

SISEKAITSEAKADEEMIA

a

**MATERJALID
JA
TEHNOLOOGIA**

FELIKS ANGELSTOK

Õppevahend on mõeldud kasutamiseks Sisekaitseakadeemia päästeteenistuse eriala (õppekava kinnitatud siseministri käskkirjaga 13.05.2002. a) üliõpilastele õppeaines "Rakendusmehaanika".

Tulekustutus- ja päästetööde juhtimine ning läbiviimine nõuab teadmisi mitmetest inseneritöö valdkondadest – ehitusest, elektrist, keemiast, mehaanikast, sidest jm. Seetõttu peavad nende tööde juhtidel olema lisaks erialastele ka laiad inseneriteadmised.

Rakendusmehaanika õppeaines käsitletakse mitmeid olulisi inseneridistsipliine: staatika, dünaamika, tugevusõpetus, tehnomaterjalid, masinaõpetus, masinaelemendid. Aine on üks mahukamaid õppekavas – kokku 4 ainepunkti.

Õppevahend käsitleb tehnomaterjale ja neist mitmesuguste toodete valmistamise tehnoloogiaid. Ei käsitleta ehitusmaterjale, kuna päästeteenistuse eriala õppekavas on vastav erikursus. Materjalitehnika kohta on eesti keeles ilmunud erinevatel aegadel küllalt palju erialast kirjandust. Vastavad õppeained on olnud pidevalt kõrgkoolide, tehnika- ja põllumajanduse õppeasutuste õppekavades.

Tallinna Tehnikaülikooli (TTÜ) materjalitehnika instituut professor Priit Kulu juhtimisel on viimastel aastatel välja andnud rea mahukaid õpikuid (vt kirjanduse loetelu 1, 2, 3, 5, 6) pea kõigi materjaliliikide (terased, malmid, värvilismetallid, komposiitmaterjalid, tehnoplastid jm) kohta. Need on mõeldud kasutamiseks kõrgkoolide üliõpilastele nii bakalaureuse-, diplomi- kui ka magistriõppes. Õpikutes on esmakordselt eesti keeles käsitletud materjalide eurostandardeid ja antud ka vajalik emakeelne terminoloogia koos inglisekeelsete vastetega.

Käesoleva õppevahendi koostamise põhjuseks on päästeteenistuse eriala õppekavas rakendusmehaanika õppeaine raames materjalitehnikale eraldatud äärmiselt piiratud ajaline maht. Üliõpilastel ei jätku aega kõigi eelmainitud põhjalike õpikute läbitöötamiseks, kuigi nad kõik on kättesaadavad ja Sisekaitseakadeemia raamatukogus väikestes kogustes olemas. Nendesse süüvimine osutub vajalikuks ja võimalikuks kursuse- või lõputööde kirjutamisel, kui tööde teemad seda nõuavad. Vaja oleks aga ka lühikokkuvõtet, mis annaks üliõpilastele ainevaldkonnast põgusa ülevaate. Algteadmised on vajalikud materjalitehnika praktiliste tööde edukaks sooritamiseks, mida Sisekaitseakadeemia üliõpilased teevad TTÜ materjalitehnika instituudi laboratooriumides.

Käesolev õppevahend on koostatud eesti keeles ilmunud õpikute (peamiselt TTÜ väljaanded) põhjal ja siia on koondatud algteadmised materjalidest ja nende töötlemiseks kasutatavatest tehnoloogiatest ning mitmete toodete valmistamisest.

Õppevahend võib olla kasulik kõigile tehnika ja tehnoloogia valdkondade üliõpilastele, eriti neile, kes ei spetsialiseeru materjalitehnikale. Viimastele tuleb soovitada eelpool mainitud põhjalikumaid käsitlusi.

