantieji kietlydiniai).

Lydmetalio parenkamas įvertinus jo ir lituojamų medžiagų fizikinių savybių skirtumus (lydymosi temperatūrų skirtumus, šiluminio plėtimosi ir šiluminio laidumo koeficientus) bei chemines savybes (polinkį sudaryti oksidus, nitridus ar hidratų, oksidų susidarymo intensyvumą ir patvarumą). Be to, būtina įvertinti

jungiamų medžiagų vilgumą, metališkųjų junginių tarpsluoksnių susidarymo galimybes ir sąlygas. Išlydytas lydmetalis (jo lydymosi temperatūra turi būti žemesnė nei lituojamų medžiagų) privalo gerai vilgyti ir pasiskleisti lituojamame paviršiuje, turėti panašų šiluminio plėtimosi koeficientą, garantuoti reikiamą stiprumą gaminio eksploatacijos temperatūroje.

Pagal cheminę sudėtį lydmetaliai yra: alavo ir švino, alavo ir cinko, vario, aliuminio, titano, kadmio, galio, geležies, sidabro, paladžio, platinos ir kt. Pagal Rusijos GOST standartą lydmetalių markės žymimos raide „П“ (*npunoŭ*). Po jos esančios raidės reiškia lydmetalį sudarančius komponentus, o skaičiai rodo jų kiekį procentais. Pagal Vokietijos standartą DIN lydmetaliai žymimi raide „L“ (*loten* „lituoti“). Pvz., populiarus rusiškas alavo ir švino lydmetalis ПООС90 (GOST 21930-76), skirtas vario, geležies ir nikelio lydinams lituoti, atitinka europinį lydinį L-Sn90Pb (DIN 1707-1981) su 90 % Sn ir 10 % Pb. Įdomu tai, kad šio lydmetalio lydymosi temperatūra  $t_{lyd.} \sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$  (solidusas  $t = 183\text{ }^{\circ}\text{C}$ , likvidusas  $t = 220\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), nors gryną Sn ir Pb lydymosi temperatūros gerokai didesnės ( $232\text{ }^{\circ}\text{C}$  ir  $327\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Tai būdinga visiems lydmetaliams ir tai mažina energijos sąnaudas lituojant.

Lituojamiesiems paviršiams ir lydmetaliams įkaitinti naudojami labai įvairūs kaitinimo šaltiniai: lituoklis, dujų liepsna, elektros lankas, plazmos srautas, krosnys, egzoterminė reakcija, panardinant į lydmetalį, šviesos spinduliai, lazerio spindulys, elektronų spindulys ir kt.

Atsižvelgiant į lydymosi temperatūrą, lydmetaliai paprastai skirstomi į žematemperatūrius ( $t_{lyd.} \leq 450^{\circ}\text{C}$ ) ir aukstatemperatūrius ( $t_{lyd.} > 450^{\circ}\text{C}$ ).

#### **2.4.5.1. Žematemperatūriai lydmetaliai**

Žematemperatūriai lydmetaliai gaminami iš labai lydžių metalų: Ga ( $t_{lyd.} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), In ( $156\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), Sn ( $232\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), Bi ( $271\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), Cd (kadmio,  $t_{lyd.} = 321\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), Pb ( $327\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), Zn ( $419\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

*Galio ir indžio* lydmetaliai naudojami Ti, Cu, Al, nerūdijančiam plienui lituoti. Norint padidinti susikristalizavusio tarp sluoksnio metalo lydymosi temperatūrą, galio lydmetalis (pasta) naudojamas kartu su užpildais – smulkiais Cu, Ag ar Ni milteliais. Lituojant Ga difunduoja į užpildo metalo vidų, sudarydamas bendrą tirpalą su daug didesne lydymosi temperatūra ( $t_{lyd.} = 850\text{--}1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Įkaitinti galio lydmetaliai ore intensyviai oksiduojasi, todėl lituojama techniniame vakuume. Ga lydmetaliais lituojamos aliarmo, signalizacijos sistemų, saugiklių detalės.

*Indžio* lydmetaliais kartu su Pb ar Ag dažnai lituojami auksiniai gaminiai, kartu su Pb ir Sn – elektronikos elementai. In-Sn (po 50 %, ) lydinys L-SnIn50 (pagal DIN) gerai vilgo stiklą, todėl juo lituojamas stiklas su metalu.

*Alavo ir švino* lydmetaliai būna su Ag, Sb (stibiu), Cu, Zn, Al, Bi (bismutu), Cd (kadmiu). Jais lituojami plienai, Ni, Cu ir jų lydiniai palyginti žemoje temperatūroje  $90\text{--}280\text{ }^{\circ}\text{C}$  (pvz., rusiško lydmetalio ПОСВ50, kuriame yra 50 % Bi, 25 % Sn ir 25 % Pb, lydymosi temperatūra – tik  $\sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Alavo lydmetaliai su Ag, Sb, Cu yra atsparesni korozijai. Jie tinka lituoti varinius ir žalvarinius elektrotechnikos, elektronikos gaminius, eksploatuojamus be apsaugos bet kokiomis klimato sąlygomis. Vien Sn-Pb lydmetaliais (pvz., L-Sn50Pb) sulituotų detalių sujungimai neatsparūs korozijai ir juos būtina apsaugoti dažais, laku. Lituojant geriamojo vandens vamzdynus (plieno, Cu ar jo lydinų), draudžiama naudoti švino turinčius lydmetalius (švinas yra nuodingas). Tam skirti specialūs Sn-Sb ar Sn-Cu lydmetaliai (pvz., rusiškas ПООС<sub>γ</sub>95-5 turi 95 % Sn ir 5 % Sb).

*Cinko* lydmetaliais dažniausiai lituojami aliuminio ir cinko (Zn) lydiniai (Al su Zn, Zn su Al, Zn su Cu ir jo lydiniais, Zn su plienu). Šie lydmetaliai gali būti legiruojami Al, Cu, Cd (kadmiu), Sn, Ag, Pb. Cinko lydmetalių vilgumą padidina Sn, Pb, Cd, o jį sumažina Al ir Cu (pvz., rusiškas lydmetalis ПЦАМ8М turi 8 % Al, 5 % Cu, 1,4 % Pb, 0,6 % Sn, o lydinio lydymosi temperatūra  $\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

#### 2.4.5.2. Aukštatemperatūriai lydmetaliai

Aukštatemperatūriais lydmetaliais vadinami lydmetaliai, kurių *lydymosi temperatūra yra 400–2000 °C*. Tai Zn, Cu, Si, Ni, Mn, Fe, Mo, Ge, Ag, Au, Cd (kadmio), In (indžio), Mo, Hf, Zr ir kitų elementų lydiniai, skirti Al, Ag, Au, Cu, Fe, Ni, Ti, Mn, Fe, Mo, Pd (paladžio), Pt (platinos), Co (kobalto), V (vanadžio) bei kitų metalų bei jų lydinų gaminiams lituoti, kurie gali būti naudojami aukštose temperatūrose. Tokiais lydmetaliais lituojami kaitrai atsparūs ir kaitroje patvarūs plienai, greitapjovio plieno ir kietlydinių pjovimo įrankiai (grąžtai, tekinimo peiliai, pjūklai) ir daugelis kitų gaminių. Daugelio lituotų gaminių (ypač pjovimo įrankiai) dažnai ne tik įkaista iki aukštų temperatūrų, bet ir turi atlaikyti gana dideles statines ir dinamines apkrovas. Lituotų sujungimų stipris siekia 200–700 MPa.

Lituoti aukštatemperatūriais lydmetaliais gerokai sunkiau, brangesnė ir sudėtingesnė litavimo įranga, gana dažnai naudojamos apsauginės dujos, vakuumas. Aukštatemperatūriai lydmetaliai skirstomi pagal pagrindinį juose esantį elementą. Tai aliuminio, vario, sidabro, nikelio, geležies, mangano, platinos, aukso, paladžio, magnio, titano, cirkonio, vanadžio, hafnio (Hf) lydmetaliai (Hf lydmetaliais lituojamos Ta (tantalo) konstrukcijos, kurių geros mechaninės savybės išsaugojamos jas eksploatuojant net 1 900–2 000 °C temperatūroje). Labiausiai paplitę *aliuminio, vario, sidabro, nikelio*, rečiau – *aukso lydmetaliai*.

*Aliuminio lydmetaliai* – tai Al-Zn-Si ir Al-Cu-Si lydiniai, skirti Al ir jo lydiniams lituoti. Gaunami sujungimai gana stiprūs, atsparūs korozijai, tačiau aukšta litavimo temperatūra. Pavyzdžiui, rusiškas lydmetalis AJI-2 atitinka europinį L-ALSi12 (pagal DIN), turi 12 % Si, 0,3 % Zn ir lydosi ~600 °C temperatūroje. Ši temperatūra sumažinama pridedant į lydmetalį vario.

*Vario lydmetaliai* naudojami angliniam ir daugeliui legiruotųjų plienų, nikeliui ir jo lydiniams lituoti. Lydmetalio lydymosi temperatūrai sumažinti varis legiruojamas cinku, alavu (nors Sn

penkis kartus brangesnis už nikelį), nikelio, fosforu. Pavyzdžiui, rusiškas lydmetalis ПМЦ54 (pagal GOST raidės „ПМЦ“ reiškia *припой медно-цинковый* „vario ir cinko lydmetalis“) atitinka europinį lydmetalį L-CuZn46 (pagal DIN), turintį 46 % Zn ir 54 % Cu (šių lydmetalių lydymosi temperatūros ~880 °C). Apskritai plienui, variui, bronzai, žalvariui lituoti naudojami žalvariai, turintys nuo 36 iki 68 % Cu (likusi dalis Zn), kurių lydymosi temperatūros nuo 800 iki 910 °C.

*Sidabro lydmetaliai* labai laidūs elektros srovei ir šilumai, jie plastiški ir stiprūs, atsparūs korozijai, turi gerą vilgumą, puikiai tinka kapiliariniam litavimui, tačiau yra brangūs. Variui, nikelui, titanui ir jų lydinams lituoti dažniausiai naudojami sidabro lydiniai su variu, alavu, fosforu, kadmiu, alavu. Pavyzdžiui, rusiškas lydmetalis ПСр-72 (pagal GOST raidės „ПСр“ reiškia *припой серебрянный* „sidabro lydmetalis“) atitinka europinį lydmetalį L-Ag72 (pagal DIN), turintį 72 % Ag ir 28 % Cu ( $t_{lyd.} = 780$  °C). Metalams ir mineralinei keramikai lituoti sidabro lydmetaliai legiruojami titanu, o sidabro paladžio lydmetaliai tinka nikelio lydinams, auksui, titanui, volframui lituoti.

Sidabro lydmetaliai naudojami vakuuminėje technikoje, elektrotechnikoje (pvz., sidabriniai relių kontaktai, siekiant padidinti elektrinį kontakto laidumą), elektronikoje, sidabravimui ir pan.

*Nikelio lydmetaliai* daugiausia naudojami nerūdijantiems ir karščiui atspariems plienams lituoti. Grynu nikelio kartais lituojamas molibdenas (Mo) ir volframas (W). Dauguma nikelio lydmetalių legiruojami chromu, kuris padidina cheminį ir mechaninį atsparumą kaitroje. Ni lydmetaliai papildomai legiruojami Si, P (fosforu), B (boru), Mn, C, In (indžiu), kurie mažina lydmetalio lydymosi temperatūrą ( $t_{lyd.} = 900\text{--}1\,160$  °C).

*Aukso lydmetaliai* – tai Au-Cu-Ag-Zn-Cd (kadmio) lydiniai, naudojami juvelyrinių gaminių gamyboje ir stomatologijoje.

## 2.5. Šalčiui atsparūs lydiniai

Metalinės konstrukcijos ir įrenginiai (geležinkelių bėgiai, tiltai, naftotiekiai, dujotiekiai, automobiliai, statybinės mašinos, mechanizmai), eksploatuojami šiaurės regionuose, yra veikiami šalčio, siekiančio net iki  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Specialios paskirties konstrukcijos, pavyzdžiui, lėktuvų, raketų, kosminių aparatų korpusai, dujų (deguonies, azoto, vandenilio, helio) skystinimo, saugojimo ir transformavimo įrenginiai yra veikiami  $80\text{--}270\text{ }^{\circ}\text{C}$  šalčio. Pavyzdžiui, kriogeninėje technikoje naudojamo skysto helio temperatūra yra  $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tokių konstrukcijų metalui ypač svarbu išsaugoti reikalaujamas geras mechanines savybes žemoje temperatūroje.

Žemėjant temperatūrai, daugelio lydinių stiprumo riba didėja, tačiau mažėja jų plastiškumas ir smūginis tūsumas. Metalų savybė žemoje temperatūroje išsaugoti plastiškumą ir smūginį tūsumą vadinama *atsparumu šalčiui*. Svarbiausias metalų atsparumo šalčiui kriterijus yra kritinė trapumo temperatūra – jai mažėjant metalo atsparumas šalčiui didėja. Dar būtina atsižvelgti į kitas metalo savybes: mechanines (stiprį  $R_m$ , takumo ribą  $R_{p0.2}$ ), fizikines (šiluminį plėtimąsi, šilumos laidumą), technologines (plastiškumą, suvirinamumą) ir kt.

Eksploatuojant šaltyje dažniausiai naudojami mažaangliai plienai, nes, didėjant anglies kiekiui pliene, kyla jo kritinė trapumo temperatūra (t. y. padidėja trapumas), blogėja suvirinamumas (jeigu  $C > 0,3\text{ }\%$  – blogas suvirinamumas). Efektyviausios priemonės *plieno kritinei trapumo temperatūrai žeminti* yra *anglies kiekio mažinimas, struktūros grūdelių smulkinimas, kokybės gerinimas* (kenksmingųjų priemaišų P, S mažinimas arba jų neutralizavimas, pridedant V, Ti, Nb ir retųjų žemių elementų) ir *terminis gerinimas* (terminis apdorojimas).

Paprastųjų anglinių ramaus stingimo plienų patikimos eksploatacijos temperatūra yra iki  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , verdančiojo stingimo plienų – nuo 0 iki minus  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Metalurginėmis priemonėmis – plieno

kokybės gerinimu, struktūros grūdelių smulkinimu, mikrolegiravimu – eksploatuojamų šiaurėje plienų patikimumo temperatūra gaunama minus 50–60 °C (šiaurės plienai).

Didelėms suvirintosioms konstrukcijoms gaminti naudojami mažaangliai, mažai legiruoti plienai (09MnSi8, 14MnNV8) (jų žymėjimas – pagal Lietuvoje įteisintus Europos Sąjungos standartus LST EN 10027 ir LST 1585 (CR 10260)). Tokių mažaanglių, mažai legiruočių plienų darbinė temperatūra – iki minus 60 °C. Geras mechaninės savybės (iki minus 196 °C) išsaugo mažaangliai plienai, kompleksiskai legiruoti Cr ir Ni (12CrNi3, 18NiCrMo16-2). Iki minus 50 °C naudojami ir termiškai gerinami spyruokliniai vidutinio anglingumo plienai (C45, 40Cr4, 65Mn4, 60Si7), ypač kai būtinas didesnis stiprumas.

*Esant pliene 6–9 % Ni ir labai mažai C ( $C < 0,05$  %), jo kritinė trapumo temperatūra sumažėja iki minus 150–196 °C. Termiškai apdoroti (grūdinti, normalizuoti ir atleisti 600 °C) šie plienai yra tšūs, plastiški, gerai suvirinami, laidūs šilumai, turi mažą temperatūrinį plėtimosi koeficientą. Palyginti su gausiai legiruotais plienais, jie yra stipresni, tačiau mažiau atsparūs korozijai.*

*Specialiosios paskirties martensitiniai plienai (X03CrCoNiMoTi9-14-6-3 ir kt.) turi žemą kritinę trapumo temperatūrą (iki minus 196–253 °C), tačiau yra labai brangūs. Jie naudojami labai svarbioms konstrukcijoms, kai būtina išsaugoti didelį jų stiprumą.*

Labai žemose temperatūrose (iki minus 269 °C) naudojami austenitiniai chromonikeliniai plienai, legiruoti 18–25 % Cr ir 8–12 % Ni (X08CrNi18-8, X12CrNiTi18-10). Jie žemoje temperatūroje yra tšūs ir kartu atsparūs korozijai. Plienuose, kurių darbinė temperatūra ne žemesnė kaip minus 196 °C, dalis brangaus nikelio keičiama manganu. Pavyzdžiui, pliene X07CrMnNi21-7-5 yra 21 % Cr, 7 % Mn ir tik 5 % Ni.

*Aluminis ir jo lydiniai kritinio trapumo temperatūros neturi. Jie išlieka tšūs iki minus 253–269 °C. Mažėjant temperatūrai, jų stiprumas padidėja 35–60 %, takumo riba – 15–25 %, o smūginis*

tąsumas (dinaminė apkrova) tolygiai mažėja. Šių lydinų trūkumas – didelis temperatūrinio plėtimosi koeficientas. Dėl to konstrukcijose tenka daryti terminų deformacijų kompensatorius. Suvirintosioms konstrukcijoms gaminti daugiausia naudojami deformuojamieji termiškai nestiprinami lydiniai, nesuvirintoms konstrukcijoms – deformuojamieji termiškai stiprinami (D16, AK6, AK8; Rusija, GOST standartas) ir liejamieji (AJ12, AJ19 pagal GOST 1521 arba AK12 pagal GOST 1583) lydiniai.

*Titanas ir jo lydiniai* tampa trapiais minus 196–269 °C temperatūroje. Dažniau naudojami techninis titanas ir specialūs titano lydiniai (BT-1, OT4, Rusija, GOST). Šie lydiniai lengvai virinami, suvirintų sujungimų nereikia apdoroti termiškai, o darbinė lydinų temperatūra yra iki minus 196 °C.

*Varis ir jo lydiniai*, kaip ir Al, neturi kritinės trapumo temperatūros. Mažėjant temperatūrai, jie tampa tasesni, darbinė jų temperatūra yra iki minus 269 °C, tačiau, palyginti su aliuminio lydiniais, jie yra daug brangesni, todėl rečiau naudojami.

## **2.6. Kaitrai atsparūs ir kaitroje patvarūs lydiniai**

*Atsparumas kaitrai* – tai medžiagos savybė nesilydyti, neiirti, nesideformuoti, nesioksiduoti aukštoje temperatūroje. *Kaitrai atsparūs plienai* – tai plienai, atsparūs cheminei korozijai (pasipriešinimas oksidacijai) aukštose temperatūrose. Plienų atsparumas kaitrai didinamas juos legiruojant chromu, aliuminiu, siliciu, t. y. elementais, kurie plieno paviršiuje sudaro tankias, kaitrai atsparias oksidų plėveles, ir giliau metalas nesioksiduoja. Atsparumas kaitrai nusakomas temperatūra, kurioje ta plėvelė išsilaiko, t. y. nevyksta tolesnė oksidacija. Pavyzdžiui, jeigu pliene yra 5–8 % Cr, tolesnė jo oksidacija nevyksta iki 700–750 °C, esant 15–17 % Cr – iki 950–1 000 °C. 25 % Plieno, turinčio 25 % Cr, oksidacija nevyksta iki 1 100 °C, o jeigu jis dar legiruotas ir 5 % Al, tai jo atsparumas kaitrai siekia 1 300 °C. Apskritai plieno atsparumas kaitrai daugiausia priklauso nuo jo cheminės sudėties ir visai nedaug

– nuo struktūros. Todėl, esant pliene tokiam pačiam chromo kiekiui, austenitinės ir feritinės struktūrų plienų atsparumas kaitrai praktiškai yra vienodas. Kaitrai atsparūs plienai naudojami neapkrautoms arba lengvai apkrautoms detalėms bei konstrukcijoms, eksploatuojamoms aukštoje temperatūroje (mašinų detalės, krosnys, katilai, židinių kapsulės ir kt.).

*Kaitroje patvarūs lydiniai* privalo būti atsparūs cheminei ir mechaninei korozijai: aukštose temperatūrose išlaikyti mechanines apkrovas – neirti, nesideformuoti, pasižymėti geromis mechaninėmis savybėmis.

Eksploatuojant gaminius iki 600 °C naudojami mažai anglingi nedaug legiruoti perlitinės klasės plienai su karbidus sudarančiais elementais. Pavyzdžiui, mažai anglingas plienas 12CrMoV5-3-2, kuriame yra 0,12 % C, 5 % Cr, 3 % Mo, 2 % V (pagal standartus LST EN 10027 ir LST 1585) termiškai apdorojamas (normalizavimas ir aukštasis atleidimas), norint gauti didžiausią ilgalaikį stiprumą aukštoje temperatūroje. Iš tokių plienų gaminami garo kaitintuvai, garotiekiai, įvairūs energetiniai įrenginiai, konstrukcijos. Anglingesnių (0,2–0,3 % C) plienų didžiausia eksploatavimo temperatūra paprastai yra iki 550 °C. Jie naudojami garo turbinų velenams, spyruoklėms, tvirtinimo detalėms gaminti.