© Feliks Angelstok, 2002

Sisekaitseakadeemia kirjastus
Kase 61 12012 Tallinn
jaanuar 2003

SISUKORD

1. TEHNOMATERJALID	5
1.1. Tehnomaterjalide liigitus	5
1.2. Materjalide valiku põhimõtted	5
2. METALLIDE JA SULAMITE STRUKTUUR NING OMADUSED	6
2.1. Metallide üldised omadused	6
2.2. Metallide struktuur	6
2.3. Sulamite struktuur	8
2.4. Metallide ja sulamite kristalliseerumine	9
2.5. Metallide ja sulamite mehaanilised omadused	10
2.5.1. Deformatsioon ja purunemine	10
2.5.2. Materjalide mehaanilised omadused	11
2.5.3. Staatilisel koormamisel määratavad omadused	12
2.5.4. Dünaamilisel koormamisel määratavad omadused	13
3. METALLIDE SAAMINE	15
3.1. Metallurgia	15
3.2. Malmi saamine	15
3.2.1. Toorained	15
3.2.2. Malmi pürometallurgia	16
3.3. Terase saamine	17
3.3.1. Terase pürometallurgia	17
3.3.2. Terase tootmine	17
3.4. Värviliste metallide saamine	18
4. RAUA-SÜSINIKUSULAMID	19
4.1. Raud ja süsinik	19
4.2. Fe-Fe ₃ C faasidiagramm	20
4.3. Terased	22
4.3.1. Teraste liigitus	22
4.3.2. Mittelegeerterased	22
4.3.3. Legeerterased	23
4.3.4. Teraste tähistus	23
4.3.5. Terase termotöötlus	23
4.4. Malmid	25
4.4.1. Malmide struktuur ja omadused	25
4.4.2. Malmide tähistus	26

5. TOODETE VALMISTAMISE TEHNOLOOGIA	27
5.1. Valamine	27
5.1.1. Vedelmetalli vormitavus	27
5.1.2. Valamise viisid.....	28
5.2. Survetöötlemine	29
5.3. Lõiketöötlemine	33
5.3.1. Lõikamine	33
5.3.2. Lõiketöötlemisviisid.....	34
5.4. Pulbermetallurgia	36
5.5. Näiteid toodete valmistamisest	38
6. ALUMIINIUM JA ALUMIINIUMISULAMID	39
6.1. Aluminiumi ja tema sulamite omadused.....	39
6.2. Aluminiumisulamite tähistus	40
7. VASK JA VASESULAMID	40
7.1. Vase ja tema sulamite omadused	40
7.2. Vase ja vasesulamite tähistus	41
8. PLASTID	42
8.1. Plastide üldised omadused	42
8.2. Termoplastid	42
8.3. Reaktoplastid.....	44
8.4. Plastkomposiidid.....	44
8.5. Plastide töötlemine	45
9. KUMMID	47
9.1. Kummi lähteained	47
9.2. Kummitoodete tehnoloogia.....	48
10. TIHENDUSMATERJALID	48
10.1. Tihendid.....	48
10.2. Tihendimaterjalid.....	49
11. PINDED JA PINDAMISE TEHNOLOOGIA	50
11.1. Pinnete ülesanded ja liigid	50
11.2. Aluspinna ettevalmistamine pindamiseks.....	50
11.3. Galvaanilised pinded.....	51
11.4. Oksiid- ja fosfaatpinded.....	52
11.5. Difuussed pinded	52
11.6. Pihustatud pinded.....	53
11.7. Sadestatud pinded	54
11.8. Lakk- ja värvpinded	54
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU.....	56

1. TEHNOMATERJALID

1.1. Tehnomaterjalide liigitus

Tava- ja tööstustarbivatele vajalike toodete valmistamiseks kasutatakse mitmesuguseid väga erinevate omadustega materjale. Inglise keeles nimetatakse neid materjale *engineering materials*, mida eesti keelde tõlgitakse *tehnomaterjalid* (1, lk 6).

Materjalidest saadakse tooted kasutades mitmesuguseid *tootmisprotsesse*. Tootmisprotsesside hulka kuuluvad nii need, millega looduslikest materjalidest saadakse tehnomaterjalid (näiteks maakide kaevandamine ja rikastamine, sulatamine, metallurgiaprotsessid jne), kui ka tehnomaterjalidest toodete valmistamine (valamine, keevitamine, lõiketöötlamine jne).

Tehnomaterjalidest valmistatud toodete omadused sõltuvad nii nende valmistamiseks kasutatud tootmisprotsessidest kui ka materjali saamiseks kasutatud tootmisprotsessist.

Laias laastus võib tehnomaterjale jaotada metallideks ja mittemetallideks. Käesolevas õppevahendis käsitletakse mõlemaid, kuid mittemetallidest on jäetud vaatluse alt välja ehitusmaterjalid, sest nende tarvis on päästeteenistuse eriala õppekavas omaette õppeained.