Eksploatuojant įrenginius 450–600 °C temperatūroje naudojami ir gausiai legiruoti martensitinės klasės plienai. Jų atsparumas kaitrai nedaug didesnis už perlitinių plienų, tačiau jie atsparesni oksidacijai, ypač vandens garuose ir kūryklų dujose. Tai gali būti mažai anglingi (0,1–0,15 % C) plienai, legiruoti 10–12 % Cr ir nedideliais Mo, V, Nb, W, Ni kiekiais (pvz., X11CrNiWMoV11-2-2, X15CrMoV11) arba labai anglingi plienai, turintys ~0,4 % C, legiruoti 5–10 % Cr ir 2–3 % Si, kurie dažnai vadinami *silchromais* (X40CrSi9-2, X40CrSiMo10-2). Martensitiniai plienai daug giliau grūdinasi, todėl dažnai naudojami didesnio skerspjūvio detalėms gaminti. Jie daugiausia naudojami automobilių bei traktorių vidaus degimo variklių išmetimo vožtuvams gaminti.

Eksplatuojant gaminius 600–750 °C temperatūroje naudojami austenitinės klasės plienai. Kad padidėtų jų atsparumas kaitrai, tokie plienai gausiai legiruojami Cr, Ni, Mn, Mo, V, W ir kitais elementais, kurie sustiprina tarpatominius ryšius geležies kristalinėse gardelėse ir padidina rekristalizacijos temperatūras.

*Didžiausią atsparumą kaitrai* austenitiniams plienams suteikia stambiagrūdė struktūra, sustiprinta smulkiais karbidų intarpais TiC, VC, ZrC, NbC, MC (pvz., plienas X40CrNiWMo14-14-2) arba metalų junginių Ni<sub>3</sub>Ti, Ni<sub>3</sub>Al, Ni<sub>3</sub>Nb intarpais (pvz., plienas X12CrNiTi18-10), kurie išlieka stiprūs dar aukštesnėje temperatūroje negu karbidais sustiprinti plienai. Karbidais ir metalų junginiais sustiprintų austenitinių plienų gaminiai (terminškai apdoroti) gali būti eksploatuojami ir 1 000 °C, o jeigu yra pakankamai W, Mo, – ir didesnėje kaip 1 500 °C temperatūroje.

*Nemetalinių medžiagų atsparumas kaitrai* paprastai nusakomas jų lydymosi, minkštėjimo, irimo temperatūra. *Kvarco* turinčios uolienos sutrūkinėja > 573 °C temperatūroje (šioje temperatūroje pasikeičia kvarco kristalinė struktūra ir staigiai padidėja jo tūris). *Gipso* struktūra ima keistis > 60 °C temperatūroje (atskyla vanduo). *Asbesto* stiprumas ima mažėti > 368 °C temperatūroje, betono > 1 000 °C temperatūroje. *Polimerinių medžiagų* atsparumas kaitrai ima mažėti 250–300 °C temperatūroje: prasideda polimerų molekulių suardymas, blogėja jų fizikinės ir mechaninės savybės.

## **2.7. Dilimui atsparios medžiagos**

Besitrinančios detalės (pvz., guoliai, kreipiamosios, slankiosios įvorės, įdėklai), veikiant įvairioms apkrovoms, susidėvi dėl trinties paviršių ištrupėjimo (dėl metalo nuovargio). Metalų atsparumas paviršiaus ištrupėjimui vadinamas *kontaktiniu patvarumu*. Detalių kontaktinis patvarumas didinamas, *didinant jų paviršiaus kietumą*, t. y. didinant paviršiaus pasipriešinimą deformacijai *taikant deformacinį sukietinimą, grūdinimą* ar kitas technologijas.

Besitrinančių detalių paviršiuose atsiranda duobučių, kurios mažina detalių patvarumą. Taip dėvėsi velenų paviršiai krumpliaračių ir riedėjimo guolių tvirtinimo vietose, lankstinių jungčių, lingių lakštų paviršiai. Pagrindiniai būdai tokiam dėvėjimuisi mažinti yra detalių paviršiaus kietumo didinimas bei tepimas.

*Atsparumą dilimui lemia naudojamų medžiagų fizikinės ir mechaninės savybės, išorinių jėgų poveikių pobūdis ir intensyvumas, eksploataavimo sąlygos (klimato ir kt.).*

### 2.7.1. Antifrikcinės medžiagos

Šių medžiagų pavadinimas kilęs nuo lotyniško žodžio *frictio* „trintis“, t. y. medžiagos, kurios mažina trintį. Iš tiesų antifrikcinės medžiagos turi mažą trinties koeficientą: kai trinties pora tepama, jis yra 0,004–0,1, kai netepama – 0,12–0,2, kad būtų minimalus detalių dilimas ir maži energijos nuostoliai. Tokios medžiagos *turi būti atsparios adhezijai*, t. y. susiliečiančių detalių paviršiai neturi sukibti dėl kūnų dalelių sąveikos. Tai gali įvykti dėl molekulių sąveikos jėgų, atsirandančių besiliečiančių kūnų molekulėms suartėjus per kelių angstromų atstumą ( $1\text{\AA} = 10^{-10}\text{ m} = 0,1\text{ nm}$ ).

Antifrikcinės medžiagos turi būti *ne per kietos* (kad mažiau dildytų pagrindines detales ir greičiau prisiderintų trinties pora), *gerai susitepančios, atsparios dilimui ir korozijai, laidžios šilumai*, kad neperkaistų. Šios medžiagos tepamos tepalu, vilgomos vandeniu, barstomos grafitu arba trinties poroje sudaroma oro pagalvė.

Antifrikcinėmis medžiagomis būna *metališkieji lydiniai*: Sn, Cu, Pb, Zn, Al lydiniai, kai kurie ketūs, grafitizuotasis ir daugiau Cu turintis plienas, *nemetalinės medžiagos*: plastikai, guma, mediena, grafitas ir C dariniai, *mišriosios medžiagos* (pvz., koryta kieta bronzos su polimeriniu teflono užpildu) ir *mineralinės medžiagos*: agatai, rubinai, korundai, safyrai, paprastas ir kvarcinis stiklas.

Nuo 1839 m. slydimo guoliams gaminti naudojami antifrikciniai lydiniai – *alaviniai ir švininiai babitai* (pavadinimas kilęs nuo

amerikiečių išradėjo I. Babbitt pavardės). Jie sudaryti iš *minkštojo pagrindo* (Sn ar Pb) ir *kietųjų intarpų*: Cu, Ca, Sb (stibio), Cd (kadmio) metalinių junginių. Iš babbittų gaminami alyva tepami guoliai; jie įliejami į plienines detales, kad sudarytų antifrikcinį sluoksnį. Babbittai liejami  $\leq 1$  mm storio sluoksniu ant plieno juostos, tuomet daromi guolių įdėklai. Babbittai lengvai lydosi, yra plastiški, gerai vilgomi tepalu, apsaugo veleno paviršių, nes padengia jį minkšto metalo plėvele, greitai prisitrina. Jie pasižymi puikiomis antifrikcinėmis savybėmis, tačiau yra neatsparūs nuovargiui (nuovargis – tai gaminio, veikiamo ciklinių apkrovų, suirimas, kai įtempiai yra mažesni už stiprumo ar net plastiškumo ribą). Dėl to monolitiniai guoliai (įdėklai) iš babbittų negaminami. Plonu (iki 1 mm) sluoksniu padengiamas tik darbinis guolių, pagamintų iš plieno, ketaus arba bronzos, paviršius.

Guoliai turi būti gerai tepami, kad neįkaistų, nesukibtų (dėl adhezijos) ir nesusivirintų. Babbittams leidžiama įkaisti iki 70–100 °C. Kietąsias šių lydinų daleles sudaro Cu-Sn, Sn-Sb, Cu-Sb cheminiai junginiai. Geriausiomis antifrikcinėmis savybėmis pasižymi alaviniai babbittai. Pavyzdžiui, rusiškas alavinis babbittas (*оловянистый баббит*) Б88 (pagal GOST), turintis 88 % Sn, 8 % Sb, 3 % Cu, beveik atitinka europinį lydinį SnSb8Cu4 (pagal DIN), turintį 88 % Sn, 8 % Sb ir 4 % Cu. Tačiau alaviniai babbittai yra gana brangūs (kadangi Sn ~4–16 kartų brangesnis už Pb!) ir jie naudojami svarbiose mašinose tik sunkiai apkrautiems, labai svarbiems guoliams gaminti (dizelinių variklių, alkūninių velenų įdėklai, turbinų, galingų elektros variklių velenų įdėklai ir pan.). Mažiau apkrautiems guoliams, tarp jų ir automobilių, traktorių variklių įdėklams, naudojami pigesni švininiai babbittai, pvz., lydinys PbSb15Sn10 (15 % Sb, 10 % Sn, likęs ~75 % Pb).

Geromis antifrikcinėmis savybėmis pasižymi *žalvariai bei bronzos*, kurie yra daug atsparesni nuovargiui nei babbittai. Minkštas šių lydinų pagrindas palankus greitam trinties poros detalių prisitrynimui. Joms prisitrynus, guolio paviršiuje susidaręs mikroreljefas palankus trinties paviršių tepimui bei aušinimui.

Kietieji intarpai, į kuriuos remiasi velenas, mažina trinties koeficientą ir didina atsparumą dilimui. Tai daugiausia vario lydiniai su alavu (naudojami slydimo guoliams, įvorėms) ir švinu (naudojami guolių įdėklams). Iš jų gaminami monolitiniai įdėklai, eksploatuojami veikiant dideliui slėgiui. Žalvariai, legiruoti Si, Mn, Pb, naudojami kaip bronzos pakaitalas nesunkiai apkrautiems slydimo guoliams gaminti.

Kalcinių babitų pagrindą sudaro švinas (iki 98 %) ir jie naudojami daugiausia geležinkelyje. Pavyzdžiui, rusiškas БКА (GOST) turi 1 % Ca, 0,8 % Na, 0,1 % Al, 0,2 % Mg, likęs – Pb.

*Antifrikciniai cinko lydiniai* sudaryti iš Zn (iki 92 %), Al (9–12 %), Cu (1–6%), Mg (iki 0,06 %) ir kitų legiravimo elementų (iki 0,4 %): Pb, Fe, Si. Šių lydinių plastiškumas yra mažesnis negu alavinių babitų, be to, jie turi didesnę trinties koeficientą ir yra gerokai pigesni. Pavyzdžiui, rusiškas cinko lydinys ЦАМ10-5Л (raidė „Ц“ – цинк „cinkas“ reiškia cinko lydinį, „А“ – Al, „М“ – медь – Cu, „Л“ – литейный „liejamasis“), turintis 10 % Al, 5 % Cu, likęs – Zn (GOST 214370), naudojamas guoliams, lietoms įvorėms, įdėklams ir pan. gaminti.

Geromis antifrikcinėmis savybėmis pasižymi *lydiniai su kietuoju pagrindu ir minkštaisiais tarpais*, kuriems priklauso *švininė bronzos, aliuminio-alavo lydiniai ir ketus*.

*Švininėje bronzoje* esantis švinas netirpsta varyje ir lydinyje kristalizuojasi minkštųjų tarpų pavidalu. Tokia bronzos tiesiog užlydoma ant plieninio pagrindo (jei Pb daugiau kaip 20 %, liejamas iki 1 mm storio sluoksniu). *Aluminio-alavo* lydinuose kristalizuojasi alavo kristalai. Šie metalai plona plėvele padengia veleno paviršių ir apsaugo jį nuo pažeidimo. Pvz., Rusijoje pagaminto aliuminio-alavo slydimo guolių lydinyje AO9-2 (GOST) (pagal DIN – AlSn9Cu2) yra 9 % Sn, 2 % Cu, ~1 % Ni, likęs – Al. Aluminio antifrikciniai lydiniai aukštoje temperatūroje yra stipresni už babilus, jie laidesni šilumai, pigesni, bet blogiau prisiderina ir labiau dildo poros detales. Todėl detalės iš jų kartais dengiamos plonu babito sluoksniu.

Vis labiau plinta ypač geromis antifrikcinėmis savybėmis pasižymintys aliuminio lydiniai su 20 % alavo. Iš tokių lydinų liejami monolitiniai įdėklai, įvorės. Bronziniai ir Pb-Sn lydiniai naudojami sunkiai apkrautiems (esant dideliems slėgiams ir slydimo greičiui) įdėklams gaminti. Sutrikus tepimui slydimo poroje, šios medžiagos kurį laiką dar gali dirbti, nes nuo trinties šilumos išsilydęs alavas ar švinas plonu sluoksniu padengia veleno kakliuko paviršių ir sumažina trintį.

*Ketuje minkštųjų intarpų funkciją atlieka grafitas.* Grafito plokštelės įsitrina į veleno paviršių ir veikia kaip sausas tepalas. Ketaus lydiniai tinka guoliams, kurie dirba veikiami didelių slėgių esant nedideliu slydimo greičiui. Guoliams gaminti naudojami paprastieji pilkieji EN-GJL-150, EN-GJL-200 (pagal LST EN 1560:2002), legiruoti pilkieji, atsparieji, kalieji antifrikciniai ketūs. Ketaus markė guoliui parenkama taip, kad jis būtų minkštesnis už veleną. Tokie guoliai pigūs, tačiau blogai įsidirba ir yra neatsparūs smūgiams.

Antifrikcinės savybės būdingos ir *nemetališkosioms medžiagoms* – polimerams: poliamidams (kapronui, anidui) ir fluoroplastams. Jie turi mažą trinties koeficientą, yra labai atsparūs dėvėjimuisi, tačiau blogai praleidžia šilumą. Todėl polimerai naudojami veikiant nedidelėms apkrovoms ir mažiems slydimo greičiams. Iš plastikų (ypač su medienos, kaprono užpildu) gaminami vandeniui (alyvai) tepami guoliai, antifrikciniai sluoksniai, smulkios antifrikcinės detalės (dažniausiai įvorės). Iš termoreaktyviojo plastiko – tekstolito gaminami guoliai naudojami esant sunkiems darbo režimams, gerai tepasi vandeniui (kuris gerai juos aušina).

*Mišriosios antifrikcinės medžiagos* gaminamos miltelinės metalurgijos būdu sujungiant skirtingas medžiagas. Tai Fe-grafitas, Fe-Cu-grafitas, bronz-grafitas ir t. t. Jos yra labai atsparios sausajai trinčiai, todėl iš jų daromi sausosios trinties guoliai: esant temperatūrai žemesnei nei 480 °C ir nedideliu slėgiu, naudojamas grafitas, supresuotas su naftos koku ir akmens anglies degutu; kai

sąlygos blogesnės, naudojama metalokeramika (kermetas) – su grafitu sukepinta bronzė arba geležis (tokie guoliai įmirkomi tepalu).

Geromis antifrikinėmis savybėmis pasižymi *mineralinės medžiagos*: natūralūs agatai, dirbtiniai rubinai, korundai, safyrai. Jų pakaitalai – sitalai (stiklo keramika) naudojami labai mažiems slydimo guoliams – akmeninėms atramoms (laikrodžiuose, hiroskopuose, kituose preciziniuose įrankiuose). Tokios medžiagos turi labai mažą, trinties koeficientą ir didelį atsparumą kontaktiniam dėvėjimuisi.

### **2.7.2. Kontaktiniam dėvėjimuisi atsparios medžiagos**

Besitrinančių detalių paviršiaus *ištrupėjimą sukelia* palyginti nedideli *kontaktiniai gniuždymo įtempiai*, kurie yra mažesni už veikiamos medžiagos stiprumo ar net plastiškumo ribą. Tačiau, *veikiant ilgalaikėms ciklinėms apkrovoms*, pasireiškia *metalo nuovargis*, ir detalių paviršiai po truputį yra. Ypač tai būdinga krumpliaračiams bei riedėjimo guolių detalėms.

Medžiagų *kontaktinį patvarumą* galima *pagerinti didinant jų paviršių kietumą* (taikant *deformacinį sukietinimą, grūdinimą ar termomechaninį apdorojimą*). Plieno užgrūdinamumui padidinti jis legiruojamas Cr (0,4–2 %), Mn (iki 1,7 %) ir Si (iki 0,9 %). *Grūdinant* plienus vandenyje, paprastai jie negiliai užgrūdinami (nuo paviršiaus 2–3 mm). Detalių grūdinimas dažnai atliekamas įkaitinant jas *aukštojo dažnio srovėmis* (ADS). Toks grūdinimas dažniausiai taikomas guoliams, kuriuos eksploatavimo metu veikia dinaminės apkrovos (pvz., geležinkelio transporte). Kai būtinas ištisinis medžiagų užgrūdinimas, detalės grūdinamos alyvoje ir atleidžiamos 150–170 °C temperatūroje. Precizinių guolių detalės po grūdinimo dar apdorojamos šalčiu (minus 80–70° C). Po tokio apdorojimo plienai turi martensitinę karbidinę struktūrą, o jų kietumas siekia 60–64 HRC.

Didelės, specialios paskirties riedėjimo guolių detalės gaminamos iš cementuojamųjų plienų (pvz., 12NiCr12-30), kurie

*cementuojami 3–6 mm gyliu. Agresyvioiose aplinkose naudojami guoliai gaminami iš nerūdijančiojo plieno, pavyzdžiui, X95CrNi18-3 (0,95 % C, 18 % Cr, 0,6 % Ni).*

Krumpliaračių krumpliai turi turėti pakankamą kontaktinį patvarumą, jie privalo būti atsparūs cikliniam lenkimui ir abrazyviniam dilimui, priešintis adhezijai. Šie reikalavimai įvykdomi, kai krumplių paviršius yra labai kietas, o šerdis tąsi ir pakankamai stipri. Toks krumpliaračių savybių derinys gaunamas gaminant juos iš mažo arba vidutinio anglingumo plienų, o *krumplių paviršių suketinant cementavimu, nitrocementavimu ar paviršiniu grūdinimu ADS.*

Paprastai krumplių cementavimas atliekamas iki 2 mm gylio. Po grūdinimo ir žemojo atleidimo krumplių paviršių kietumas padidinamas iki 58–63 HRC. Didesnio kietumo nereikia, nes cementuotas sluoksnis bus pernelyg trapus. Labai svarbiose konstrukcijose cementuojami krumpliaračiai gaminami iš gausiai legiruotų plienų (pvz., 12NiCr16-8). Cementuojami bei po cementavimo apdorojami termiškai krumpliaračiai deformuojasi, jų krumplius būtina šlifuoti, ir tai apsunkina krumpliaračių gamybos technologiją.

*Automobilių ir traktorių krumpliaračių plienas (pvz., 18CrMnTi5-4) dažniausiai nitrocementuojamas žemesnėje temperatūroje nei cementavimo, todėl jų krumpliaračiai mažiau deformuojasi ir prisitrina nešlifuoti.*

*Vidutinio anglingumo plieno (C45, 40Cr4) krumpliaračiai kontaktiniu patvarumu nusileidžia cementuotiems, tačiau jų gamybos technologija paprastesnė ir pigesnė. Iš tokių plienų gaminami lengviau apkrauti krumpliaračiai, kurie paprastai išpjaunami iš jau normalizuoto ar termiškai pagerinto plieno, yra grūdinami (įkaitinant ADS), o jų šerdis neužsigrūdina ir lieka tąsi.*

### 2.7.3. Dilimui atsparios medžiagos, veikiamos dinaminių apkrovų

Tokios darbo sąlygos būdingos įvairių mašinų vikšrams, ekskavatorių kaušų dantims, geležinkelio bėgių kreipiamosioms. *Atsparios smūgiams* detalės gaminamos iš *labai anglingo* (~1,1 % C) *manganinio* (~13 % Mn) plieno, kuris yra gana tāsus, sunkiai apdorojamas pjovimu (kadangi metalas veliasi), todėl detalės gaminamos liejimo būdu ir grūdinamos (įkaitinamos iki 1 100 °C temperatūros ir aušinamos vandenyje). Taip pagamintos detalės yra gana minkštos (~200 HB), tāsios, neatsparios dilimui. Tačiau eksploatacijos metu veikiant dinaminėms apkrovoms (smūgiams) vyksta *šalta plastinė metalo deformacija*, kuri sukelia *deformacinį plieno sukietinimą* (kietumas savaime padidėja iki 600 HB !), ir detalės tampa atsparios abrazyviniam dilimui.

### 2.7.4. Abrazyviniam dilimui atsparios medžiagos

Metallų *atsparumas abrazyviniam dilimui* paprastai tiesiogiai *proporcingas medžiagų kietumui*, tačiau kai kuriems lydiniams ši priklausomybė ne visada teisinga.

*Abrazyvinis dilimas* – tai *daugkartinis dylančiojo paviršiaus deformavimas ir jo mikropjovimas abrazyvo dalelėmis*. Šių procesų intensyvumas priklauso nuo spaudimo bei besitrinančių medžiagų paviršių kietumo. Atspariausi dilimui yra lydiniai su ypač kietų dalelių intarpais.

Nedidelio dilimo sąlygomis eksploatuojamos detalės (alkūniniai velenai, skirstymo velenėliai, cilindrinės įvorės, stūmoklių žiedai ir t. t.) gaminamos iš mažo ir vidutinio anglingumo plieno bei ketaus. Plienų paviršiai paprastai sukietinami terminiu ar termocheminiu apdorojimu. Geriausiai dilimui priešinasi *sukietinti sluoksniai, grūdinti aukštojo dažnio srovėmis* (ADS), po jų eina cementuoti, nitrocementuoti, azotinti sluoksniai.

Sunkiai apkrautos detalės, eksploatuojamos didesnio dilimo sąlygomis, gaminamos iš lietu, daug karbidų turinčių lydinų. Dažnai ekonominiais sumetimais tokiais kietais lydiniais aplydomi (apvirinami) paprasto plieno paviršiai (gaunamas *dvisluoksnis plienas*). Karbidiniuose lydinuose yra iki 4 % C ir daug karbidus sudarančių elementų (Ti, Cr, W). Lydinio struktūra keičiama pridėdant skirtingą Mn ar Ni kiekį. Kartais dylančioms detalėms gaminti naudojami *metalokeraminiai kietlydiniai* (WC, TiC, TaC karbidai kartu su kobalto milteliais).

#### 2.7.5. Kietlydiniai

Pagrindinė visų kietlydinių medžiaga yra *labai kieti volframo, molibdeno, chromo, titano, tantalio, mangano* ir kitų metalų *karbidai*. Kietlydiniai skirstomi į *liejamuosius* (pvz., sormaitai – Fe-Cr lydiniai, naudojami greitai dylančioms detalėms apvirinti), *miltelinius* (pvz., lydinys sudarytas iš 86 % W, ~10 % C, 2,5 % Fe, 0,5 % Si), *metalokeraminius*; *mineralokeraminius* (presuoti ir sukepinti mineralų milteliai, kuriuose yra oksidų, karbidų, nitridų, o rišamoji medžiaga – stiklas (~1 %)).

Plačiai naudojami *metalokeraminiai lydiniai*, kurie gaunami *miltelinės technologijos būdu* presuojant ir sukepinant W, Ti, Ta karbidų miltelius. Karbidų milteliai maišomi su kobalto milteliais (Co – rišamoji medžiaga), šis mišinys presuojamas (100–400 MPa slėgiu) ir sukepinamas ~1 500 °C temperatūroje. Kobaltui lydantis ( $\text{Co } t_{\text{lyd.}} = 1\,493\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), ištirpsta dalis karbidų – taip gaunamas monolitinis lydinys, kuriame yra 80–95 % karbidų. Didėjant kobalto kiekiui, mažėja metalokeraminio lydinio kietumas, tačiau didėja jo stiprumas bei tūsumas ( $R_m = 70\text{--}80\text{ HRC}$ ). Šių lydinų šiluminis atsparumas siekia 800–1 000 °C. Metalokeraminiai lydiniai gaminami plokštelių pavidalu, kurios tvirtinamos (dažniausiai lituojant aukštatemperatūriais lydmetaliais) prie peilių, grąžtų, frezų ir kitų pjovimo įrankių pagrindo. *Volframiniai kietlydiniai* (WC-Co)

naudojami trapiems metalams pjauti (ketui, kai kuriems spalvotiesiems lydiniams, nemetalinėms medžiagoms).

*Titaniniai-volframiniai* kietlydiniai (TiC-WC-Co) daugiausia naudojami plienui pjauti. *Titaniniai-tantaliniai-volframiniai* kietlydiniai (TiC-TaC-WC-Co) yra stipriausi ir naudojami įrankiams, kurie bus naudojami ypač sunkiomis pjovimo sąlygomis, gaminti.

## 2.7.6. Nemetalinės pjovimo įrankių medžiagos

Iš nemetalinių medžiagų geriausiomis pjovimo savybėmis pasižymi *deimantas*. Jo kietumas pagal Vikersą (~100 000 HV) yra 6 kartus didesnis už volframo karbidą ir apie 8 kartus didesnis nei greitapjovio plieno. Natūralūs monokristaliniai deimantai labai brangūs, todėl įrankių pjovimo briaunos dažniau daromos iš sintetinių polikristalinių deimantų. Deimantų šiluminis atsparumas yra nedidelis (~800 °C). Didesnėje temperatūroje deimantas grafitizuojasi, bet pjovimo briauną nuo įkaitinimo saugo pakankamas jo šiluminis laidumas. Deimantiniai įrankiai naudojami švariajam (preciziniam) paviršiaus apdorojimui, pjaunant labai dideliais greičiais. Tokiais įrankiais neverta apdoroti ketaus bei plieno, nes tuomet deimantas greitai dyla. Tai vyksta dėl deimanto ir geležies paviršių dalelių tarpusavio sąveikos ir jų sukibimo (dėl didelės adhezijos). *Deimantiniais įrankiais* (diskais, peiliais, deimantais šlifavimo diskams lyginti) *šlifuojami ir galandami kietlydinių įrankiai*, apdailinami spalvotieji metalai ir jų lydiniai, plastikai ir keraminės medžiagos – taip gaunamas *didžiausias tikslumas ir glotnumas* ( $R_a = 0,04\text{--}0,02\text{ }\mu\text{m}$ ).

Deimantinius įrankius gali pakeisti pjovimo įrankiai, kurių briaunos gaminamos iš polikristalinių *boro nitridų*. Tokie kietlydiniai gaunami aukštoje temperatūroje sukepinant boro nitrido miltelius ir veikiant juos dideliu slėgiu. Sukepintųjų miltelių kristalinė gardelė kubinė, todėl Rusijoje šie lydiniai sutrumpintai žymimi KHB (*кубический нитрид бора* „kubinis boro nitridas“). Tokio lydinio kietumas (~30 000 HV) artėja prie deimanto kietumo,

tačiau boro nitridas *atsparesnis šilumai* (iki  $\sim 1\,200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ir tinka sunkiai pjaunamiems plienams (grūdintiesiems, cementuojamiesiems, azotintams ir kt.) apdirbti.

## 2.8. Specifinių fizikinių savybių lydiniai

Iš specifinėmis fizikinėmis savybėmis pasižyminčių lydinų technikoje dažniausiai naudojami magnetiniai, elektrovaržiniai ir specialiosiomis šiluminėmis bei tamprumo savybėmis pasižymintys lydiniai.

### 2.8.1. Magnetiniai lydiniai

Magnetiniai lydiniai skirstomi į *magnetiškai kietus ir magnetiškai minkštus*. *Magnetiškai kieti* lydiniai paprastai skirti *nuolatiniams magnetams* gaminti. Būtinai reikavimai, keliami šiems lydinams, yra didelė liekamoji indukcija ir pakankama koercinė jėga. Mažo galingumo nuolatiniams magnetams gaminti tinka angliniai plienai (pvz., C110, C120), jie dar grūdinami ir atleidžiami  $100\text{--}150\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatūroje, kad padidėtų koercinė jėga. Tokius plienus naudoti dideliems magnetams gaminti praktiškai neįmanoma dėl negilaus plieno užgrūdinimo. Todėl didesniems magnetams gaminti naudojami labai anglingi plienai ( $\sim 1\text{ }\%$  C), jiems skirti plienai dar legiruojami chromu, volframu, kobaltu, chromu, kobaltu, molibdenu. Šie elementai pagerina plienų grūdimąsi bei koercinę jėgą.

Daug geresnėmis magnetinėmis savybėmis pasižymi Fe-Al-Ni (alnio) ir Fe-Al-Ni-Co (alniko) lydiniai. Juose yra 12–34 % Ni, 6,5–15 % Al, 14–40 % Co. Tokie lydiniai paprastai dar legiruojami variu (2–4 %) ir kitais elementais, kad būtų nedidelio galingumo magnetų gamybai. Šie lydiniai yra kieti ir trapūs, todėl magnetai iš jų gaminami liejimo būdu, o jų magnetinėms savybėms pagerinti jie dar grūdinami  $\sim 1\,260\text{ }^{\circ}\text{C}$  ir atleidžiami  $\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatūroje.

*Magnetai* iš alnio ir alniko lydinių dažnai *gaminami taikant miltelinę technologiją*: lydiniai sukepinami 1 300 °C temperatūroje, supresuojant šių medžiagų miltelius.

*Magnetiškai minkšti* lydiniai skirti transformatorių šerdims, elektros generatorių ir variklių inkarams, poliams, įvairiems magnetolaidžiamas gaminti.

Elektrotechnikos įrenginiuose naudojami elektrotechniniai plienai taip pat gaminami iš magnetiškai minkštų medžiagų. Šiuose plienuose beveik nėra anglies (0,05–0,005 % C) ir jie gausiai legiruojami siliciu (0,8–4 %), kuris labai padidina elektrinę varžą ir magnetinę skvarbą (tačiau jų plastinės savybės yra labai prastos).

Prietaisų gamyboje, radioteknikoje, garso bei vaizdo technikoje magnetolaidžius veikia silpni, tačiau daug didesnio dažnio magnetiniai laukai. Norint sumažinti elektros energijos nuostolius, tokie magnetolaidžiai turi būti *magnetiškai labai minkšti* (nes kitaip jie įkaista). Magnetolaidžiams gaminti daugiausia naudojami geležies-nikelio lydiniai – *permalojai*. Juose yra 40–80 % Ni, be to, jie papildomai dar legiruojami Cr, Mo, Si, Ti. Geriausių magnetinių savybių yra permalojai, kuriuose yra ~80 % Ni (pvz., 79 HMA, 81 HMT – gana brangūs rusiški lydiniai dėl daug kainuojančių Ni, Mo). Jeigu elektros srovės dažniai viršija 400 Hz, tai magnetolaidžiams būtina naudoti kietąsias nemetališkas medžiagas – *feritus* (siekiant išvengti elektros nuostolių).

*Feritai* – tai trivalentės geležies oksido  $Fe_2O_3$  ir vieno ar kelių metalų oksidų kristaliniai junginiai. Jų magnetinės savybės panašios į *feromagnetiką*, tačiau sukuriniai srovių nuostoliai yra gerokai mažesni. Gaminiai iš feritų gaminami sukepinimo būdu (feritinės antenos, ričių žiedai, šerdys).

### **2.8.2. Elektrovaržiniai lydiniai**

Tai lydiniai, skirti kaitinimo elementams ir reostatams gaminti. Jiems būdingas neblogas plastiškumas bei didelė specifinė elektrinė varža, kuri praktiškai nepriklauso nuo temperatūros. Jeigu tokie

lydiniai naudojami kaitinimo elementams, jie turi būti atsparūs kaitrai. Reostatams skirti lydiniai eksploatuojami įkaista ne daugiau kaip iki 100–500 °C, todėl jie nebūtinai turi būti atsparūs kaitrai.

Kaitinimo elementams gaminamų lydinų pagrindą sudaro geležis ir nikelis. Norint gauti specifines savybes, šie lydiniai dar legiruojami chromu ir aliuminiu. Kuo daugiau lydiniuose Cr ir Al, tuo jie atsparesni kaitrai ir aukštesnė jų eksploatavimo temperatūra. Pavyzdžiui, rusiško lydinio X15H05A (15 % Cr ir 5 % Al) didžiausia darbinė temperatūra siekia 500 °C, o lydinio 0X27H05 (27 % Cr ir 5 % Al) – 1 300 °C. Fe-Cr-Al lydiniai nepakankamai plastiški, todėl juos gaminant (ypač suvirinant) būtinas pakaitinimas iki 200–350 °C.

Kaitinimui skirtų nikelio lydinų svarbiausias legiravimo elementas yra chromas, todėl šie lydiniai vadinami *nichromais*. Pvz., Rusijoje pagamintas lydinys X20H80T3 turi 20 % Cr, 80 % Ni ir 3 % Ti. Nichromams atpiginti kartais juose dalis nikelio pakeičiama geležimi. Tokie lydiniai vadinami *feronichromais*. Jų darbinė temperatūra mažesnė negu nichromų (pvz., feronichromų leistina darbinė temperatūra yra iki ~900 °C, o nichromų – 1 100 °C).

Dažnai reostatams naudojami ir *vario lydiniai: konstantanas, manganinas, chromelis*. Pagrindiniai jų legiravimo elementai yra Mn, Ni ir Co (pvz., rusiškas manganinas МНМц3-12 turi ~3 % Ni (Н – никель), ~12 % Mn (Мц – марганец), iki 1 % Co, likęs kiekis – Cu).

### 2.8.3. Tamprieji ir specialiųjų šiluminių savybių lydiniai

Spyruoklių plienų stiprumui, tamprumui ir relaksaciniam atsparumui užtikrinti juose turi būti 0,5–0,9 % C. Paprastai spyruoklių ir lingių šiluminis apdorojimas yra *grūdinimas ir vidutinis atleidimas* (~400–500 °C). Smulkios spyruoklės vyniojamos jau iš termiškai apdorotos vielos, kuri atleidžiama ~170–300 °C temperatūroje. *Didelės* spyruoklės vyniojamos iš *atkaitinto metalo* (kadangi tam reikia didelės jėgos), paskui *grūdinamos* arba jos vyniojamos karštuoju būdu, t. y. įkaitinus metalą. Lingių juostos grūdinamos

specialiuose šampuose išlenktos reikiamu įlinkiu. Užgrūdintos juostos atleidžiamos ir surenkamos į lingių paketus.

Svarbios, didelės, sunkiau apkrautos spyruoklės gaminamos iš plieno, legiruoto Si (1–3 %), Mn (~1 %), kurie *didina plieno tamprumą*. Papildomi spyruoklinių plienų legiravimo elementai yra Cr, V, Ni, Ti, Mo, Al. Jeigu būtina padidinti plieno užgrūdinamumą, patvarumą ir relaksacinį atsparumą, jis papildomai legiruojamas Cr (~1 %), V (0,15 %) ir Ni (iki 1,7 %) ir naudojamas automobilių variklių vožtuvų spyruoklėms gaminti.

Spyruoklėms ir automobilių lingėms gaminti dažnai naudojami pigūs siliciu legiruoti plienai. Didelėms, gausių dinaminių bei smūginių apkrovų veikiamoms lingėms ir spyruoklėms gaminti naudojami plienai, kompleksiskai legiruoti Si ir Cr arba Si ir Ni (pvz., 60SiCr6-3, 60SiNi7-6). Jų *kietumui padidinti taikomas deformacinis sukietinimas*, deformuojant plieniniais rutuliukais, išmetamais suslėgtuoju oru. Tai padidina jų patvarumo ribą iki 2 kartų.

Mašinų gamybos, maisto, chemijos pramonėje, elektrotechnikoje naudojami spyruokliniai lydiniai turi būti ne tik tamprūs, bet ir pasižymėti specifinėmis savybėmis – jie turi būti atsparūs korozijai, laidūs elektrai, nemagnetiški. Svarbios spyruoklės bei kiti tamprieji elementai dažniausiai gaminami iš *berilinės bronzos* (žr. 2.4.2.2). Tamprumui pagerinti berilinės bronzos *grūdinamos ir sendinamos*. Berilis yra brangus legiravimo elementas, todėl mažiau svarbūs tamprieji elementai gaminami iš *silicinių bronzų*.

*Pigesni* nei berilinės bronzos yra *geležies-nikelio spyruokliniai lydiniai* (pvz., rusiški 36HXT10, 36HX), kuriuose yra ~36 % Ni. Papildomai jie legiruojami Cr (~12 %), Ti (~3 %), Al (~1 %), Mo (iki 8 %). Grūdintų ir sendintų šių lydinių savybės (tamprumo riba) artimos berilinių bronzų.

Geležies-nikelio lydiniai, turintys ~36 % Ni, vadinami *invarais* (H36, Rusija). Jie *turi labai mažą šiluminio plėtimosi koeficientą* ir yra naudojami matavimo įrankių ir tiksliųjų prietaisų detalėms

gaminti. Legiruojant invarus kobaltu ir variu, jų šiluminis plėtimosi koeficientas dar labiau sumažėja. Tokie lydiniai vadinami *superinvarais* (32HKД). Invarai, legiruoti Cr (~9 %), W (~3 %), Mo (~2 %) ir C (~1 %), vadinami *elinvarais* (H35XMB). Jie naudojami chronometrų, laikrodžių, kamertonų tampriųjų elementų gamybai.

Geležies lydinys *kovaras* (~28 % Ni, ~18 % Co) turi tokį pat šiluminį plėtimosi koeficientą, kaip ir kaitrai atsparus stiklas, W, Mo. Jis naudojamas elektros laidininkams įlituoti į stiklinius vakuuminius korpusus (pvz., varikapai) bei elektroninių elementų kontaktams lituoti su keramika.

Elektros laidininkams lituoti su kaitrai neatspariu stiklu naudojamas lydinys *platinitas* (~47 % Ni, ~5 % Co), kuris turi tokį pat šiluminio plėtimosi koeficientą, kaip ir stiklas bei platina. Todėl *platinitas gali pakeisti brangią platiną*.

## 2.9. Kompozicinės medžiagos

Tai dviejų ar daugiau *chemiškai skirtingų medžiagų* (su skirtingais paviršiais) *derinys*. Šioms medžiagoms – *kompozitams būdingos unikalios savybės*, kurios kiekybiškai ir kokybiškai skiriasi nuo kiekvieno iš jas sudarančių komponentų savybių. Kompozicinę medžiagą sudaro:

1. *Pagrindas (rišamoji medžiaga)*, kuris lemia gaminio vienalytiškumą, formą ir armuojančių elementų tarpusavio išsidėstymą bei apkrovų tolygų pasiskirstymą visame kompozite. Pagrindas gali būti anglies, keraminis, metališkas, polimerinis, stiklo.

2. *Armuojantys komponentai (užpildai)*, kurie paprastai yra 2–3 kartus stipresni už rišamąją medžiagą ir turi *didesnę lydymosi temperatūrą*.

Pagal armuojančių komponentų formą ir jų pasiskirstymą rišamojoje medžiagoje kompozitai skirstomi į tris grupes:

1. *Dispersinės medžiagos*, susidedančios iš vieno ar kelių labai smulkių komponentų. Tai metalokeramikos kompozicijos (kermetai),

kuriems būdingas didelis mechaninis stiprumas plastiškumas, atsparumas smūgiams, šiluminis atsparumas. Pvz., *keraminių kermetų* komponentai yra ugniai atsparūs oksidai:  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{TiO}_2$  ir kiti, taip pat karbidai, boridai, nitridai su metališkaisiais rišikliais: Fe, Ni, Co, Cr, Mo, W, Nb bei jų lydiniais.

2. *Medžiagos su pluoštiniu užpildu (armuotos)*. Tai didelio stiprumo stiklo, anglies, boro pluoštai, karbidų, oksidų, nitridų ir kitų junginių siūliniai kristalai. Kompozito su metališkuoju pagrindu armuojančiais elementais gali būti plonos vielos iš grūdintojo plieno, W, Ti, Be ir kt. Armavimas pluoštais ypač padidina kompozicinių medžiagų terminį atsparumą ( $> 1\,000\text{ }^\circ\text{C}$  temperatūrose).

3. *Sluoksniuotosios medžiagos* susideda iš dviejų ar daugiau įvairių komponentų sluoksnių (asbesto, medvilnės, anglies pluošto audinio ir kt.). Pavyzdžiui, tai yra bimetalai: plieno-Al ar Ti-Mo kompozitai. Jų sluoksniai turi nevienodą šilumos plėtimosi koeficientą, todėl bimetalinės plokštelės veikiant šilumai išsilenkia ir atjungia elektrinius kontaktus. Pramonėje bimetalai naudojami nuo XIX a. pabaigos (pvz., elektrotechnikoje – automatinuose saugikliuose, lygintuvuose, vandens kaitintuvuose).

*Armuotos ir sluoksniuotosios kompozicinės keraminės medžiagos* naudojamos lėktuvų ir kosminių laivų statyboje, branduolinėje pramonėje ir kitose svarbiose technikos srityse.

Atskira techninės keramikos medžiagų grupė – *ugniai atsparios medžiagos*, kurios sudarytos daugiausia iš ugniai atsparių mineralų:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  ir  $\text{MgO}$ .

## 2.10. Polimerinės medžiagos – plastikai

*Polimerai* – tai stambiamolekuliai *anglies junginiai su vandeniliu, deguonimi, azotu, siliciu* ir kt. elementais, kurie sudaro *plastikų pagrindą*. Polimerai gali būti kristaliniai (jų molekulių atomai išsidėstę tam tikra tvarka), bet dažniausiai jie būna amorfiniai (atomai erdvėje yra išsidėstę chaotiškai).

Plastikų pagrindinė sudedamoji dalis yra *sintetinė derva*, gaunama kaip nesudėtingų cheminių junginių – monomerų sintezės produktas.

Plastikų savybės labai skiriasi, kadangi jie gaunami įvairiais sintezės būdais: polimerizacijos būdu; vykstant polikondensacijos reakcijai; chemiškai modifikuojant monomerus. Pagal komponentų skaičių visi plastikai skirstomi į *paprastuosius* (*polietilenas, kapronas, polistirenas*), kurie sudaryti iš vieno komponento – sintetinės dervos, ir *kompozicinius* (*fenoplastai*, gauti iš fenolio aldehido dervų, aminoplastai, *tekstolitas* ir kt.), kurie susideda iš kelių komponentų: dervos ir užpildų (miltelių, pluošto, audinio, popieriaus), plastifikatorių, dažų. Derva yra kitų komponentų rišiklis, nuo kurio priklauso fizikinės, mechaninės ir technologinės plastikų savybės.