1.2. Materjalide valiku põhimõtted

Toote materjali valikul tuleb arvestada suurt hulka mitmesuguseid tegureid: tugevust, jäikust, vajalikku pinnakõvadust, kaalu, materjali töödeldavust, töötemperatuuri, töökeskkonda, hinda, töökindlust jm.

Tooted, millelt nõutakse tugevust valmistatakse eeskätt termiliselt töödeldud terasest ja suure tugevusega malmist (näiteks hammasrattad, võllid, väntvõllid jt).

Kui primaarne on jäikus, siis on tugevuse kõrval oluline ka toote põikpinna kuju. Kasutatakse valtsprofiile terasest, duralumiiniumist jt materjalidest.

Pinnakõvadust nõutakse eelkõige suurte kontaktpingete korral, mis esinevad veerelaagrites, juhikutes, hammasülekannetes jm. Tuleb kasutada kõvaks karastatud terast.

Kui toote mass ja mõõtmed on piiratud, siis kasutatakse suure eritugevusega (eritugevus on materjali tugevusnäitarvu ja tiheduse suhe) kergeid materjale, nagu titaanisulamid, klaaskiud sarrusega polümeerid jm.

Keeruka kujuga toodete valmistamiseks kasutatavad materjalid peavad olema kas hea lõiketöödeldavusega (pehmed terased, värvilised metallid jt) või hea vedeloolavusega (malm, silumiin, pronks jt).

Kuumuskindlad tooted valmistatakse legeeritud terastest.

Töökeskkond võib esitada spetsiifilisi nõudeid toodetele. Nii peavad toiduainetega kokkupuutuvad pinnad olema roostevabad, seega näiteks roostevabast suure kroomisisaldusega terasest.

Toote materjali hind võib moodustada kogu toote hinnast suure osa – masinaehituses kuni 60–70%. Seega tuleb valida odavaim, kuid tehniliselt rahuldav materjal.

Kvaliteettooteid iseloomustab töökindlus, mille saavutamisel olulist rolli etendab õige materjali valik.

2. METALLIDE JA SULAMITE STRUKTUUR NING OMADUSED

2.1. Metallide üldised omadused

Metallid on keemilised elemendid, mille aatomite välimistes elektronkihtides on vähe (tavaliselt 1 või 2) tuumaga nõrgalt seotud elektrone. Metallid loovutavad need suhteliselt vabad, nn valentselektronid, keemilistes reaktsioonides kergesti mittemetallidele. Ka on vabad elektronid lihtsasti mõjutatavad välise elektriväljaga, andes korrapärase elektronidevoo ja seega hea elektrijuhtivuse. Temperatuuri tõustes kiireneb elektronide liikumine ja neile mõjuvad mehaanilised inertsjõud suurenevad. See asjaolu põhjustab metallide hea soojajuhtivuse.

Metallide hulka kuuluvateks võib lugeda 80% keemilistest elementidest, kusjuures nad kõik peale elavhõbeda on tavatemperatuuril tahked ained.

Metallid liigitatakse kahte suurde gruppi:

- mustad – raud ja tema sulamid (moodustavad 95% maailma metallitoodangust),
- värvilismetallid – kõik ülejäänud metallid ja nende sulamid.

Tiheduse järgi liigitatakse metalle:

- kergmetallid – tihedus alla $5\,000\text{ kg/m}^3$ (alumiinium, titaan, magneesium, berüllium, liitium jt),
- keskmismetallid – tihedus vahemikus $5\,000$ kuni $7\,874\text{ kg/m}^3$, mis on raua tihedus,
- raskmetallid – tihedus suurem kui raual (vask, nikkel, plaatina, volfram, molübdeen jt).

Sulamistemperatuuri järgi liigitatakse metalle:

- kergsulavad – sulamistemperatuur ei ületa plii oma, s.o 327 °C (tina, plii, antimon, elavhõbe jt),
- kesksulavad – sulamistemperatuur vahemikus 327 °C kuni $1\,539\text{ °C}$, mis on raua sulamistemperatuur,
- rasksulavad – sulamistemperatuur kõrgem kui raual (volfram, kroom, titaan, vanaadium, molübdeen jt).

Keemilise aktiivsuse järgi liigitatakse metalle:

- väärismetallid (hõbe, kuld ja nn platinametallid – plaatina, pallaadium, roodium jt),
- mitteväärismetallid.