Plastikai pagal juose aukštoje temperatūroje vykstančius procesus skirstomi į *termoplastikus* (*polietilenas, polistirenas, organinis stiklas, poliuretanai, polipropilenas, fluoro plastikai, polivinilo chloridas*), kurie *suminkštėja* aukštesnėje temperatūroje ir sukieta ataušę, ir į *reaktoplastikus* (stiklo pluoštinys, *tekstolitas, getinaksas, aminoplastas* ir kt.), kurie kaitinami suminkštėja, pasidaro klampiai takūs, tačiau po kurio laiko aukštesnėje temperatūroje juose įvyksta cheminės (polimerizacijos) reakcijos ir jie negrįžtamai sukieta, tampa stiprūs ir netirpūs (pakartotinai įkaitinti nesuminkštėja ir išlaiko gerąsias savo savybes).

Plastikai yra lengvi, mechaniškai stiprūs ir netrapūs (ypač šiuolaikiniai), atsparūs korozijai, pasižymi geromis dielektrinėmis savybėmis, mažu šiluminiu laidumu, adhezija (žr. 2.7.1) ir virpesių slopinimu. Plastikai *pakeičia retus ir brangius spalvotuosius metalius* ir jų lydinius, kai reikia sumažinti gaminių masę (pavyzdžiui, šiuolaikinių kalnų slidžių apkaustai yra plastikiniai). *Fluoroplastiko-4* darbinių temperatūrų diapazonas yra nuo –269 iki +260 °C (GOST 10007-80), *polistireno* stipris 140–150 MPa ir jis yra *septynis kartus lengvesnis už plieną*. Plastikai pasižymi geromis technolginėmis

savybėmis: detalės iš jų lengvai liejamos, presuojamos, suvirinamos, klijuojamos.

Polimerinių medžiagų *trūkumai*: polinkis senėti, nedidelis atsparumas šilumai, greitesnis susidėvėjimas.

## 2.11. Superlaidininkai

Superlaidininkai yra kietosios medžiagos, kurių elektrinė varža, atšaldžius jas žemiau kritinės temperatūros  $t_{kr}$  (artimos absoliučiajam nuliui  $t_a = \text{minus } 273,15^\circ\text{C}$ ) sumažėja tiek, kad jos neįmanoma išmatuoti jokiais šiuolaikiniais prietaisais.

1908 m. olandų fizikui Heikei Kamerlingui Onui (H. Kamerling Onnes) pavyko pasiekti nepaprastai žemą, 4,2 K temperatūrą ir suskystinti helį – dujas, turinčias mažiausią skystėjimo temperatūrą (He  $t_{lyd} = -268,9^\circ\text{C}$ ). H. Kamerlingas Onas, Leidenio universiteto profesorius, sukūrė gamyklos dydžio laboratoriją su pačia naujausia įranga, kurioje dirbo mokslui atsidavę specialistai. Įrenginyje buvo realizuotos šešios pakopos įrenginių su skirtingomis darbinėmis medžiagomis ir mažėjančiomis lydimosi temperatūromis: 1 – metilo chlorido ( $-98^\circ\text{C}$ ); 2 – etileno ( $-169^\circ\text{C}$ ); 3 – deguonies ( $-183^\circ\text{C}$ ); 4 – azoto ( $-210^\circ\text{C}$ ); 5 – vandenilio ( $-259^\circ\text{C}$ ) ir pagaliau 6 – helio ( $-269^\circ\text{C}$ ). Atšaldytos skystuoju vandeniliu ( $-259^\circ\text{C}$ ) ir droseliuojamos helio dujos suskystėdavo. Jos būdavo surenkamos Diuaro inde (specialus termosas).

Taip buvo gauta rekordinė 1 K temperatūra, kurioje vyksta nepaaiškinami reiškiniai: helis nepereina į kietąją būseną sumažinus temperatūrą beveik iki absoliučiojo nulio, bet jis staiga netenka klampumo ir tampa supertakus: išteka iš indo, kurio sienelės aukštesnės už jo lygį.

1911 m., tyrinėdamas skystajame He metališkojo gyvsidabrio elektrines savybes, K. Onas pastebėjo visišką Hg varžos išnykimą. Šis reiškinys buvo pavadintas superlaidumu, o medžiagos, sugebančios visiškai netekti varžos (tokiose žemose temperatūrose) –

superlaidininkais. K. Onas už šį atradimą gavo Nobelio premiją (1913 m.).

Esant superlaidumui (varža lygi nuliui) nėra jokių elektros energijos nuostolių ir tai neabejotinai perspektyvu.

Šiuo metu žinoma daugybė įvairių superlaidininkų – metalų, cheminių junginių, tačiau daugelio jų perėjimo į superlaidžią temperatūrą ( $t_{kr}$ ) dydžiai labai maži – neviršija 10 K. Iš metališkųjų superlaidininkų didžiausią  $t_{kr}$  turi germanitas ( $\text{Nb}_3\text{Ge}$ ), kurio  $t_{kr} = 23,2$  K. Jis naudojamas radioelektronikoje gaminant superlaidžius solenoidus. Tarp sudėtingų cheminių junginių aukščiausią superlaidžiosios būsenos temperatūrą turi daugiakomponentis  $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_3$  junginys, kurio  $t_{kr} = 164 \text{ K} = -109 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 3. TERMINIO APDOROJIMO IR DANGŲ TECHNOLOGIJOS

#### 3.1. Plieno atkaitinimas ir normalizavimas

Atkaitinimo esmę sudaro plieno *įkaitinimas* virš kritinių temperatūrų  $A_{C3}$  arba  $A_{C1}$  (pagal Fe-Fe<sub>3</sub>C diagramą), izoterminis *išlaikymas* šiose temperatūrose ir *lėtas ataušinimas*. Įkaitinimo temperatūros kiekvienam plienui skirtingos, nes priklauso nuo jo cheminės sudėties.

Atkaitintas plienas yra minkštas, nestiprus ir gana plastiškas. Dėl persikristalizavimo (rekristalizacijos) *susmulkėja ir susivienodina plieno struktūra*, dingsta jos defektai (jeigu susidarė ankstesnio plieno technologinio apdorojimo metu), panaikinami vidiniai įtempiai.

Atkaitinami daugelis valcuotųjų, kaltinių, šampuotųjų, liejamojo plieno gaminių. Daugumai didelių liejinių atkaitinimas yra paskutinė terminio apdorojimo operacija. Tokį plieną lengviau apdoroti pjovimu bei spaudimu (nes jis plastiškesnis). Atkaitinimu plienas ruošiamas tolesniam grūdinimui.

Plieno normalizavimas – tai praktiškai visiškas atkaitinimas. *Normalizavimui plienas įkaitinamas  $\sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$  virš kritinės tempera-*

tūros  $Ac_3$  (virš linijos GSE Fe-Fe<sub>3</sub>C diagramoje), išlaikomas ir aušinamas ore (be vėjo ir skersvėjo). Aušinimo greitis, palyginti su atkaitinimu, paprastai didesnis. Normalizuojant vyksta *visiškas* fazinis plienų struktūros *persikristalizavimas* (rekristalizacija), todėl, kaip ir atkaitinant, *susmulkėja ir suvienodėja plieno struktūra*, dingsta daugelis struktūros defektų.

Palyginti su atkaitintu plienu, normalizuoto *anglinio plieno kietumas ir stiprumas padidėja ~10–15 %*. Šiek tiek padidėja ir smūginis tūsumas, nežymiai mažėjant santykiniam ištįsimui.

Atkaitinant mažai anglingus plienus ( $C < 0,3 \%$ ) jų kietumas ir stiprumas padidėja nežymiai. Todėl *atkaitinimas dažnai pakeičiamas normalizavimu*, nes jis yra paprastesnis ir pigesnis.

Normalizuotas mažanglis plienas pjovimu geriau apdirbamas negu atkaitintas, nes jo drožlės yra trapesnės, pjovimo paviršius – švaresnis, o įrankiai lėčiau dyla.

Normalizavimu ir aukštuoju atleidimu (žr. 3.2) dažnai susmulkinama ir ištaisoma legiruotojo plieno struktūra. Palyginti su visiškuoju atkaitinimu, tokia technologija našesnė.

### 3.2. Plieno grūdinimas ir atleidimas

Grūdinimas – tai plieno *įkaitinimas* virš jo rekristalizacijos temperatūros ir *staigus aušinimas* vandenyje (vandeniniuose ~ 10 % NaCl, NaOH tirpaluose) arba alyvoje.

Grūdinant plieną, dažniausiai *siekiama gauti pačią kiečiausią, t. y. martensitinę struktūrą. Atleidžiant užgrūdintą plieną, sumažinamas jo kietumas ir padidinamas plastiškumas*.

Grūdinamo plieno charakteristikos yra *užgrūdinamumas ir įgrūdinamumas*. Užgrūdinamumu vadinama plieno savybė įgyti didesnę kietumą grūdinimo metu. Ši savybė priklauso nuo anglies kiekio pliene: kuo jis didesnis, tuo kietesnis užgrūdintas plienas. Užgrūdinto mažanglio plieno ( $C < 0,3 \%$ ) kietumas padidėja nedaug, todėl mažanglis plienas negrūdinamas.

*Igrūdinamumas* – tai plieno savybė užsigrūdinti tam tikru gyliu, nes sunku ar neįmanoma pasiekti, kad grūdinamos detalės šerdis ir paviršius auštų vienodu greičiu. Užgrūdinto sluoksnio gyliu sąlygiškai laikomas atstumas nuo gaminio paviršiaus (martensitinės struktūros) iki pusiau martensitinės struktūros.

*Grūdinant vandenyje* būtina, kad skystis cirkuliuotų, arba patį gaminį reikia intensyviai judinti. Tai išsklaido garus gaminio paviršiuje ir jis aušta tolygiau ir intensyviau. Šiuo metu naudojami specialūs *purkštuvai*, purškiantys ant detalės paviršiaus vandens ir oro mišinį. Aušinimo greitį galima reguliuoti keičiant vandens ir oro santykį.

Šiuolaikinis paviršinio grūdinimo metodas yra *grūdinimas, įkaitinant detalės paviršių aukštojo dažnio elektros srovėmis* (ADS). Gaminys dedamas į induktorių, kurio forma artima grūdinamo paviršiaus formai. Aukštojo dažnio elektros srovė, tekėdama induktoriaus vijomis (variniu vamzdeliu, aušinamu vandeniu), sukuria aplink detalę galingą kintamąjį magnetinį lauką. Dėl jo plieno paviršiuje indukuojasi sūkurinės srovės, kurios įkaitina metalo paviršių.

Atleidimas – tai baigiamoji terminio apdorojimo operacija – grūdintojo plieno kaitinimas iki 100–650 °C temperatūros, laikymas (0,5–3 h) joje ir ataušinimas. Grūdintasis plienas *atleidžiamas, norint sumažinti grūdinimo įtempius, plieno trapumą ir padidinti jo plastiškumą* bei smūginį tįsumą. Atleidimo metu gaminiui suteikiamos reikiamos savybės. *Priklausomai nuo atleidimo temperatūros* (t. y. kokioje temperatūroje ir kiek ilgai (1–6 h) plienas laikomas) skiriami trys atleidimo būdai: 1) *žemasis* (150–250 °C), 2) *vidutinis* (350–480 °C) ir 3) *aukštasis* (500–650 °C).

*Žemojo atleidimo* metu sumažėja plieno vidiniai (grūdinimo) įtempiai, trapumas, o jo kietumas ir atsparumas dilimui beveik nesumažėja. Taip dažnai atleidžiami grūdinti pjovimo ir staklių įrankiai, rutuliniai guoliai, kalibrai, cementuoti ir cianuoti, užgrūdinti ADS gaminiai.

*Vidutinis atleidimas padidina plieno tamprumą, atsparumą nuovargiui, šiek tiek sumažindamas jo kietumą ir stiprumą. Paprastai taip atleidžiamos spyruoklės, lingės.*

*Aukštasis atleidimas visiškai panaikina grūdinimo įtempius, padarydamas plieną stiprų, plastišką, tąsų, šiek tiek sumažindamas jo kietumą (~25–35 HRC). Toks atleidimas dažniausiai taikomas vidutinio anglingumo (0,3–0,5 % C) plieno detalėms, kurias veikia kintamoji bei smūginė apkrova. Išlaikoma paprastai ilgiau negu atkaitinant arba grūdinant.*

*Dauguma plienų po atleidimo aušinami ore, rečiau vandenyje ar alyvoje.*

### **3.3. Medžiagų termomechaninis apdorojimas**

*Medžiagų termomechaninis apdorojimas jungia du technologinius procesus, kuriems vykstant padidėja metalo stiprumas. Tai plastinis deformavimas ir martensitinis grūdinimas. Atlikus plieno deformavimą jis nedelsiant grūdinamas ir atleidžiamas 100–250 °C temperatūroje. Termomechaniškai apdorotas plienas pasižymi geresnėmis mechaninėmis savybėmis: yra 10–20 % stipresnis ir 1,5–2 kartus plastiškesnis. Geriausiai plienas sustiprinamas esant šaltai plastinei deformacijai, tačiau tokiame deformavime reikia galingos ir brangios įrangos, kadangi deformavimo trukmė yra ribota. Todėl toks deformavimas taikomas nestoriams, paprastos formos gaminiais (lakštams, juostoms, ploniems strypams ir kt.). Tokių termochemiškai apdorotų detalių mechaninės savybės ypač geros.*

*Spalvotųjų metalų termomechaninis apdorojimas – tai trijų technologinių procesų junginys: fiksuojamasis grūdinimas, plastinis deformavimas ir sendinimas. Metalas deformuojamas po fiksuojamojo grūdinimo, kol jis yra plastiškiausias. Tuomet deformavimu sukietintas metalas sendinamas. Šiuo atveju jo stiprumo ir kietumo padidėjimą lemia du kietumą didinantys veiksniai: deformacinis sukietinimas ir dispersinis kietėjimas.*

Termomechaniskai apdorojami deformuojamieji aliuminio lydiniai. Tokia technologija taikoma magnio lydiniams sustiprinti. Plastinio deformavimo technologija dažnai taikoma termiškai apdorojant berilines bronzas. Deformaciniu būdu suketintos berilinės bronzos greičiau senėja ir labiausiai stiprėja. Pavyzdžiui, po įprastinio grūdinimo ir sendinimo berilinės bronzos stipris  $R_m = 1\,250$  MPa, o santykinis ištįsimas  $A \sim 3\%$ , o po termomechaninio apdorojimo  $R_m = 1\,400$  MPa, o  $A = 2\%$ .

### 3.4. Medžiagų termocheminis apdorojimas

Termocheminiu apdorojimu vadinamas įkaitinto metalo paviršinių sluoksnių difuzinis įsotinimas įvairiais cheminiais elementais. Pavyzdžiui, plieninių detalių paviršinis sluoksnis įsotinamas C, N, Al, Cr, Si, B ir kt. Pagrindinis termocheminio apdorojimo tikslas yra pakeisti metalo paviršinių sluoksnių cheminę sudėtį, struktūrą ir savybes, kad padidėtų detalių paviršiaus kietumas, patvarumas, pasipriešinimas dilimui, atsparumas korozijai ir kt.

Labiausiai paplitę termocheminio apdorojimo būdai yra *cementavimas* (įanglinimas), *azotinimas* (įsotinimas azotu), *cianavimas ir nitrocementavimas* (kartu įsotinant C ir N).

Plieno *cementavimas* – tai plieno detalių paviršinio sluoksnio difuzinis įsotinimas anglimi. Cementavimas atliekamas, kai būtina padidinti detalės paviršiaus kietumą, atsparumą dilimui, o gaminio šerdis lieka minkšta ir tasi. Cementuotos detalės yra patvaresnės ir atsparesnės kontaktiniam dėvėjimuisi.

Plienų *azotinimas* – tai detalių paviršinių sluoksnių difuzinis įsotinimas azotu. Azotinimas padidina detalių paviršiaus kietumą, pasipriešinimą dilimui, patvarumą, atsparumą korozijai ore ir vandenyje. Azotintasis sluoksnis paprastai kietesnis už cementuotąjį ir išlaiko kietumą aukštesėse temperatūrose (iki 500 °C). Tai leidžia sustiprinti ir tokias detales, kurios naudojamos aukštesnėje temperatūroje, pvz., cilindų gilzes, turbinų velenus ir kt. Azotinimo procesas dažnai vadinamas *nitravimu*.

Cianavimas atliekamas skystoje terpėje – išlydytose druskose, turinčiose CN grupę. Dažniausiai tam naudojamas natrio cianatas NaCN, kuris yra gana nuodingas.

### 3.5. Terminio purškimo technologija

*Terminis purškimas* – tai procesas, kai koncentruoto energijos šaltinio išlydyti maži medžiagos lašeliai dideliu greičiu yra bloškiami ant pagrindo, kristalizuojasi ir taip formuoja dangą. 1910 m. Šveicarijoje buvo sukurtas pirmasis purškimo įrenginys, kuriuo išlydytas metalas karšto oro srove buvo pučiamas pagrindo link, o atsitrenkęs į jį formavo dangą. Tačiau šis įrenginys buvo labai didelis ir sunkus. Modernizavus įrangą ir pagerinus purškiamų medžiagų kokybę terminio purškimo procesas gerokai patobulėjo. Nuo kitų technologinių procesų jis skiriasi technologijų savotiškumu ir taikymo sritimis. Priklausomai nuo koncentruoto energijos šaltinio, kuris išlydo purškiamą medžiagą, terminio purškimo procesas skirstomas į dujinį ir elektrolankinį.

*Dujinis purškimas*, atsižvelgiant į purškiamos medžiagos rūšį, gali būti trijų tipų: dujinis purškimas naudojant vielą, dujinis purškimas naudojant strypelį ir dujinis purškimas naudojant miltelius. Purškiama medžiaga yra tiekama per centrinę degiklio antgalio angą ir išlydoma degiųjų dujų mišiniu. Išlydytas medžiagos daleles pagauna liepsnos srautas (išpurškimo kūgis) ir bloškia į gaminio paviršių. Maksimali temperatūra  $t = 2\,600\text{--}3\,100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , o purškiamų dalelių greitis  $30\text{--}100\text{ m/s}$ .

*Didelio greičio dujinis liepsninis purškimas* – tai vienas iš naujesnių terminio purškimo būdų. Degimo procese su deguonimi dažniausiai naudojamos propano, propileno ar vandenilio dujos. Degančių dujų greitis gali viršyti garso greitį ( $t = 2\,600\text{--}3\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $V = 300\text{--}550\text{ m/s}$ ). Dėl didelio purškiamų dalelių greičio gaunamos tankios, mažai porėtos dangos.

*Elektrolankinio purškimo* atveju per du kanalus degiklyje nepertraukiamai paduodamos dvi elektrodinės vielos, tarp kurių dega

elektros lankas, ir šios vielos lydosi. Išlydytas daleles pagauna suslėgtojo oro srovė ir perneša dideliu greičiu ( $V = 100\text{--}350\text{ m/s}$ ) formuojamos dangos ( $t = 2\ 600\text{--}6\ 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) link.

*Plazminis purškimas.* Tarp katodo ir vandeniui aušinamos tūtos, kuri yra anodas, dega elektros lankas. Jis įkaitina tiekiamas į degiklio tūtą dujas, kurios išeina iš degiklio jau kaip plazmos srautas ( $t > 10\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $V=100\text{--}400\text{ m/s}$ ). Miltelius išlydo karštų dujų fėkelas.

Terminio purškimo privalumai:

- Danga galima padengti gaminių, pagamintą iš bet kokios medžiagos: metalo ar metalų lydinio, stiklo, porceliano, organinių (medienos, popieriaus, kartono) ir kitų medžiagų.
- Purškimo technologijas galima taikyti neriboto dydžio gaminiams. Dangą galima purkšti ant viso paviršiaus ploto arba dengti tik tam tikrą gaminio paviršiaus zoną.
- Terminiu purškimu galima atkurti detalės matmenis (susidėvėjusių mašinų detalių atkūrimas ar remontas).
- Purškimo įranga yra paprasta, mažų matmenų, nesudėtinga jos eksploatacija.
- Platus purškiamų medžiagų pasirinkimas, nes galima naudoti įvairius metalus, jų lydinius, metalų ir oksidų mišinius.
- Galima purkšti įvairiomis medžiagomis, keliais sluoksniais naudojant skirtingas medžiagas.
- Purškimu dengiami gaminiai mažai deformuojasi.

#### 4. SUVIRINIMO RAIDA

Metalai sujungiami suvirinimo būdu jau nuo seniausių laikų (dar nuo bronzos amžiaus). Skitai jau V a. pr. Kr. kalviškąjį suvirinimą taikė geležiai sujungti. Pietvakarių Ukrainoje ir Besarabijos teritorijoje rasta varinių kalviškuoju būdu suvirintų gaminių, kurių amžius siekia 5–6 tūkst. metų.

Šiuo metu *suvirinti galima ne tik metalus, bet ir visas kitas medžiagas: stiklą, keramiką, plastiką, kaulus, net skirtingų rūšių*

*medžiagas. Suvirinimas atliekamas įprastinėje aplinkoje, po vandeniui, kosmose ir bet kokiose erdvinėse padėtyse.*

*Bendruoju atveju suvirinimą galima apibrėžti kaip neišardomą medžiagų sujungimą jas kaitinant ar (ir) padidinus slėgį, o pats suvirintasis sujungimas turi būti toks, kad gaminys per visą eksploatavimo laiką atitiktų nustatytas fizines ir chemines charakteristikas. Ypač paplitę elektrolankinio, dujinio, kontakcinio suvirinimo būdai, o pastaruoju metu vis plačiau taikomi specialūs suvirinimo būdai: lazerinis, ultragarsinis, difuzinis, plazminis, purškiamasis (žr. 3.5 skyrių), sprogdinamasis.*

#### **4.1. Kalvystė**

##### **4.1.1. Kalvystės raida**

Kalvystė atsirado dar prieš pradėdant geležį lydyti iš rūdų. IV–III tūkstantmetyje pr. Kr. Mesopotamijoje ir Egipte kaltiniai buvo kalami iš meteoritinės geležies. Vėliau Europoje, Azijoje ir Afrikoje metalurgai kalė žaizdruose lydytą geležį, varį, sidabrą ir auksą. Senovėje kalvis kartu buvo ir metalurgas, liejikas, suvirintojas ir terminio apdorojimo meistras. I tūkstantmečio pr. Kr. pradžioje geležies metalurgija paplito įvairiuose kraštuose – taigi bronzos amžių pakeitė geležies amžius. Pradėjus naudoti geležį sparčiau ėmė vystytis gamyba, o tai turėjo didelės įtakos visuomenės raidai.

Senovėje beveik visuose pasaulio kraštuose į kalvius žiūrėta su mistine pagarba – mat jie dirbo su ugnimi, kuri buvo laikoma šventa. Graikų mitai byloja, kad kalvystės meną išrado Hefaistas – ugnies dievas ir kalvių globėjas (romėnų dievas buvo Vulkanas). Kalvis – mitologizuotas personažas ir lietuvių tautosakoje. Jam priskiriamas Saulės išlaisvintojo iš požemio karalystės vaidmuo. Nuo seno tiek pati kalvė, tiek ir joje dirbę amatininkai buvo siejami su antgamtinėmis jėgomis. Ne tik dėl gaisro baimės šie meistrai įsikurdavo kaimo gale, dažnai už upės. Jų mokėjimas „susikalbėti“ su ugnimi aplinkiniams keldavo pagarbią baimę. Juk suprantama:

kalvio pagamintas įrankis palengvindavo darbą, taigi suteikdavo pranašumo prieš tuos, kurie tokio įrankio neturėjo. Dar ankstyvaisiais viduramžiais atsirado ir *meninė kalvystė* (galbūt ugnies stichija išlaisvino žmogaus fantaziją ir skatino pasireikšti jo meninius sugebėjimus).

*Kalvystės menas ypač išstobulėjo viduramžiais.* Buvo kalami šaltieji ir šaunamieji ginklai, darbo įrankiai, durų, skrynių detalės, grotos, šviestuvai, spynos, laikrodžiai ir kt. dirbiniai. Gaminiai dažnai būdavo puošiami kalstytais ornamentais, reljefais, išploto aukso ar bronzos lakšteliais.

Lietuvoje rasta I tūkstantmečio kaltų metalinių papuošalų, kario ir žirgo aprangos detalių, ginklų, žemdirbystės įrankių. Feodalizmo laikotarpiu kalvės koncentravosi miestuose ir dvaruose, vėliau paplito miesteliuose ir kaimuose. XIX a. pabaigoje buvo plėtojama žemdirbystės įrankių gamyba, rogių, ratų, arklių kaustymas, buities reikmenų ir meno dirbinių kalyba. XX a. pradžioje Joniškyje, Kupiškyje, Seirijuose, Varniuose susiformavo kalvystės centrai. Buvo kalami žemės ūkio padargai, bažnyčių, cerkvių, paminklų kryžiai, kaustomi ir remontuojami ratai, rogės. *Vystantis pramonei kalvystė virto metalo apdirbimo ir mašinų gamybos dalimi*, žemės ūkyje apsiribota mašinų, įvairių įrenginių, transporto priemonių remontu.

Meninė kalyba yra taikomosios dekoratyvinės dailės rūšis. Kalybos būdu ir taikant kalviškąjį suvirinimą iš metalų kuriami įvairios paskirties dailieji dirbiniai: skulptūros, reljefai, interjero ir eksterjero elementai (tvorelės, vartai, grotos, baliustrados, iškabos, langų ir durų apkaustai), buities reikmenys, papuošalai (dažnai su brangakmeniais, gintaru). Kalybos dirbiniai dažnai puošiami reljefais, emaliu, graviruojami, dažomi, sidabruojami, auksuojami. Jau nuo XV a. pabaigos Vilniuje veikė monetų kalykla, kurioje taip pat buvo kalami reljefiniai medaliai ir papuošalai.

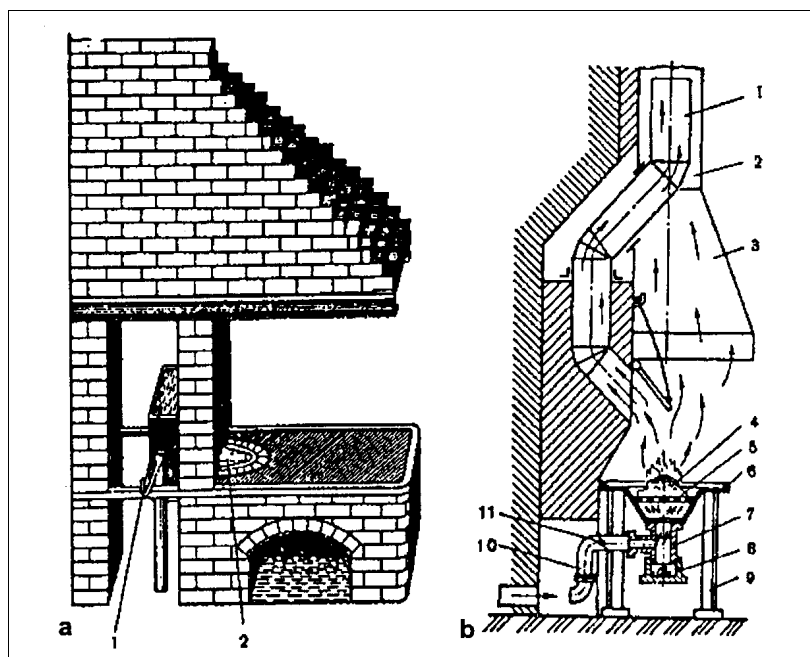
XVI a. kalvystę pradėta mechanizuoti: atsirado pirmieji *mechaniniai kūjai* (daugiausia varomi krintančio vandens), XVIII a. pabaigoje – *pneumatiniai plaktukai* ir kūjai, varomi garo mašina.

XIX a. pabaigoje pradėti naudoti kūjai, varomi vidaus degimo varikliais. XX a. sukurti kūjai, valdomi sprogimu, sėkmingai naudojami *elektromagnetiniai plaktukai*.

Įdomu tai, kad geležies metalurgija liko nežinoma Šiaurės ir Pietų Amerikos indėnams iki pat europiečių išsibrovimo (Kolumbas atrado Ameriką 1492 m.). Nieko apie geležį nežinojo Polinezijos, Naujosios Gvinėjos ir Australijos gentys, o Kamčiatkos ir Čiukčių pusiasalio gyventojai apie ją sužinojo tik XVII–XVIII a.

#### **4.1.2. Kalimo įranga ir technologija**

Kalvės patalpa paprastai yra sandari. Jos grindys būdavo išklotos stačiomis ažuolo lentelėmis, kad neužsidegtų, netyčia nukritus nuodėguliui. Kalvės būna gana aukštos (5–10 m) su įrengta tiekiamąja ventiliacija, žiemą – su pašildytu oru [15]. *Žaizdras* paprastai statomas prie sienos priešais pagrindinį įėjimą, o vienas ar du *priekalai* – *netoli žaizdro*, kad būtų patogų dirbti. Meninės kalvystės kalvėse *žaizdras* statomas centre, kad patogiau būtų kalti didelius ir ilgus gaminius. Šiuolaikinėse kalvėse *žaizdras* įrengiamas su dvigubu dūmtraukiu ir ištraukiamuoju ventiliatoriumi (1 pav.). *Tiekiamoji ventiliacija* palaiko patalpoje normalų oro judėjimą ir neleidžia susidaryti skersvėjams. Žiemą tiekiamas šiltas oras palaiko vienodą temperatūrą.



1 pav. Žaidras:

a – bendras vaizdas: 1 – oro tiekimo reguliavimo rankena; 2 – židiny; b – žaidro pjūvis; 1, 2 – dvigubas dūmtraukis; 3 – skėtis; 4 – degančios anglys; 5 – tūta; 6, 9 – žaidro stalas; 7, 8 – vamzdis su dangčiu; 10, 11 – oro tiekimo vamzdis su reguliavimo sklende

Žaidre kalamas *plienas įkaitinamas iki 800–1 150°C*, aliuminio lydiniai – iki 380–480 °C. Kalama įvairiais plaktukais, kurių forma ir svoris (0,5–5 kg) skiriasi (tai priklauso nuo darbo pobūdžio). Storesniems gaminiams kalti naudojami specialūs kūjai, kurių svoris yra 10–16 kg, jie skirti dirbti abiem rankomis. Be to, naudojami įvairūs kirstukai, skylamušiai, replės, lenkimo atramos, lygintuvai (paviršiui lyginti baigus kalti plaktuku), priekaliniai įrankiai (įstatomi į priekalo ertmes kūgiai, šakutės ir kt.), formos

(kad būtų galima padaryti taisyklingos formos varžto ar kniedės galvutę), matavimo įrankiai.

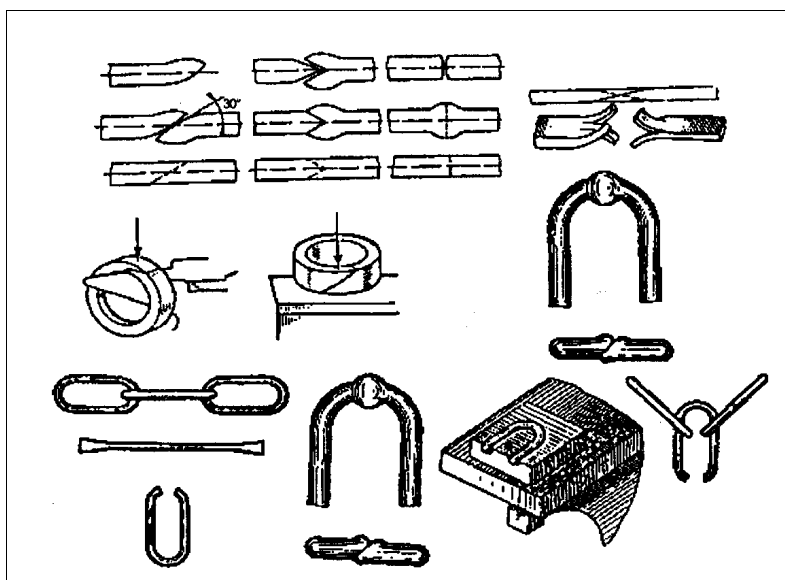
#### 4.1.3. Kalviškasis suvirinimas

Sudėtingesni dirbiniai dažnai gaminami taikant *kalviškąjį suvirinimą*: *žaizdre plieno detalės įkaitinamos iki baltumo* ( $t = 1\,275\text{--}1\,400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), *sudedamos ant priekalo ir kūju sukalamos reikiamoje vietoje*. Įkaitinimo temperatūra paprastai nustatoma pagal plieno spalvą: įkaitusio mažaaanglio plieno spalva turi būti ryškiai balta, o daugiaanglio plieno ( $C = 0,3\text{--}0,5\%$ ) ir legiruotojo plieno temperatūra šiek tiek žemesnė – plienas turi būti baltas su geltonu atspalviu. Tikslią ruošinio (kaltinio) temperatūrą galima nustatyti optiniu pirometru. Siekiant padidinti temperatūrą, į žaizdrą dumplėmis ar ventiliatoriumi papildomai tiekiamas oras.

Plienai, turintys didesnę anglies kiekį ir kitų legiravimo elementų, suvirinami blogiau. Jų *suvirinamumą galima įvertinti pagal anglies ekvivalentą  $C_{ekv}$*  (žr. 2.2.3 skyrių).

Žaizdro kuras turi turėti ne daugiau kaip 1 % sieros, nes ji blogina suvirinimo kokybę. Akmens anglis paprastai turi didesnę sieros kiekį, todėl dažniausiai naudojamas koksas ar medžio anglis.

Dažnai kalviškasis suvirinimas taikomas remonto dirbtuvėse sujungiant juostų, strypų galus. Tokį suvirinimą sudaro šios operacijos: *suvirinamų detalių paruošimas (nuvalymas), kaitinimas, sudėjimas ir sukalimas, suvirintos vietos apdaila*. Norint po suvirinimo išlaikyti pirminius detalių matmenis, jų galai susodinami (pastorinami). Juostų galai perskeliami ir sujungiami. Taip paruošti (2 pav.) jie kaitinami iki suvirinimo temperatūros. Tuomet nuo jų nuvalomos nuodegos, jie sudedami ant priekalo ir sukalami. Įsitikinus, kad suvirinimo kokybė gera, formuojama reikiamos formos ir matmenų siūlė.



2 pav. Kalviškojo suvirinimo pavyzdžiai

#### 4.1.4. Kalvių gaminiai

Kalvystė ypač išpopuliarėjo XVII–XIX a. Tuo metu buvo nukalta daug meno dirbinių – tvorelių, vartų, žibintų, kuriais mes džiaugiamės ir dabar (pvz., Versalio, Sankt Peterburgo, Carskoje Selo rūmuose). Kai kurie miestai netgi specializavosi tam tikrose kalvystės srityse. Pavyzdžiui, Damaskas, Milanas, Augsburgas, Astrachanė, Tula garsėjo ginklais (dažnai iš bulato plieno), Notinganas, Zolingenas, Pavlovas – peiliais ir kitais įrankiais, Vologda – inkarais, vinimis. XX a. kaitais metalo dirbiniais vėl imta puošti sodybas, visuomenines ir buitines patalpas.

Šių dienų moderniausia kalvė praktiškai nesiskiria nuo egzistavusios prieš kelis šimtmečius (skirtumas tik toks, kad kalvio

darbui palengvinti naudojami ir *pneumatiniai kūjai*). Kalvio darbą gražiai aprašo U. Siparienė straipsnyje „Metalas saugo ir puošia namus“ [14]: „<...> žaizdras, kūjis, priekalas ir suodini kalviai, judantys nuo žaizdro prie priekalo, tarsi atlieka ritualinį šokį. „Vilniaus kalvių“ dirbtuvės ikūrėjo Raimondo Vaitkūno nuomone, tikras meistras niekada neįmes nuorūkų į ugnį. Ši vieta šventa ir šiais laikais“.

Klaipėdoje nuo 1992 m. kalvio F. Grimo (F. Grimm) kalvės vietoje (Šaltkalvių g. 2) veikia kalvystės muziejus (3 pav.). Netoliese tebestovi veikianti restauruota žymaus Klaipėdos meistro G. Kackės (G. Katzke) kalvė. Daugumą eksponatų sudaro metalo restauratoriaus D. Varkalio surinkti ir nuo sunaikinimo išgelbėti Mažosios Lietuvos ir senųjų Klaipėdos kapinių kryžiai, tvorelės, vartai ir tik uostamiesčiui būdingos senosios vėtrungės. Muziejuje eksponuojami išlikę autentiški G. Kackės darbo įrankiai, kalvių gaminti namų apyvokos daiktai ir įrankiai, Mažosios Lietuvos metaliniai krikštai, arklių klumpės ir kt. Muziejuje veikia kalvė, kurioje galima išgyti originalių kalvių dirbinių.



3 pav. Kalvystės muziejus Klaipėdoje

Žinoma, kad arkliai visada turi būti tvarkingai pakaustyti, kad akmenys nedurtų, kad ant ledo nepaslystų. Pasagą kalvis gamindavo

iš žaizdre įkaitinto metalo. Kad ugnis būtų karštesnė, pūsdavo dumplėmis – tai buvo pameistro („gizelio“) pareiga. Pati pasaga „gimdavo“ ant priekalo. Kiekviena *pasaga būdavo kaldinama pagal arklio kanopos dydį*, prie kanopos ją prikaldavo uknoliais (mažai pasagai jų reikia 6–7, didelei – 8–10) (arklio kanopos yra suragėjusios, todėl kalant jam neskauda). Jau nuo XIV a. Europoje tikėta, kad kelyje rasta nudilusi pasaga, pakabinta virš durų ant staktos, atneša laimę.

Šiuolaikiniai kalybos gaminiai, norint juos apsaugoti nuo korozijos ar išgauti reikiamą spalvą bei savybes, dažnai dengiami specialia danga. Tam taikomos įvairios technologijos: *apvirinimas*, *purškimas* (žr. 3.4 skyrių), anodinis mikrolankinis oksidavimas ir kt.

Net nežinia, nuo kada metalas pradėtas naudoti ne tik lauke (pradedant kapinių kryžiais ir baigiant tvoromis bei vartais), bet ir namuose, tik aišku, kad čia jis įsitvirtino ilgam: iš jo daromi laiptų turėklai, baldai, dekoratyvinės interjero detalės (4, 5 pav.). Kalvis Raimondas Vaitkūnas sako, kad tikriausiai *nėra tokio daikto, kurio negalima būtų nukaldinti*. Įmanomas net metalinio kambario variantas (kitas dalykas, ar jauku būtų tokiame gyventi?). Vis dėlto gražiausia, kai ši medžiaga derinama su kitomis: akmeniu, medžiu, moliu. Kalviai gali atlikti bet kokią užsakymą. Problema – tradicinis mūsų skonis, nenoriai įsileidžiantis originalesnio dizaino metalinius gaminius į namus. Palyginti nedaug yra dizainerių, kuriančių įdomesnius projektus, kuriuos galėtų atlikti kalviai.



4 pav. Kalvio darbo turėklai



5 pav. Malkinė

Dar senovėje žmonės suprato, jog metalu papuoštos, kaustytos durys tampa neįveikiamos išibrovėliams. Nuo tada *geležis atlieka dar ir apsauginį vaidmenį*. Juk ir dabar mes įsirengiame šarvuotas, metalu dengtas duris, įtaisome grotas languose.

## 4.2. Elektrolankinis suvirinimas

Elektrolankinis suvirinimas pradėtas taikyti tik XIX a. pradžioje, kadangi iki to laiko nebuvo elektros energijos šaltinio, o ir dėl pačios elektros srovės sąvokos buvo ginčijamasi.

### 4.2.1. Pirmojo elektros energijos šaltinio sukūrimas

Mokslo apie elektrą pradininkai buvo italų mokslininkai: anatomas ir fiziologas *Luidžis Galvanis* (1737–1798) ir fizikas *Alesandras Volta* (1745–1827). Įdomus jų mokslinis ginčas dėl „gyvūnų elektros“ [16]. 1791 m. L. Galvanis paskelbė knygą „Traktatas apie elektrines jėgas, judant raumenims“. Jis iškėlė hipotezę, kad raumenyse kaupiasi elektrinės kilmės krūvis, kuris, užsidarius grandinei, nervuose sukelia elektros srovę ir raumens susitraukimą. Bolonijos universitete buvo atlikti eksperimentai su varlės raumenų preparatais. A. Volta, nenorėdamas pripažinti „gyvūnų elektros“, kūrė įvairiausias alternatyvias teorijas. 1794 m., atlikęs seriją bandymų, jis pripažino L. Galvanio tiesą, bet po devynių dienų pradėjo naują jo teorijos puolimą, aiškindamas, kad elektra atsiranda dėl skirtingų metalų sąlyčio savybių. Abu mokslininkai įnirtingai gynė savąsias tiesas, pagrįsdami jas vis naujų eksperimentų duomenimis. Pavyzdžiui, L. Galvanis aptiko potencialų skirtumą metalui liečiantis su elektrolitu (ne veltui elektrinės baterijos vadinamos galvaniniais elementais, o prietaisas, reaguojantis į labai mažas sroves ar įtampas, – galvanometru).

Tuo metu atrodė, kad ginčą laimėjo A. Volta. Šiandien mes jau žinome, kad abu mokslininkai buvo teisūs. Jų ginčas davė pradžią *elektrofiziologijai, elektrochemijai, termoelektrai*.

1795 m. A. Volta atrado skirtingų metalų sąlyčio elektrą (*sąlyčio potencialą*) ir 1796 m. suformulavo du dėsnius apie to potencialo savybes, kurie vadinami Voltos dėsniais.