Metalle klassifitseeritakse veel muudegi tunnuste järgi, näiteks leelismetallid, leelismuldmetallid, haruldased, hajusad, radioaktiivsed jm.

Metalle iseloomustavad tahkes olekus läige ja plastilisus, mis tagab hea mehaanilise töödeldavuse. Samad omadused on lisaks puhastele metallidele ka nende sulamitel.

2.2. Metallide struktuur

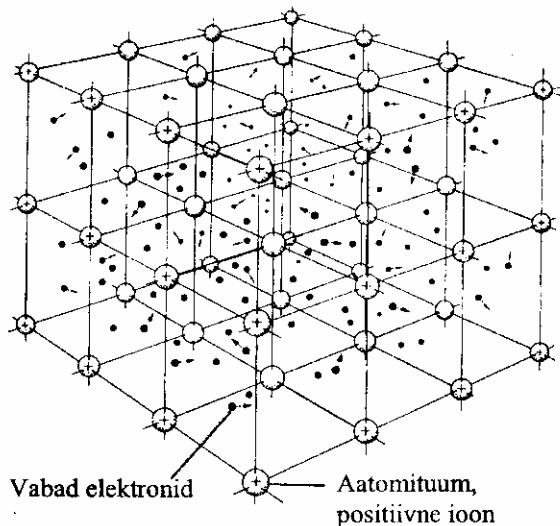
Metalli sisemise struktuuri moodustavad teatud kindlates kohtades paiknevad aatomid, õigemini positiivsed ioonid, mis on tekkinud elektronid loovutanud aatomitest, ja nende vahel liikuvad elektronid, nn elektrongaas (joonis 2.1).

Aatomite paigutuses on kindel seaduspärasus, nii et moodustub korrapärane kristallivõre (joonis 2.1). See vastab aatomite omavahelise mõju minimaalsele energiale.

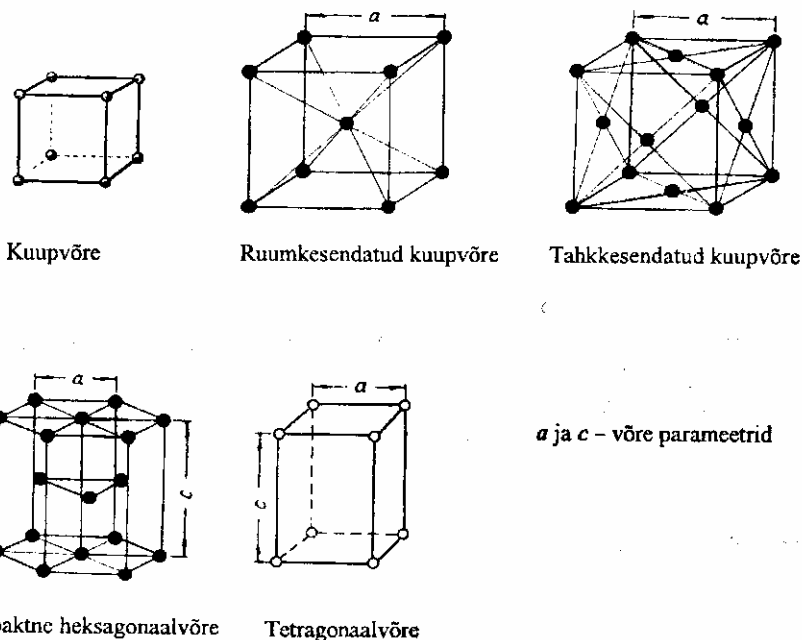
Kristalli moodustavate aatomite vastastikuse asetuse viise võib kujutada ruumiliste skeemide nn võreelementide abil. Võreelemendi all mõistetakse vähimat aatomite kogumit, mille mitmekordne kordumine ruumis annab kristallilise struktuuri. Eristatakse 14 erinevat kristallivõre tüüpi, millest mõned lihtsamad on kujutatud joonisel 2.2. Ruumkesendatud kuupvõre on iseloomulik metallidele Ba, Cr_α, Fe_α, K, Mn_α, Mo, Na, V, W_β ja tahkesendatud kuupvõre metallidele Ag, Al, Cu, Ca, Ni, Fe_γ, Pb, Pt, Sn_α. Kompaktne heksagonaalvõre on Mg, Zn, Cd, Ti_α, Cr_β.