Dar 1792 m. A. Volta pakartojo L. Galvanio bandymus su varlėmis. Paminėsime vieną iš jų – prie išpreparuotų varlės raumenų

pridėdavo dviejų skirtingų metalų (pvz., geležies ir vario) kontakto laisvuosius galus – raumenys susitraukdavo. 1794 m. Voltai pavyko sukurti silpną elektros srovės šaltinį, vadinamą galvaniniu arba Voltos elementu. Jį sudarė du skirtingi metalai, atskirti drėgna medžiaga. Norėdamas padidinti efektą, jis pradėjo tyrinėti tokių elementų „grandines“. 1799 m. pabaigoje A. Voltai pavyko pasiekti tikslą: sujungęs apie 60 vario (sidabro) ir alavo (cinko) elementų nuosekliai, tarp kurių buvo medžiaga, suvilgyta natrio chlorido (sieros rūgšties) tirpalu, gavo įtampą tarp kraštutinių metalų, proporcingą elementų porų skaičiui. Pats A. Volta rašė [17], kad jo tyrimų „svarbiausias rezultatas – tai *prietaisas*, kuris savo poveikiu, t. y. rankos sukrėtimu, tolygus Leideno stiklinei, tačiau *veikia nepertraukiamai*, t. y. jo krūvis po kiekvieno išlydžio pats atsistato; kitaip sakant, šitas prietaisas sukuria nesunaikinamą krūvį, suteikia nepertraukiamą impulsą elektriniam fluidui“. Šį prietaisą A. Volta pavadino „elektrovaros aparatu“ arba „kolona“, kadangi jame elementai buvo sudėti vienas ant kito. Vėliau prancūzai jį pradėjo vadinti „Galvanio stulpu“ arba „Voltos stulpu“. Taip buvo sukurtas pirmasis elektros energijos šaltinis – *elektrocheminis galvaninis elementas*.

1801 m. A. Volta buvo pakviestas į Prancūzijos institutą (*Institut de France*), kur, dalyvaujant ir Napoleonui, demonstravo savo bandymus. Napoleonui pasiūlius, nusižengiant konsulo įstatams, A. Voltai buvo nukalta auksinė moneta. Jis buvo išrinktas garbės nariu, gavo didelę piniginę dovaną. Napoleonas jam suteikė grafo ir Lombardijos kunigaikštystės senatoriaus titulą. Beveik visos Europos akademijos A. Voltą išrinko savo nariu.

Ilgainiui buvo išaiškintos Voltos stulpo cheminės reakcijos, atsirado elektrochemija, daug naujų srovės elementų, vis įvairesnis tapo jų pritaikymas. Tuo požiūriu įdomi yra N. Lamtevo šio amžiaus pradžioje išėjusi knyga „Sausieji galvaniniai elementai“ (sausaisiais čia vadinami tokie elementai, kuriuose nėra laisvojo vandens; toks buvo ir Voltos stulpas). Toje knygoje galima suskaičiuoti *net 80 srovės elementų rūšių* ar tipų. Autorius nurodo, kad „elementai

daugiausia naudojami motorams užvesti ir kišeniniams žiebtuvėliams. Jie dar naudojami elektros skambučiams, elektrinėms žvakėms, žibalinėms lempoms elektra uždegti, iliuminacijoms, laikrodžiams apšviesti, šviečiančioms sagėms, segtukams“.

#### 4.2.2. Elektros lanko atradimas ir pritaikymas

1802 m. Sankt Peterburgo medicinos akademijos profesorius *Vasilijus Petrovas gavo elektros išlydį* dujose ir taip *atrado elektros lanką* (vėliau jis buvo pavadintas Voltos lanku). V. Petrovas pirmasis iš fizikų suprato galimus aukštosios įtampos maitinimo šaltinio privalumus ir patobulino Voltos stulpo elektrocheminį elektros energijos šaltinį, kurio veikimas pagrįstas cheminiais procesais, vykstančiais tarp dviejų metalų ir elektrolito. Buvo pagaminta galvaninė baterija iš 2 100 porų nuosekliai sujungtų vario ir cinko skridinėlių, izoliuotų vienas nuo kito suvilgytais amoniako tirpalu (elektrolitu) popieriaus lapeliais. Tokios elektrinės baterijos elektrovara siekė 1 700 V, jos visiškai pakako gauti stabiliam nuolatinės srovės išlydžiui dujose. V. Petrovas atliko tyrimus savo fizikos laboratorijoje (Sankt Peterburge), leisdamas elektros srovę per anglies strypelius. Kai mokslininkas priartino du anglies gabaliukus vieną prie kito taip, kad jie susilietė, anglis įkaito iki baltumo, o kai iš lėto juos išskyrė – plykstelėjo akinamai skausiai šviesa. V. Petrovas pastebėjo, kad anglies strypelių (faktiškai tai buvo pirmieji elektrodai) galai, tarp kurių užsidegė lankas, *įkaito iki 3000 °C*. Taip buvo išrastas elektros lankas. Šis atradimas turėjo didžiulę reikšmę daugelio mokslo sričių (ypač fizikos) ir technikos vystymuisi.

Nepriklausomai nuo V. Petrovo, tačiau daug vėliau (1809 m.) elektros lanką gavo anglų fizikas G. Devi.

1803 m. V. Petrovas savo tyrimų rezultatus, išvadas ir savo atradimo perspektyvas aprašė knygoje „Известие о гальвани-вольтовских опытах“ („Žinios apie galvaninius-voltinius bandymus“). Joje aprašyti elektros išlydžio ir šviesos spinduliavimo

ypatumai praretintuose dujose (gauti didelį vakuumą nebuvo galimybių), nustatyta šių reiškinių priklausomybė nuo elektrodų poliškumo, medžiagos, formos ir tarpelio tarp elektrodų. Be to, *nustatytos elektros srovės priklausomybės nuo laidininko skerspjūvio ploto*. Vokiečių fizikas Georgas Simonas Omas suformulavo šį dėsnį, žinomą Omo dėsnio vardu, tik 1826 m.!

Savo tyrimais V. Petrovas *parodė praktines elektros lanko pritaikymo galimybes, t. y. jis gali būti taikomas apšvietimui, metalų lydymui* ir grynųjų metalų išskyrimui iš jų oksidų. Pavyzdžiui, buvo nustatyta, kad elektros srove kaitinamas anglinis elektrodas beorėje erdvėje skleidžia intensyvią šviesą, tačiau pats nesudega! Šis principas vėliau buvo pritaikytas prožektoriuose, kuriuose *šviesos šaltinį sudarė elektros lankas*, degantis tarp dviejų anglinių elektrodų. Lanko stabilumas ir galingumas reguliuojamas keičiant tarpelį tarp elektrodų. Tokiu principu veikiantys galingi prožektoriai buvo naudojami Antrojo pasaulinio karo metais naktį ieškant priešo lėktuvų. Jeigu V. Petrovo darbai būtų buvę tęsiami ir po jo mirties (1834 m.), tai būtų palengvinę ir pagreitinę elektrinės kaitinamosios lempos išradimą (elektrotermijos pradininkas A. Lodyginas sukūrė ir užpatentavo anglinę kaitinamąją lempą tik 1874 m.).

1812 m. rusų mokslininkas P. L. Šilingas pritaikė elektros išlydį – sukūrė pirmąjį *elektros degiklį* povandeninių minų užsiliepsnojimui.

Pakeitęs anglinius elektrodus metaliniais, V. Petrovas aptiko, kad metalas gali lydytis ir degti, tekant elektros srovei. Jis rašė: „Elektrodų iš vielos galai paraudonuoja, greitai išsilydo ir pradeda degti su liepsna, svaitydami daugybę žiežirbų“. Vėliau rusų mokslininkai N. N. Benardosas ir N. G. Slavianovas panaudojo elektros lanką su angliniais ir metaliniais elektrodais (žr. 4.2.5. skyrių) metalams suvirinti.

#### 4.2.3. Pirmasis litavimo gamybinis pritaikymas

1871 m. Permėje prie Danilichos upės pradėjo veikti pirmasis Rusijoje fabrikas, gaminantis fosforą. Įmonės savininku tapo buvęs Vladimiro gubernijos baudžiauninkas Evgrafas Tupicinas.

E. Tupicino fabrikas iš pradžių gamino geltonąjį fosforą, kurio transportavimas buvo labai sunkus ir pavojingas. Pagamintą fosforą dėdavo į statines su vandeniu, kad neužsidegtų. Tačiau nuo kratymo važiuojant blogais Rusijos keliais vežimais be amortizacijos kai kurios statinės prarasdavo sandarumą, vanduo išbėgdavo ir sausas fosforas nuo trinties užsidegdavo arba net sprogdavo.

Būdamas užsienyje E. Tupicinas sužinojo apie Cerenerio metalų suvirinimo būdą elektros srove (žr. 4.2.4. skyrių) ir nutarė savo gamykloje skardines su fosforu bandyti užlituoti kaitinant jas elektros srove (gamykloje buvo nedidelė elektros stotis – nuolatinės srovės generatorius, sukamas kaip malūnas Danilichos upės vandeniui).

Ant specialaus keraminio stalo buvo guldoma metalinė plokštė, sujungta su neigiamuoju generatoriaus poliumi. Teigiamasis generatoriaus polius buvo sujungiamas su specialiu metaliniu elektrodu, kuriam E. Tupicinas sukūrė specialią pusautomatę pasukamą rankeną – laikiklį. Ant metalinės plokštės būdavo statoma metalinė skardinė su nedidele skylė, pro kurią pildavo fosforą ir vandenį. Litavimui buvo naudojamas specialus lydinys, kurį sudarė lygios alavo ir švino dalys (ir dabar naudojami panašūs lydiniai, vadinami lydmetaliais, pvz., rusiškas ПOC40 turi 40 % Sn ir 60 % Pb). Metaliniam elektrodui susiliečiant su skardine imdavo tekėti elektros srovė, kuri išlydydavo lydmetalį ir juo padengdavo skardinės kraštus nors ir nelygiu, bet pakankamai stipriu sluoksniu. Užbaigus lituoti srovę išjungdavo, o apverstą statinę statydavo ant popieriaus tam, kad nustatytų galimus protėkius. Hermetiškas skardines sudėdavo į medines dėžes ir išsiųsdavo vartotojams.

Išrasto elektrinio litavimo būdo kaitinant elektros srove E. Tupicinas neužpatentavo. Jis gana greitai mirė, o perėmė jo verslą

sūnūs pradėjo gaminti raudonąjį fosforą, skirtą saugiams degtukams. Raudonojo fosforo transportavimas problemų nesudarė, ir E. Tupicino išradimas buvo užmirštas.

#### **4.2.4. Elektros srovės pritaikymas suvirinimui**

1849 m. amerikiečių mokslininkas K. Stetas teoriškai numatė galimybę sujungti metalus elektros srove. Jis netgi užpatentavo metalų sujungimo elektros srove naudojant maitinimo šaltinius iš galvaninių elementų (pakankamos galios elektros generatorių dar nebuvo) būdą. Todėl šis suvirinimo būdas negalėjo būti praktiškai taikomas.

Pirmąjį metalų suvirinimo elektros srove bandymą 1867 m. atliko amerikiečių inžinierius E. Tomsonas, kuris pritaikė neseniai atrastą Džoulio ir Lenco dėsnį, kad daugiausia šilumos, tekant elektros srovei, išsiskiria ten, kur yra didžiausia varža – detalių sąlyčio vietoje. E. Tomsonas stipriai suspausdavo du metalinius ruošinius ir leisdavo per juos didelę tačiau mažos įtampos elektros srovę (aukštosios įtampos elektros šaltinio tuomet dar nebuvo). Detalių sujungimo vietoje išsiskirdavo didelis šilumos kiekis, jų susiliečiančios briaunos apsilydydavo. Tuomet ruošiniai būdavo stipriai suspaudžiami (kaip ir atliekant kontaktinį suvirinimą) ir sukunami kūju (kalviškasis suvirinimas). Tiksliai detales suvirinti šiuo būdu neįmanoma dėl jų deformacijos. Galima laikyti, kad *E. Tomsonas yra kontaktinio (varžinio) suvirinimo išradėjas.*

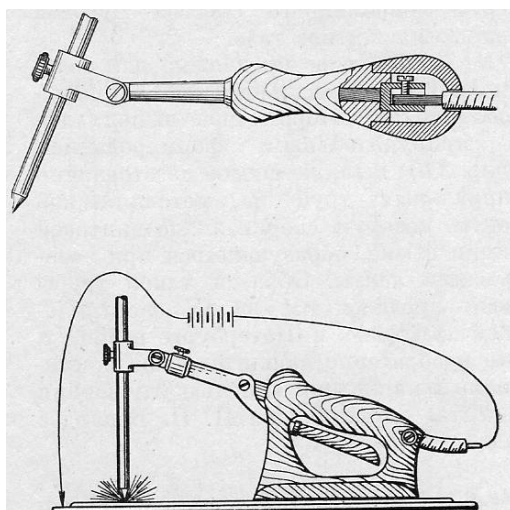
1868 m. vokiečių inžinierius G. Cereneris atliko metalų suvirinimą, naudodamas anglinius elektrodus. Specialiose suvirinimui skirtose staklėse detalės tvirtinamos lygiagrečiai viena su kita ant stovo. Dviejose staklių galvutėse lygiagrečiai vienas su kitu buvo įtvirtinti angliniai elektrodai, per kuriuos buvo leidžiama elektros srovė. Susidaręs elektros lankas greitai įkaitindavo suvirinamų detalių briaunas iki baltumo. Tada srovė būdavo išjungiama, o detalės staigiai suspaudžiamos ir dar pakalamos specialiu instrumentu.

Kaip matome, ir E. Tomsono, ir G. Cerenerio suvirinimo negalima laikyti suvirinimu grynai *elektros srove*, kadangi *elektra metalą tik įkaitindavo*, o suvirinimas būdavo užbaigiamas kalviškuoju (ar kontaktiniu) būdu.

Kokybiškas suvirinimas naudojant tik elektros srovę (ne lanką) buvo sukurtas tik 1949 m. akademiko J. Patono institute Kijevas (Ukraina). Visiškai naujas elektrinio suvirinimo lydymu būdas buvo pavadintas *elektrošlakiniu suvirinimu*. Tam teko sukurti specialų *elektrai laidų granuliuotą fliusą*, kuriuo užpildomas tarpelis tarp suvirinamų detalių. Elektrodinį metalą lydo ne lankas, o šiluma, išsiskirianti tekant per fliusą elektros srovei. Tai labai pagerino suvirinimo kokybę ir produktyvumą, leido mechanizuoti vertikaliųjų siūlių suvirinimą virinant praktiškai bet kokio storio metalą. Vėliau, taikant elektrošlakinę technologiją, buvo sukurtas naujas metalų rafinavimo (išvalymo, gerinimo) metodas, pavadintas *elektrošlakiniu perlydymu*.

#### **4.2.5. Elektros lanko naudojimas suvirinimui**

1881 m. rusų išradėjas *Nikolajus Benardosas* (iš tėvo pusės – graikas) sukūrė naujo tipo galingą elektros akumuliatorių bateriją, skirtą suvirinimo lankui maitinti nuolatine ir pakankama srove. Jam pavyko gauti *stabilų elektros lanką tarp anglinio elektrodo ir metalinio gaminio* ir atlikti suvirinimą. Sukurtas elektrolankinio suvirinimo būdas buvo pavadintas „elektrohefaistu“ (Hefaistas – senovės graikų ugnies ir kalvystės meno dievas). Savo išradimą N. Benardosas pademonstravo Paryžiaus tarptautinėje elektrotechnikos parodoje, suvirinimo įranga (6 pav.) buvo pagrindinis parodos eksponatas – ji buvo įvertinta aukso medaliu. 1882 m. N. Benardosas užpatentavo šį išradimą Rusijoje, o vėliau ir daugumoje išsivysčiusių šalių kaip „metalų sujungimo ir atskyrimo būdą tiesiogiai veikiant elektros srovei“.



6 pav. N. Benardoso lankinio suvirinimo elektrodų laikikliai

Be to, N. Benardosas išrado ir netiesioginio suvirinimo būdą (lankas dega tarp dviejų anglinių elektrodų), suvirinimo dujų sraute, metalų pjovimo ore ir po vandeniu būdus. 1887 m. kartu su anglų mokslininku E. Tomsonu jis užpatentavo naują suvirinimo būdą – kontaktinį suvirinimą: sujungiamos detalės įkaitinamos tekančia per jas elektros srove ir suspaudžiamos (žr. 4.2.4. skyrių). Iš viso N. Benardosas padarė daugiau nei 120 užregistruotų išradimų, kurie apėmė labai įvairias žmogaus veiklos sritis: varikliai, karinė įranga, elektrotechnikos gaminiai, transporto patobulinimai, buitinės chemijos naujovės, staklės ir mechanizmai. Iš įdomesnių išradimų paminėsime [19]: kondicionierių, skalbimo mašiną, dantų plombą, elektrinio lituoklio panaudojimą spyruoklėms grūdinti ir atkaitinti, garlaivį, gebantį įveikti seklumas ir pelkes; kintamosios srovės hidroelektrinę, elektrolitinį plieno paviršiaus padengimo variu būdą. 1900 m. rudenį N. Benardosas išrado pačią paprasčiausią konservų

dėžutę (amerikiečiai šį išradimą prisiskiria sau, nes jie pirmieji organizavo pramoninę konservų gamybą).

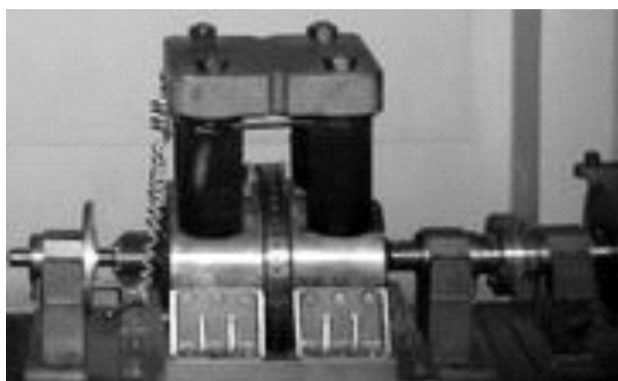
Lankinio suvirinimo būdas („elektrohefaistas“) iš karto pradėtas taikyti Vakaruose. Rusijoje dauguma N. Benardoso išradimų taip ir nebuvo pritaikyti. Žymusis išradėjas N. Benardosas turėjo didelių finansinių sunkumų – visas pelnas atitekdavo vikriems vertelgoms, kurie jo išradimus įdiegdavo pramonėje. 1899 m., kurdamas naujo tipo akumuliatorius su kempėtuuju švinu, Benardosas sunkiai apsinuodijo kenksmingais garais, kelerius metus sunkiai sirgo ir apie 1905 m. mirė užmarštyje ir skurde. Toks likimas buvo suvirinimo išradėjo, ir dabar net nežinoma nei tiksliai jo mirties data, nei kur jis palaidotas.

N. Benardoso lankinis suvirimo būdas angliniu elektrodu turėjo ir didelių trūkumų: buvo naudojama didžiulė nepatogi akumuliatorių baterija, o dalis anglies, pereidama iš elektrodo į išlydyto metalo vonelę, padidindavo siūlės kietumą ir trapumą. Tiesa, 1889 m. N. Benardosas suvirinimui pritaikė metalinį strypą, bet jam įkaitinti buvo naudojami net keli angliniai elektrodai, ir *siūlės įanglinimo* išvengti nepavykdavo.

Gerokai tobulesnį metalų suvirinimo būdą sukūrė rusų kalnų inžinierius, žymus išradėjas Nikolajus Slavianovas. 1887 m. pagal jo brėžinius ir skaičiavimus Permės patrankų gamykloje buvo pastatyta elektros stotis, susidedanti iš dviejų nuolatinės srovės generatorių. Sukimo momentas joms būdavo perduodamas nuo galingų garo mašinų, o ant skirstomųjų lentų pirmąkart pasaulyje buvo panaudota šynų instaliacija. Šie nuolatinės srovės generatoriai galėjo sukurti elektros srovę iki 1 000 A esant 60–100 V įtampai. Tokios galios visiškai pakako, kad šynas galima būtų panaudoti kaip suvirinimo generatorių elektros lankui maitinti. 1888 m. N. Slavianovas *pademonstravo lankinį suvirinimą metaliniu elektrodu* su išankstiniu metalo pakaitinimu. Savo išradimą jis pavadino „elektriniu metalų liejimu“ ir tais pačiais metais suvirino garo mašinos veleną. 1890–1891 m. N. Slavianovas užpatentavo elektrolankinį suvirinimo būdą daugumoje Europos valstybių. Suvirinimas atliekamas metaliniu

elektrodu, prie kurio prijungiamas vienas maitinimo šaltinio polius, o prie suvirinamo gaminio – kitas. Tekant elektros srovei sužadinamas elektros lankas, kuriam veikiant išsilydo elektrodo ir gaminio metalas. Lankui nutrūkus jis gęsta, išlydytas metalas sustingsta (kristalizuojasi) ir gaunamas neišardomas suvirintasis sujungimas. 1888 m. N. Slavianovas pirmasis lankui maitinti panaudojo *elektros generatorių* (7 pav.). Specialiai suvirinimui skirtas generatorius buvo sukurtas Austrijoje tik 1905 m.

N. Slavianovas pirmasis sukonstravo ir panaudojo mechanizuotą suvirinimo aparatą „elektrinį lydytuvą“ – automatinio suvirinimo prototipą (8 pav.), kurį naudojant buvo galima automatiškai reguliuoti lanko ilgį.



7 pav. N. Slavianovo elektros generatorius



8 pav. N. Slavianovo suvirinimo pusautomatis

Suvirinimo siūlės metalo kokybei pagerinti N. Slavianovas pasiūlė suvirinimo zoną nuo ore esančio deguonies, azoto apsaugoti šlaku. Į suvirinimo vonelę buvo mėtomas smulkintas stiklas (suvirinimo po fliusu prototipas). Stiklas išsilydydavo ir padengdavo metalą šlako plutele taip apsaugodamas siūlę nuo kenksmingo deguonies, azoto, vandenilio poveikio. N. Slavianovas pirmasis pritaikė siūlės metalo redukavimą pridėdamas į suvirinimo vonelę feromangano, ferochromo ir ferosilicio. Vykstant cheminėms reakcijoms oksidų pavidalu deguonis ( $MnO$ ,  $SiO_2$ ) pereinavo į šlaką.

1891 m. N. Slavianovas pasiūlė „metalo liejinių elektrinį sutankinimo“ būdą: iškart po liejimo liejinio viršutinė dalis pakaitinama elektros lanku, kad sumažėtų suslūgimo tuštumos ir gautųsi vienalytė metalo struktūra. Šiuo atveju dujos lengvai išeidavo iš skysto metalo ir net labai dideliuose liejiniuose (sveriančiuose iki

12 t) suslūgimo tuštumų praktiškai nesusidarydavo. Tačiau visiškai išvengti liejimo defektų nepavykdavo, ir jiems taisyti N. Slavianovas pradėjo taikyti elektrolankinį aplydymą ir pjovimą. Šis būdas plačiausiai buvo taikomas lietuvių varpų defektams taisyti. Nuo 1894 m. Permės patrankų gamykloje veikė specialus lietuvių varpų defektų taisymo lankinio suvirinimo būdu cechasis (tokia technologija taikoma ir dabar). Todėl Rusijos Cerkvė viena iš pirmųjų įvertino N. Slavianovo išradimus.

Nemažas N. Slavianovo nuopelnas kuriant naujus patrankų sviedinius. Tuo metu buvo pradėti eksploatuoti nauji kariniai laivai, kurių korpusai buvo šarvuoti metalinėmis plokštėmis. Sferiniai sviediniai nepramušdavo šarvuotojo laivo borto. Rusijoje gaminami grūdinti sviediniai, atsitrekdami į šarvuotlaivį, patys sutrupėdavo nė kiek nepakenkdami laivui. Padedant N. Slavianovui buvo sukurta ir pagaminta partija sferinių sviedinių iš specialaus liejamojo plieno, kuriuos išbandė Motovilichino poligone. Rezultatai gauti geresni, nei buvo tikėtasi: naujasis sviedinys pramušė šešių colių (15,2 cm) storio šarvo plokštę.

To meto amerikiečių spauda apskritai teigiamai įvertino N. Slavianovo išradimus, tačiau buvo rašoma, kad toks suvirinimo būdas netinka spalvotiesiems metalams (neva siūlė bus labai nepatvari, o sujungti spalvotuosius metalus su juodaisiais visai neįmanoma). Atsakydamas į tai *N. Slavianovas užvirino vienas ant kito 8 skirtingus metalus*. Buvo suvirinta: varpų bronzas, tombakas (vario ir cinko (3–10 %) lydinys), nikelis, plienas, ketus, varis, naujasidabris (sidabro spalvos vario – nikelio (5–35 %) ir cinko (13–45 %) lydinys), bronzas. Iš šių suvirintų lydinų buvo pagamintos dvi po penkis kilogramus sveriančios stiklinės (21 cm aukščio). Viena iš jų buvo demonstruojama Peterburgo ketvirtojoje elektrotechnikos parodoje (1892 m.), kita nusiųsta į Pasaulinę elektrotechnikos parodą (1893 m. JAV, Čikaga). Ji buvo įvertinta aukso medaliais. Dabar viena iš šių stiklinių saugoma Sankt Peterburgo politechnikos instituto muziejuje (7 pav.), o kita – Permės kraštytyros muziejuje.



9 pav. Iš įvairiarūšių metalų suldyta stiklinė

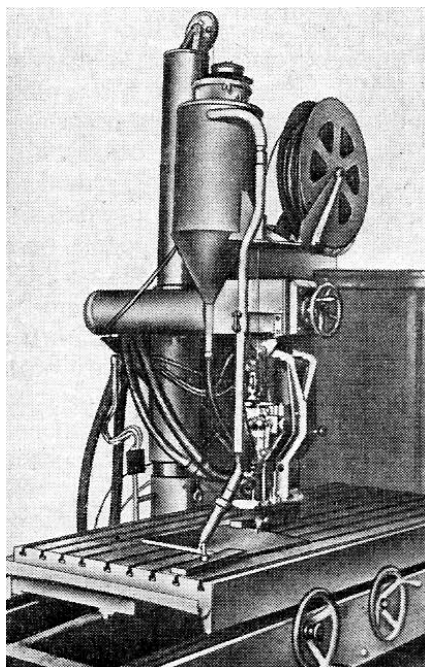
#### 4.2.6. Elektrolankinio suvirinimo raida

Suvirintųjų sujungimų, atliktų N. Slaviano išrastu suvirinimo būdu metaliniu elektrodu, kokybė buvo gana prasta dėl nepakankamos suvirinimo zonos apsaugos. 1907 m. švedų inžinierius O. Kelbergas tyrinėjo lubinių siūlių atlikimo galimybes. Kad išvengtų skysto metalo nutekėjimo, metalinį elektrodą jis padengė specialia danga ir pastebėjo, kad padidėjo lanko stabilumas dėl geresnės suvirinimo zonos apsaugos. Danga, lydydamasi kartu su metalu, apsaugo jį nuo žalingo oro poveikio (oksidavimo, azotinimo) ir stabilizuoja lanko degimą. Taip buvo išrastas *suvirinimo glaistytaisiais elektrodais* būdas. 1917 m. amerikiečių inžinieriai O. Andrus ir D. Stresau sukūrė elektrodą, kurio plieninis strypas

buvo apsuktas natrio silikatu (skystuoju stiklu) priklijuota popieriaus juostele. Dūmai, kurie išsiskirdavo degant popieriui, gerindavo suvirinimo zonos apsaugą, o lanko iškrovoje esantis natrias turėjo žemą jonizacijos laipsnį, didino lanko stabilumą. Buvo pradėta masinė glaistytųjų elektrodų gamyba. Švediškai bei amerikietiški elektrodai ir dabar vieni iš geriausių pasaulyje (pvz., pagaminti švedų firmos *ESAB*). Rusijoje (Leningrade) 1938 m. buvo sukurti populiarūs elektrodai YOHI-13, kurių įvairios modifikacijos gaminamos ir šiuo metu. Šiuolaikinių elektrodų glaistas yra sudarytas iš trijų rūšių komponentų: redukuojančiųjų (siekiama iš suvirinimo vonelės pašalinti deguonį); gaminančių apsaugines dujas bei sudarančių šlaką; legiruojančiųjų (nes dalis būtinų siūlės cheminių elementų išdega). Glaistytieji elektrodai rankiniam lankiniam suvirinimui gaminami ir Lietuvoje („Anykščių varis“). Nauji elektrodai labai pagerino suvirintųjų sujungimų kokybę, ir rankinis lankinis suvirinimas greitai paplito daugumoje išsivysčiusių šalių. XX a. pirmojo ketvirčio pabaigoje rankinis lankinis suvirinimas lydzioju elektrodu tapo pagrindiniu metalų suvirinimo būdu, jis plačiai taikomas ir dabar, ypač statybose, remonto ir montavimo darbuose.

Suvirinimo technologijos, įrangos, suvirintųjų konstrukcijų stiprumo tyrimo srityse daug nuveikė Rusijos mokslininkai, dirbę įvairiuose šalies regionuose: Vladivostoke N. Rykalinas (šiluminių procesų teorija suvirinant), Maskvoje K. Chrenovas (lanko teorija, be to, jis atliko suvirinimą po vandeniu), G. Nikolajevas (Baumano technikos universiteto rektorius, Suvirinimo katedros vedėjas, suvirintųjų konstrukcijų stiprumo skaičiavimo autorius), Leningrade V. Nikitinas (1924 m. jis sukūrė vieną iš pirmųjų suvirinimo transformatorių CTH). 1929 m. Kijeve akademikas Jevgenijus Patonas (Е. О. Патон) įkūrė suvirinimo laboratoriją, kuri vėliau išaugo į visame pasaulyje garsų *Elektros suvirinimo institutą*. Jame 1939 m. buvo sukurtas naujas suvirinimo būdas – *automatinis suvirinimas po fliusu*. Elektrodinė viela mechanizuotai buvo tiekiamą į suvirinimo zoną po fliuso sluoksniu (10 pav.), o pats suvirinimo

procesas buvo automatizuotas (vielos tiekimo mechanizmas su fliuso bunkeriu buvo įrengtas ant specialaus vežimėlio, kuris judėjo automatiškai nustatytu reikiamu greičiu). Lankas degė po granuliuotu fliuso sluoksniu, ir išsilydęs *fliusas sudarydavo labai gerą skysto metalo apsaugą* suvirinimo metu ir pačios siūlės apsaugą po suvirinimo (nes ji būna padengta šlako plutele iš išsilydžiusio fliuso).



10 pav. Pirmasis laboratorinis suvirinimo po fliusu įrenginys

Taikant šį būdą buvo galima gerokai padidinti lanko galingumą, procesas paspartėjo 5–10 kartų, siūlė būna kokybiškesnė ir lygesnė, be to, gaunama suvirinimo medžiagų ir priemonių ekonomija [21] (nėra elektrodų likučių, fliusas naudojamas

pakartotinai). JAV suvirinimą po fliusu viena iš pirmųjų pradėjo taikyti žymi ir dabar *Linde* firma. Antrojo pasaulinio karo metais J. Patonas įdiegė automatizuoto suvirinimo po fliusu būdą Uralo gamyklose, ir tai leido daug greičiau gaminti galingą karo techniką. *Liejamieji gaminiai (liejiniai) buvo keičiami suvirintaisiais*, kurie būdavo lengvesni ir patvaresni (pavyzdžiui, rusų gamybos tankas T-34 buvo lengvesnis ir manevringesnis, palyginti su vokiečių „Tigru“).

Nuo 1948 m. įvairiose šalyse pradėtas taikyti *elektrolankinis suvirinimas apsauginėse inertinėse dujose* (Ag, He). Įsisavintas rankinis suvirinimas nelydžiuoju elektrodu (vėliau pavadintas TIG suvirinimu (tai angliško pavadinimo *tungsten inert gas* „suvirinimas volframinio elektrodu inertinėse dujose“ santrumpa). Šiek tiek vėliau paplito suvirinimas pusautomačiais (mechanizuotas tik vielos tiekimas) ir automatinis suvirinimas lydžiuoju elektrodu (MIG suvirinimas – *melting inert gas* „suvirinimas lydomuoju elektrodu inertinėse dujose“).

1950–1952 m. Centriniam mašinų gamybos mokslo tyrimo institute (ЦНИИТМАШ – Rusija) buvo sukurtas ir iškart į gamybą įdiegtas *lankinis suvirinimas anglies dvideginio dujų aplinkoje* (vėliau užsienyje jis pavadintas MAG suvirinimu (*melting active gas* „suvirinimas lydomuoju elektrodu aktyviose dujose“). Šis būdas pasižymi universalumu (suvirinimas pusautomačiais ir automatinis), dideliu produktyvumu ir ekonomišku ( $\text{CO}_2$  dujos kelis kartus pigesnės už Ar ar He dujas).

1958 m. Sąjunginiame elektros suvirinimo mokslo tyrimo institute (ВНИИЭСО – Rusija, Leningradas) pradėtas taikyti *plazminio suvirinimo ir pjovimo būdas* [22]: lanko stulpas suspaudžiamas specialiuose degikliuose – *plazmotronuose*. Tai labai padidinta koncentruoto lanko temperatūrą – ji siekia iki 30 000 °C. Buvo sukurta ir pagaminta populiari plazminio pjovimo įranga, kadangi tapo *įmanoma pjauti gerokai storesnį metalo sluoksnį* (iki 300 mm). Buvo sukurti ir netiesioginio veikimo plazmotronai,

kuriuose lankas dega tarp nelydžiojo elektrodo ir tūtos. Naudojant tokius plazmotronus galima pjauti ir nemetalines medžiagas.

1961 m. Vilniaus suvirinimo gamyklos teritorijoje buvo įsteigtas Sąjunginio elektros suvirinimo mokslo tyrimo instituto Vilniaus skyrius (ВО ВНИИЭСО). Vilniaus elektros suvirinimo įrengimų gamykla (VESIG) buvo didžiausia Europoje. Joje buvo gaminami elektros lanko maitinimo šaltiniai: *suvirinimo transformatoriai*, *lygintuvai*, *suvirinimo keitikliai* (elektros variklis, sujungtas su generatoriumi), *agregatai* (vidaus degimo variklis, sujungtas su suvirinimo generatoriumi). Instituto Elektros mašinų laboratorijoje buvo sukurtas visiškai naujos konstrukcijos *induktorinis suvirinimo generatorius*, neturintis kolektoriaus ir šepetėlių (kolektrinių generatorių didžiulis trūkumas tas, kad tarp anglinių šepetėlių ir besisukančio kolektoriaus vyksta kibirkščiavimas, šie mazgai greitai susidėvi ir tenka keisti šepetėlius). Naujajame *generatoriuje nėra besisukančių apvijų*: kintamąjį magnetinį lauką sukuria du besisukantys elektrotechninio plieno polių paketai. Tarp šių paketų yra nejudamai įtvirtinta žadinimo apvija. Kintamoji srovė gaunama tiesiog statoriaus apvijoje ir išlyginama naudojant ventilius (galingus diodus). 1979 m. buvo sukurtas ir įdiegtas į gamybą tokio tipo keturių postų generatorius. Prie jo vienu metu gali dirbti keturi suvirintojai (tuo metu reikėjo virinti didelio skersmens magistralinius vamzdynus).

Nuo 1962 m. buvo atlikti pirmieji impulsinio-lankinio proceso tyrimai. Šį procesą ypač paspartino naujų lanko maitinimo šaltinių sukūrimas, naudojant tarpinius *aukštojo dažnio keitiklius*. 1978–1980 m. švedų firmos *ESAB*, suomių firmos *Kemppi* sukurti pirmieji aukštojo dažnio inverteriniai lanko maitinimo šaltiniai padarė tikrą perversmą šioje srityje. Tarpinio aukštadažnio keitiklio naudojimas sumažino lanko maitinimo šaltinio matmenis ir masę daugiau nei dešimt kartų! (Spalvotojo televizoriaus masė sumažėjo perpus, kai jo maitinimo blokui buvo pradėti naudoti aukštadažniai inverteriai.) Naudojant *aukštadažnius inverterius* buvo sukurti *impulsiniai suvirinimo šaltiniai*, galintys realizuoti praktiškai bet kokią srovės

moduliaciją. Pavyzdžiui, yra nustatyta [23], kad aukštadažnės moduliotosios srovės pulsacijos (20–30 kHz) gerina lanko stabilumą ir padidina jo pralydymo gylį. Vidutinio dažnio srovės impulsais (30–200 Hz) galima valdyti elektrodinio metalo pernešimą ir sumažinti skysto metalo ištaškymą. Tai įmanoma padaryti parenkant srovės impulsų dažnį, atitinkantį skysto metalo lašų pernešimo dažnį. Žemadažniai moduliotosios srovės impulsai (1–10 Hz), t. y. lanko pulsacijos, veikia skysto metalo vonele, turi įtakos siūlės formavimui, gerina jos metalo struktūrą, reguliuoja suvirinamų detalių terminį ciklą, sumažina deformacijų lygį bei įtrūkių atsiradimo tikimybę. Todėl pastaruoju metu *impulsinė srovė* vis dažniau naudojama rankiniam bei automatiniam lankiniam suvirinimui, kuriami nauji maitinimo šaltiniai, galintys realizuoti *dvigubos ar net trigubos moduliacijos* būtiną srovę.

#### 4.3. Dujinis suvirinimas

Tai suvirinimas naudojant acetileno (ar kitų degiųjų dujų) ir deguonies mišinio liepsną. Olandų išradėjas K. Drebbas dar XVII a. pradžioje atrado *deguonį* – išskyrė ją kaitindamas salietrą. Šis atradimas buvo laikomas paslapyje, nes deguonis buvo panaudotas K. Drebbos išrastoje povandeninėje valtyje. Atradimas neturėjo įtakos mokslo raidai dar ir dėl to, kad deguonis buvo brangus, o jo kiekiai riboti. 1895 m. vokiečių fizikas Karlas Lindė sukūrė ir įdiegė oro skystinimo įrenginį, o 1902 m. pagamino rektifikacinį skystojo oro skaidymo aparatą, išskiriantį iš oro deguonį (šildant skystąjį orą pirmasis išsiskiria azotas, kurio virimo temperatūra yra 196 °C, o vėliau – deguonis, nes jo aukštesnė virimo temperatūra (185 °C). Nuo to laiko prasidėjo pramoninė deguonies gamyba, jis pradėtas taikyti įvairiose srityse (chemijoje, medicinoje ir kt.). 1893–1895 m. buvo pradėta pramoninė *kalcio karbido* gavyba, iš kurio, jam reaguojant su vandeniu, lengvai *išgaunamos acetileno dujos*. Dujinio suvirinimo būdą padėjo sukurti dujų mišinių degimo tyrimai, atlikti prancūzų mokslininko Anri Lui Le Šateljė. 1895 m. jis padarė

pranešimą Prancūzijos mokslo akademijoje apie tai, kad, degant acetileno ir deguonies mišiniui, buvo gauta liepsna, kurios temperatūra viršija 3 000 °C (ji pakankama metalui lydyti).

Praktiniam A. L. Šateljė atradimo pritaikymui reikėjo specialios aparatūros. 1900 m. prancūzų inžinieriai Edmonas Fušė (Fouche) ir Šarlis Pikaras sukūrė pagrindinį dujinio suvirinimo įrenginį – *acetileno ir deguonies degiklį* (liepsnos temperatūra siekė 3 100 °C). Pasiūlytų degiklių konstrukcijos praktiškai nepakito iki šių laikų: juose *sumaišomos degiosios dujos su deguonimi* ir gaunama reikiamos galios bei formos stabili liepsna. 1903 m. E. Fušė tokiais degikliais atliko pirmuosius metalų suvirinimo bandymus ir gavo pakankamai geros kokybės neišardomus sujungimus.

Rusijoje dujinis suvirinimas pirmąkart buvo pademonstruotas 1906 m. Maskvos technikos mokykloje (dabar Baumano technikos universitetas). Dujinis suvirinimas buvo taikomas liejinių brokui taisyti, remonto darbams ir kai kurioms nelabai svarbioms konstrukcijoms suvirinti naudojant injekcinius degiklius (su mažu ir vidutiniu acetileno slėgiu).

Dujinis suvirinimas paplito po 1920 m., kai buvo pagaminti pramoniniai patikimi *acetileno generatoriai* (įrenginiai, kuriuose kalcio karbidui reaguojant su vandeniu gaunamos acetileno dujos). Pavyzdžiui, 1926 m. buvo sukurta JAV ir Rusijos akcinė bendruomenė „Paraz“ (nuo rusiško žodžio *газ* „dujos“), kuri gamino patikimus acetileno generatorius, įvairius suvirinimo degiklius ir *reduktorius* (įrenginius, rodančius dujų slėgį ir reguliuojančius jo išėigą). Tuo metu daugumoje šalių plačiausiai buvo taikomas dujinis suvirinimas, nes dar neturėta pakankamai elektrolankinio suvirinimo įrangos (transformatorių, lygintuvų, suvirinimo generatorių).

Pokario metais dujinį suvirinimą daugelyje pramonės šakų išstūmė *elektrinis suvirinimas*, nes jis yra paprastesnis, pigesnis, patogesnis, lengviau automatizuojamas. Tačiau dujinis suvirinimas liko nepakeičiamas remonto, santechnikos darbuose ir virinant nedidelio storio gaminius (ypač skardas, mažo skersmens *plonasienius vamzdžius*).

Dujų liepsna buvo taikoma ne tik suvirinimui, bet ir *apvirinimo darbams* (pvz., sudilusioms detalėms atkurti). Pradėtas taikyti dujinis-fliusinis apvirinimas (gauta gera suvirinimo zonos apsauga). Ypač patogu dujų liepsna atlikti metalų *paviršinių grūdinimą*, juos *įkaitinti*, taisyti (ypač liejinius). Sukurtos naujos parengiamojo ir lydinčiojo įkaitinimo liepsna technologijos virinant elektros lanku, kurios leidžia pagerinti siūlės metalo struktūrą, reguliuoti suvirinamų detalių terminį ciklą, sumažinti suvirinimo deformacijas ir išvengti įtrūkių.

Dar trečiajame dešimtmetyje buvo sukurtas ir pritaikytas praktiškai *dujinio metalizavimo* būdas. Šeštajame dešimtmetyje buvo kuriami nauji dangų padengimo būdai, taikant miltelinę technologiją ir dujų liepsną. Sukurti *plazminio užpurškimo* būdai, naudojant miltelinę vielą. Pastaraisiais metais kuriamos naujos terminio purškimo technologijos, naudojant specialius elektrodus arba *miltelines medžiagas* (žr. 3.5. skyrių).

#### 4.4. Dujinis pjovimas

1904 m. prancūzų inžinierius Edmonas Fušė (Fouche) modernizavo (sukurtą kartu su Š. Pikaru) *degiklį*, skirtą dujiniam suvirinimui, ir panaudojo jį pjovimui.