Paneme tähele mitmete metallide keemilise elemendi tähise juures olevaid indekseid α , β ja γ . See tähendab, et nendel metallidel on erinevatel temperatuuridel erinevat tüüpi kristallivõred. Näiteks raua kristallivõre madalatel temperatuuridel kuni $911\text{ }^{\circ}\text{C}$ on ruumkesendatud kuupvõre (α -raud), temperatuuridel $911\text{ }^{\circ}\text{C}$ kuni $1392\text{ }^{\circ}\text{C}$ on raud tahkkesendatud kuupvõre (γ -raud), kõrgematel temperatuuridel üle $1392\text{ }^{\circ}\text{C}$ on raud jälle ruumkesendatud kuupvõre (α -raud). Sellist nähtust nimetatakse *polümorfismiks*.

Selle, kuidas aatomid kristallivõres paigutuvad, määravad nendevahelised vastastikmõjud. Tõmbejõud tekivad negatiivselt laetud elektronide ja positiivselt laetud aatomituumade vahel. Tõukejõud on tingitud positiivselt laetud aatomituumade vastastikusest mõjust nende lähenemisel. Need jõud tasakaalustuvad elementaarosakeste lähenemisel kaugusele, millele vastab sideme minimaalne energia.



Joonis 2.1. Metallide aatomite paigutuse korrapärane struktuur.

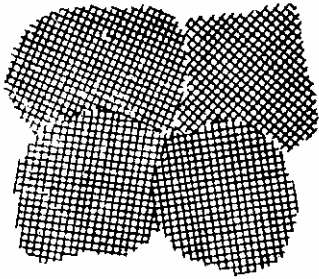


a ja c - võre parameetrid

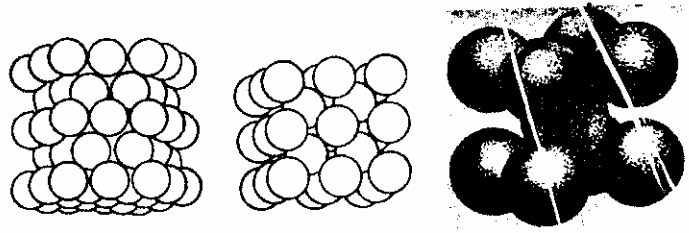
Joonis 2.2. Metallide kristallide võrelemente.

Kristallivõre mõõtmeid iseloomustavad võreparameetrid (a ja c joonisel 2.2), mida mõõdetakse ongströmidest ($1\text{ \AA} = 10^{-10}\text{ m}$). Võreparameetrite väärtused on lähedased aatomite mõõtmetele. Nii näiteks on krooni ruumkesendatud kuupvõre parameeter võrdne $2,878\text{ \AA}$, alumiiniumi tahkkesendatud kuupvõre parameetriks on $4,041\text{ \AA}$. Kompaktses heksagonaalvõres puutuvad ülemise ja alumise kihi aatomid kokku keskmises kihis oleva kolme aatomiga ning parameetrite suhe on $c/a = 1,633$. Teistel juhtudel on võre vähem kompaktne.

Kristallivõredes paiknevad aatomid korrapäraselt, kuid aatomite arv – *pakketihedus* – erinevates tasandites (tahkudel ja diagonaaltasandites) on erinev. Sellest on põhjustatud monokristallide erinevad omadused erinevates suundades – *anisotroopsus*. Et aga tegelikult tehnikas kasutatavad metallid on polükristalsed, milles iga tera on erinevalt orienteeritud (joonis 2.3), siis on nende omadused erinevaid suundades ühesugused. Survetöötlemise (valtsimine, tõmbamine jt) tulemusena võib terade orientatsiooni muuta ja saavutada kristallide ühesuunaline orientatsioon. Selliselt töödeldud toodetel on erinevates suundades erinevad omadused, näiteks valtsmetallil.



Joonis 2.3. Metalli polükristalne struktuur.

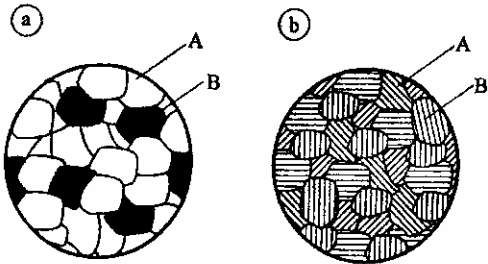


Joonis 2.4. Aatomite tegelik pakketihedus võrekes.