1908–1909 m. Vokietijoje ir Anglijoje buvo atlikti pirmieji *pjovimo po vandeniu* bandymai, tam buvo sukurti specialūs degikliai, kurie nuo 1917 m. buvo naudojami JAV ir Anglijos laivynuose.

Dujinis pjovimas paplito trečiame XX a. dešimtmetyje. Įvairiose šalyse sukurti specialūs *pjovimo degikliai*, kuriuose gaunama kaitinanti liepsna (deguonies ir degiųjų dujų mišinys) ir papildomai vyksta gryno deguonies (pjovimo deguonis) tiekimas į pjovimo zoną. Kaitinanti liepsna metalą įkaitina iki temperatūros, artimos jo lydymosi temperatūrai, o pjaunančiojo deguonies čiurkšlė sudegina metalą ir pašalina iš pjūvio susidarančius oksidus. Pjovimą palengvina šiluma, išsiskirianti reaguojant deguoniui su išlydyta geležimi (egzoterminė reakcija). Todėl šis pjovimo būdas buvo

pavadintas *deguoniniu pjovimu*. Didžiausia pjovimo temperatūra gaunama naudojant acetileno dujas, tačiau buvo sukurti specialūs degikliai, naudojantys gamtines, propano-butano, pirolizines dujas, taip pat žibalo ir benzino garus (kadangi acetileno dujos gana brangios). Deguoninis pjovimas tinka mažangliams, vidutinio anglingumo ir mažai legiruotiems (kuriuose anglies yra iki 0,3 %) plienams pjauti.

Tačiau toks pjovimo būdas netiko nerūdijantiems, kitiems gausiai legiruotiems plienams, ketui, variui ir jo lydiniams pjauti, nes šių metalų oksidai sunkiai lydosi (jeigu oksidų lydymosi temperatūra aukštesnė už metalo, pjauti deguonimi visiškai neįmanoma). Šeštajame dešimtmetyje tokiems metalams ir lydiniams pjauti buvo sukurtas ir taikomas specialus *deguoninis-fliusinis pjovimo* būdas: norint išlydyti sunkiai lydžius oksidus, pjūvio vieta kaitinama specialiu degančiu fliusu. Į pjūvio zoną kartu su pjovimo deguonimi ir kaitinančia liepsna purškiami *fluso milteliai*, kurie degdami išskiria daug papildomos šilumos, sunkialydziai oksidai tampa takūs ir, veikiami deguonies čiurkšlės, pašalinami, o išlekiančios fluso dalelės dar nuo pjūvio sienelių nušveičia oksidus.

XX a. antrojoje pusėje statybose vis plačiau yra naudojamos gelžbetoninės konstrukcijos. Vedant komunikacijas reikėjo daugybės gręžinių. Kalnakasybos pramonėje, keliams ir tuneliams kalnuose įrengti reikėjo išgręžti galias skyles (špuras, išgrąžas), į kurias dedami užtaisai uolienai sprogdinti. Gręžti gręžinius mechaniniais būdais – daug darbo reikalaujantis ir brangus procesas (būtina speciali gręžimo įranga, grąžtai su kietlydinio antgaliais vis tiek greitai nudyla, dažnai skyla). Nuo 1960 m. Maskvos Baumanų vardo aukštosios technikos mokyklos (dabar – Baumanų technikos universitetas) Suvirinimo katedroje buvo vykdomi betono ir uolienų pjaustymo darbai pjovimui naudojant *miltelinę-deguoninę ietį*. G. Jevsejevo vadovaujamam kolektyvui pavyko atlikti *gelžbetonio gaminių skiriamąjį pjovimą* (net iki 4 m storio gaminių) ir 30–100 mm skersmens *kiaurymių išdeginimą*. Pjaunančiąją ietį sudaro reikiamo skersmens mažanglio plieno vamzdis, iš dalies pripildytas

metalo miltelių. Į vamzdį tiekiamas grynas deguonis, o kitas jo galas įkaitinamas elektros lanku ar elektros srove iki medžiagos išsiliepsnojimo deguonyje temperatūros. Milteliai vamzdyje išsilydo, reaguodami su deguonimi jie išskiria papildomą šilumą (egzoterminė reakcija) ir vamzdžio galas užsiliepsnoja. Tada deguonies slėgis padidinamas, vamzdis prispaudžiamas prie gaminio ir stumiamas į priekį. Toliau vamzdis ir jame esantys milteliai dega be pašalinio šilumos šaltinio, išskirdami didžiulį šilumos kiekį ir pralydydami gelžbetonį. Kad būtų pašalintas šlakas, vamzdis sukiojamas ir stumdomas pirmyn ir atgal (geriausiai šlakas pašalinamas pjaunant iš apačios į viršų), o kai vamzdis sudega – pakeičiamas nauju. Yra sukurtos technologijos betonui pjauti strypeline-deguonine ietimi, dujine-milteline reaktyvine srove, *milteliniu-deguoniniu pjovikliu, plazmos srautu*.

Deguoninio pjovimo kokybė yra prastesnė nei atlikta taikant plazminį pjovimą, tačiau deguoninio pjovimo įranga yra paprastesnė, pigesnė. Todėl deguoninis pjovimas yra populiariausias.

#### **4.5. Specialūs suvirinimo ir pjovimo būdai**

XX a. pradžioje buvo išrastas *termitinis metalų suvirinimo būdas*: tarp sujungiamų metalų dedamas specialus termitas (paprastai tai yra geležies, aliuminio, geležies oksido ir magnio miltelių mišinys), kuriame dėl egzoterminių cheminių reakcijų išsiskiria pakankamas šilumos kiekis, geležies milteliai išsilydo, aplydo jungiamų metalų briaunas ir sudaro suvirinimo siūlę. Šis suvirinimo būdas būdavo taikomas *bėgiams suvirinti* ir liejinių defektams taisyti. Pavyzdžiui, 1923–1925 m. naudojant termitą buvo suvirinti beveik visi Maskvos tramvajų bėgiai. Nuo 1940 m. termitinis suvirinimas buvo pritaikytas laivų statyboje didelio skerspjūvio detalėms virinti. Nuo 1950 m. storoms detalėms suvirinti pradėtas taikyti J. Patono išrastas *elektrošlakinis suvirinimo būdas* (žr. 4.2.4. skyrių).

Apie metalų sujungimo trintimi galimybę savo darbuose rašė anglų fizikas Džeimsas Džoulis, numatęs mechaninės energijos

perėjimą į šiluminę vykstant trinties procesui. Tačiau suvirinimo trintimi JAV patentas buvo gautas 1891 m. – jau po mokslininko mirties. *Trintinį suvirinimą* pirmąkart praktikoje išbandė rusų išradėjas A. Čudikovas tik 1956 m. Jam pavyko suvirinti du mažaanglio plieno strypus ant paprastų tekinimo staklių. Nuo to laiko įvairiose šalyse kuriamos naujos trintinio suvirinimo teorijos, nustatytas didelis šio suvirinimo būdo efektyvumas, sukurta speciali įranga (pvz., firmų KUKA, *John Thomson*, *Steellweld*). JAV sukurta *trintinio suvirinimo atmaina – inercinis suvirinimas*, kuris skiriasi nuo įprastinio trintinio suvirinimo tuo, kad mechaninė elektros variklio energija iš pradžių perduodama smagračiui, jame sukaupinama, o paskui atiduodama suvirinamų detalių sandūrai, kur ji transformuojasi į šilumą (kaip ir vykstant įprastiniam procesui). Trintiniu suvirinimu pavyko suvirinti įvairiarūšius metalus ir lydinius, kuriuos įprastu būdu suvirinti labai sunku ar visai neįmanoma (pvz., plieną sujungti su aliuminiu ir jo junginiais).

Jau seniai taikomas *atomų difuzija* paremtas suvirinimo būdas, nors jis ir nebuvo teoriškai pagrįstas. Pavyzdžiui, plona aukso folija padengti metaliniai gaminiai negrįžtamai susijungdavo. Tai paaiškinama tuo, kad labai plonos ir plastiškos aukso plėvelės paviršius suartėdavo su gaminio paviršiumi iki tarpatominių atstumų ( $3\text{--}4\text{\AA}$ ), apgaubdamas jo nelygumus, ir susidarydavo bendri metališkieji ryšiai. Tačiau sujungti storesnių detalių nepavykdavo dėl paviršių nelygumų (jie negalėdavo visiškai suartėti iki tarpatominių atstumų). Kad įvyktų susijungimas, atliekamas vietinis *pakaitinimas ir suspaudimas* (atomų aktyvumui padidinti ir nelygumams sumažinti). Kadangi difuzinis suvirinimas kietajame būvyje yra ilgai trunkantis procesas, labai svarbu, kokioje aplinkoje jis vyksta. Todėl 1953 m. N. Kazakovas (Rusija) pasiūlė *difuzinio suvirinimo vakuume* būdą, vėliau buvo panaudota apsauginių dujų atmosfera ir skystoji terpė. Difuzinis suvirinimas dažniausiai taikomas įvairiarūšiams metalams ir kompoziciniams lydiniams sujungti – taip pavyko suvirinti daugiau kaip 500 kompozitų.

Dar 1946 m. rusų mokslininkai A. Ulitovskij, S. Bogoslovskij ir kt. pasiūlė suvirinimui naudoti *aukštojo dažnio magnetinį lauką*, kuris sukuriamas specialioje ritėje – induktoriuje, naudojant aukštojo dažnio srovės generatorių. Toks suvirinimo būdas gavo pavadinimą *высокочастотная сварка*, t. y. *suvinimas aukštojo dažnio srove* (nereikia painioti su lankiniu suvirinimu impulsine srove naudojant tarpinius aukštadažnius keitiklius inverteriniuose maitinimo šaltiniuose). Naujojo suvirinimo būdo lietuviškasis pavadinimas nėra vykęs, kadangi šiuo atveju suvinimas atliekamas ne srove, o šiluma, kuri išsiskiria detalių briaunose ir jas aplydo (dėl paviršinio ir artumo efektų), veikiant galingam aukštojo dažnio magnetiniam laukui. Todėl šis suvirinimo būdas dažnai vadinamas *indukciniu suvinimu*. Tačiau naujasis suvinimo būdas buvo įdiegtas tik 1958 m. Maskvos vamzdžių gamykloje. Palyginti su lankiniu suvinimu, vamzdžių suvinimo *produktyvumas išaugo kelis kartus*, ir naujasis suvinimo būdas greitai paplito visose išsivysčiusiose šalyse. 1962 m. Novosibirsko (Rusija) metalurgijos gamykloje buvo įrengtas net specialus vamzdžių indukcinio suvinimo cechas, kurio produktyvumas siekė 2,5 km vamzdžių per valandą!

Nuo 1960 m. medžiagų suvinimui pradėtas naudoti šviesos spinduliavimas, o 1966–1968 m. sukurti pirmieji pramoniniai *impulsiniai kietojo kūno suvinimo lazeriai*.

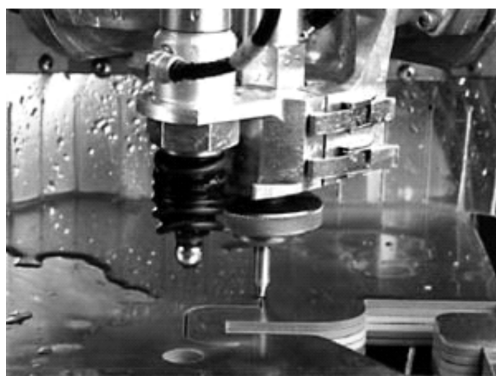
Pastaruoju metu taikomas įvairių medžiagų (metalų ir nemetalų) *suvinimas ir pjovimas ultragarsu*. Šis metodas sėkmingai taikomas ir medicinoje: sukurtos kaulų suvinimo ir aplydymo technologijos, ultragarsu pjaunami gyvi biologiniai audiniai.

1960 m. JAV buvo atlikti suvinimo tyrimai naudojant *sprogimo energiją* (šis suvinimo būdas užpatentuotas 1964 m.). Gauti geri rezultatai virinant vienerūšius ir įvairiarūšius metalus bei kompozitus. Virinant didelių paviršių detales ypač efektyvus *sprogdinamasis suvinimas*.

#### 4.6. Pjovimas vandens srove

Praėjusio amžiaus šeštojo dešimtmečio pabaigoje inžinierius miškininkas Normanas Franzas ieškojo naujų medienos pjovimo būdų. Tam jis pabandė tiekti vandenį dideliu slėgiu taip, kad jis trykštų labai dideliu greičiu pro mažo skersmens antgalius. Taip vanduo pirmąkart buvo panaudotas kaip pjaustymo įrankis. Vėliau atsirado angliškas terminas *ultra-high pressure* (UHP) „labai didelis slėgis“ (kuris siekia 200–400 MPa). N. Franzui pavyko didelio slėgio vandens čiurkšle pjaustyti medieną ir kitas medžiagas, tačiau išlaikyti pastovų didelį spaudimą jam nepavyko. Be to, antgalių, pro kuriuos tekėjo vanduo, darbo laikas buvo labai trumpas: jų resursas neviršijo minutės (šiuolaikiniai antgaliai, kurie gaminami iš naujų konstrukcinių medžiagų ir kompozitų, atlaiko kelias savaites ar mėnesius). Tačiau buvo įrodyta, jog suspausta vandens čiurkšlė, ištekanti labai dideliu greičiu, turi didžiulę galią ir gali būti plačiai naudojama įvairioms medžiagoms pjauti (11 pav.).

1971 m. JAV firma *FLOW* pradėjo gaminti pjovimo vandens srove įrenginius, vėliau juos pradėjo gaminti prancūzų firma *Aquarese*, švedų firma *Water Jet* (naujose konstrukcijose naudojamo vandens slėgis yra iki 400 MPa).



11 pav. Pjovimo vandens srove įrenginys

Šis pjovimo būdas labai sumažina gamybos išlaidas, jis yra universaliausias ir sparčiausiai besivystantis. Pjovimas vandens srove taikomas daugelyje pramonės šakų visame pasaulyje. Pjaunant neišsiskiria jokių kenksmingų dujų ar skysčių, aplinka neteršiama kenksmingosiomis medžiagomis ar kvapais. Pjovimo srityje nėra terminio poveikio ar padidėjusios mechaninės įtampos zonos. Tai iš tiesų universalus ir efektyvus šaltojo pjovimo procesas.

Pjovimas vandens srove gali būti taikomas ten, kur kiti pjovimo būdai netinka. Naujas pjovimo būdas yra unikalus tiek pjaustant plonas detales iš akmens, stiklo ar metalo, tiek greitai gręžiant skylės titane ar maistui konservuoti skirtoje taroje. Todėl šis universalus ir efektyvus šaltojo pjovimo būdas yra vienas iš perspektyviausių.

Pjovimo vandens čiurkšle technologijos esmė yra labai paprasta – vanduo tiekiamas vamzdžiais iš galingo siurblio į pjovimo galvutę ir, švirkšdamas iš jos, pjauna. Tačiau tam reikia sudėtingos įrangos, naujų medžiagų ir technologijų, kadangi valdyti 200–400 MPa vandens slėgį – sudėtingas uždavinys. Esant tokiam dideliame spaudimui, net ir mažiausias nutekėjimas gali sukelti įranginių elementų eroziją ir juos sugadinti. Todėl pjovimo galvutė gamybai naudojamos pačios kietiausios medžiagos – brangakmeniai: safyras, rubinas ir deimantas. Skylutės skersmenys juose būna nuo 0,0016 mm iki 0,004 mm. Esant didžiuliui slėgiui, suspaustas vanduo, tekėdamas pro tokią mažą skylutę, įgyja didžiulį viršgarsinį greitį. Vyksta vadinamoji viršgarsinė medžiagos erozija: vandens srovės greitis (ne slėgis) suardo mikroskopines medžiagos daleles.

Pirmą kartą komerciniais tikslais šiuo būdu praėjusio šimtmečio aštuntojo dešimtmečio viduryje buvo pjaustomas kartonas. Vėliau vandens srove buvo pjaustomos vaikiškos sauskelnės, minkštas popierius ir automobilių interjero detalės. Įdomu tai, kad, pjaustant sauskelnes ir popierių, dėl didžiulio trykstančio vandens greičio šios medžiagos nesuspėja sušlapti.

Devintajame dešimtmetyje ypač paplito pjovimas vandens čiurkšle su abrazyvu: vandens srovė pagreitina abrazyvinės dalelės ir

pjauna jos, o ne vanduo (kaip abrazyvas dažniausiai naudojamas granatas, kadangi yra kietas, tvirtas ir nebrangus). Vandens srovė su abrazyvu yra šimtus, jei ne tūkstančius kartų galingesnė nei grynas vanduo, todėl ir pjovimo galvutės nudyla greičiau. Šis būdas dažniausiai taikomas kietoms medžiagoms pjauti: metalui, akmeniui, keramikai ir kt. Vandens srove su abrazyvu pjaunamos net šiek tiek kietesnės medžiagos nei aliuminio oksido keramika.

Pastaruoju metu pjovimo vandens srove technologijos sparčiai tobulėja, kadangi, palyginti su kitais pjovimo būdais, turi daug privalumų: labai plonas pjūvis ir nedaug netenkama pjaunamos medžiagos; galima išpjauti ypač sudėtingos geometrijos detales; nėra terminio poveikio zonos; galima pjauti labai įvairaus storio medžiagas; procesas yra greitas, o pjovimo jėga nežymi; lengva procesą programuoti; įmanoma pjauti beveik visas medžiagas: kietas, minkštas, lengvas (pvz., organinį stiklą, medieną).

## Literatūra

1. Bražiūnas A. J. Mašinų gamybos technologijos pagrindai. Kaunas: Technologija, 2004. 512 p.
2. Kulikauskas L. Medžiagotyra. Konstrukcinės medžiagos. Vilnius: Žara, 1997. 510 p.
3. Žvinys J., Šniuolis R. Inžinerinės medžiagos. Kaunas: Technologija, 2002. 107 p.
4. Balandis A. Inžinerinės neorganinės medžiagos. Kaunas: Technologija, 2001. 119 p.
5. Juodelis V. Spalvotieji metalai ir jų lydiniai. Vilnius: Technika, 1998. 58 p.
6. Šiuolaikinės medžiagos ir technologijos. Iš: Respublikinės konferencijos – mokyklos pranešimų medžiaga. Kaunas: Technologija, 2000. 150 p.
7. Valiulis A. V. Litavimas. Vilnius: Technika, 1993. 215 p.
8. Šiaučiūnas R., Štuopys A. Ugniai atsparios medžiagos. Kaunas: Technologija, 1998. 278 p.
9. Самохоцкий А. И., Кунявский М. Н. и др. Металловедение. 4-е изд. Москва: Металлургия, 1990. 416 с.
10. Larry H. Fundamentals of Material Science for Technologists. Properties, Testing and Laboratory Exercises. California University of Pensilvania: New Jersy, 1995. 550 p.
11. Technikos enciklopedija. Vilnius: Mokslo ir enciklopedijų leidybos institutas, t. 1, 2000, 719 p. ir t. 2, 2003, 791 p.
12. Lietuviškoji tarybinė enciklopedija. Vilnius: Mokslas, t. I–XIII, 1976–1985.
13. Советский энциклопедический словарь. Москва: Советская энциклопедия, 1979. 1600 с.
14. Siparienė U. Metalas saugo ir puošia namus. Namai pagal mus. Vilnius: UAB „Moteris“, 2004 m., gegužė, Nr. 44.
15. Bagdonas V. Kalvystės pagrindai. Vilnius: AB „Spauda“, 1997. 95 p.

16. Kirvelis D. Biofizika – kaip organizuotų sistemų fizika.  
[http://www.gf.vu.lt/usr/kirvelis/apie\\_biof.html](http://www.gf.vu.lt/usr/kirvelis/apie_biof.html)
17. Martišius J. A. Voltos stulpui – 200 metų.  
<http://news.mireba.lt/ml/202/voltos.htm>
18. Кудрявцев Б. Русский физик Василий Петров.  
[http://www.znanie-sila.ru/online/issue\\_1643.html](http://www.znanie-sila.ru/online/issue_1643.html)
19. Тысяча изобретений для человечества.  
[http://www.businesspress.ru/newspaper/article\\_mId\\_1024\\_aId\\_41970.html](http://www.businesspress.ru/newspaper/article_mId_1024_aId_41970.html)
20. Шарц А. К. Николай Гаврилович Славянов.  
<http://weld.pfo-perm.ru/Date/Slavjanov1.htm>
21. Акулов А. И. Технология и оборудование сварки плавлением и термической резки. Москва: Машиностроение, 2003.
22. Сварка в СССР. Том 1. Развитие сварочной техники и науки о сварке. Технологические процессы, сварочные материалы и оборудование. Москва: Наука, 1981. 533 с.
23. Ščemeliovas J. The Influence of a Welding Current Modulation on Weld Seam Formation. *Elektronika ir elektrotechnika*, Kaunas: Technologija, 2004, No 2, p. 33–36.
24. Pjovimo vandens srove technologija. UAB „Serpantinas“,  
<http://www.asa.lt/technika/>

**Jevgenijus Ščemeliovas**  
**Inžinerinės medžiagos ir jų gamybos bei apdorojimo technologijos**  
Mokomoji knyga

Redagavo V. Tamoševičienė

SL 136. 2005 05 19. 7,5 apsk. leid. I.