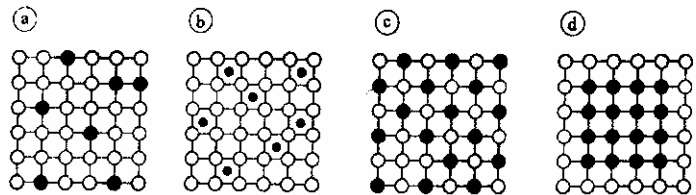
Aatomite tegelikku pakketihedust iseloomustab joonis 2.4, kus aatomeid on kujutatud keradena. Ruumkesendatud kuupvõre puhul täidavad aatomid 68% kogumahust ja tahkkesendatud kuupvõre puhul koguni 74%.

2.3. Sulamite struktuur

Sulam on kahe või enama aine (komponendi) kokkusulatamisel saadav aine. Sulamit, milles põhikomponent on metall, nimetatakse metallisulamiks. Metallisulami struktuur erineb puhaste metallide omast ja on sellest, kuidas reageerivad omavahel sulami moodustavad komponendid. Sulami komponendid võivad omavahel reageerides moodustada keemilisi ühendeid, või, lahustudes üksteises, moodustada tardlahuseid. Sulami komponendid võivad moodustada mehaanilise segu kui nende vahel ei teki keemilist reaktsiooni.

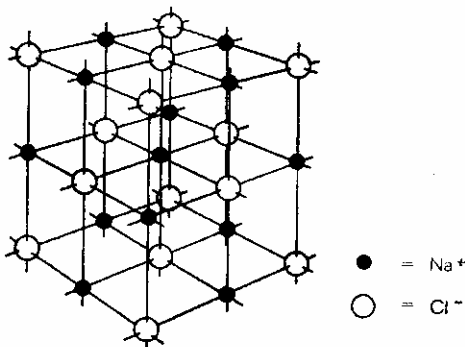


Joonis 2.5. Sulami-mehaanilise segu struktuur.



Joonis 2.6. Tardlahuse struktuur.

Mehaanilise segu korral koosneb sulam komponentide A ja B kristallidest (joonis 2.5. a). Mõlema komponendi kristallide omadused on samad, mis puhastel metallidel A ja B. Segu, mille struktuuris on vaheldumisi üheaegselt eraldunud komponentide kihid, nimetatakse *eutektikumiks* (joonis 2.5. b).



Joonis 2.7. Keemilise ühendi-NaCl kristallivõre.

Enamus metalle lahustuvad vedelas olekus üksteises piiramatult moodustades ühtlase vedellahuse. Selliste sulamite tahkumisel tekib tahke lahus ehk *tardlahus*. Tardlahuses säilitab üks komponentidest – lahustaja oma kristallivõre. Teise komponendi aatomid asetuvad lahustaja kristallivõre. Olenevalt sellest, kuhu nad asetuvad on võimalikud asendustüüpi (joonis 2.6. a), sisendustüüpi (joonis 2.6. b) või korrastatud (joonis 2.6. c, d) tardlahused.

Kui sulamis tekib *keemiline ühend*, siis sellel on oma, komponentide omadest erinev kristallivõre. Keemilisele ühendile on iseloomulik komponentide aatomite korrapärase paigutus (joonis 2.7), kindel sulamistemperatuur ja komponentide omadest täiesti erinevad omadused.

2.4. Metallide ja sulamite kristalliseerumine

Kristalliseerumine on vedela metalli või sulami üleminek tahkesse olekusse. Vedela sulami jahutamisel on tardumiseks vajalik kõigepealt *kristalliseerumiskeskmete* teke. Puhtas metallis tekivad nad madalamal temperatuuril kui lisanditega metallides või sulamites. Mittemetalseid lisandeid, oksiide, lahustunud lisandeid jms esineb pea igas metallis ja sulamis. Nad soodustavad kristalliseerumiskeskmete teket. Mida rohkem on keskmeid ja mida aeglasemalt nad kasvavad, seda väiksemad on tekkivad kristallid e terad. Saadakse peeneteraline struktuur. Mida peeneteralisem on struktuur, seda kõrgemad on metalli mehaanilised omadused, eelkõige plastsus ja sitkus.

Peeneteralise struktuuri saamiseks viiakse sulametalli spetsiaalseid pindaktiivseid aineid – modifikaatoreid. Nendeks on näiteks boor terastes ja naatrium alumiiniumsulamites.

Tera kuju sõltub kristalli kasvutingimustest, peamiselt sooja äravoolu kiirusest ja suunast. Algul tekkivad kristallid kasvavad vabalt ja neil on korrapärane geomeetiline kuju. Vormi valamisel algab kristalliseerumine vormi pinnaga vahetult kokkupuutuval valandi välispinnal. Kui kasvavad kristallid kokku puutuvad, siis nende korrapärasus rikutakse. Kasv jätkub vaid nendes suundades, kus on sulametalli ja toimub sooja äravool. Tekivad pikad nn sammakristallid, mis on orienteeritud risti valandi seinaga. Kui sooja äravool toimub kõigis suundades ühtlaselt, tekivad võrdtelgsete kristallid. Kõiki neid kolme liiki terasid võib näha valandi ristlõikes (joonis 2.8).

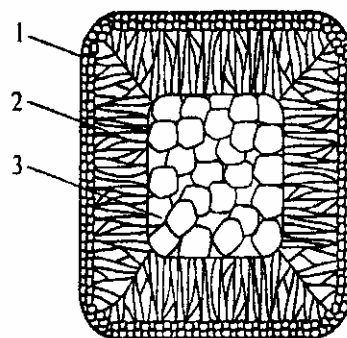
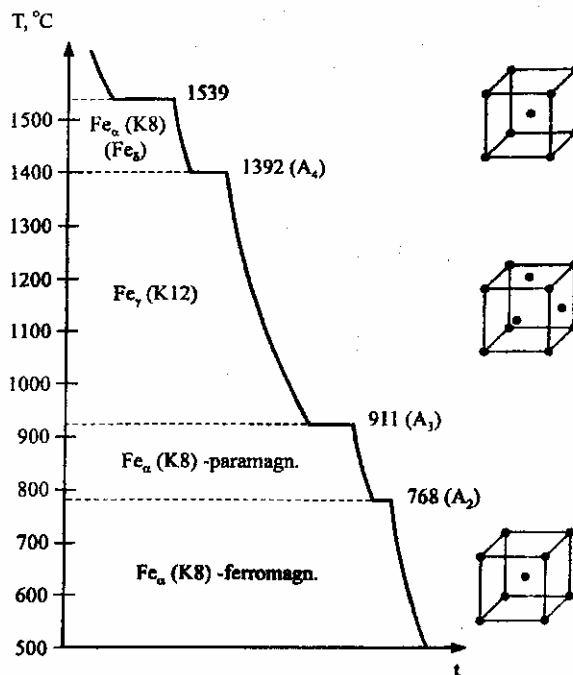
Tehnoloogiliste võtetega saab muuta erinevate tsoonide vahetõrget. Näiteks võib sulametalli kiire jahutamisega saada põhiliselt sammakristallidest koosneva struktuuri. Analoogse struktuuriga on ka väga puhastest metallidest valandid.

Kristalliseerumisprotsess lõpeb üksikute kristallide vahelises piiritoonis terade kokkupuutejoonel, kuhu kogunevad kõik-võimalikud lisandid ja kuhu tekivad ka mikroskoopilised kahanemistühimikud.

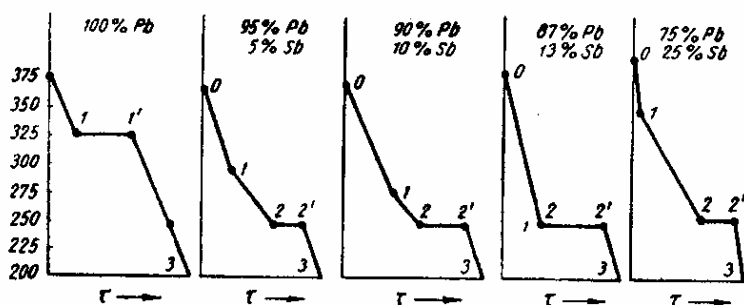
Metallide kristalliseerumisprotsessi kujutatakse jahtumiskõveratega, mis koostatakse teljestikus temperatuur – aeg. Puhta raua jahtumiskõver on kujutatud joonisel 2.9. Jahtumiskõveratele on iseloomulikud horisontaalsed lõigud, mil jahtumine seiskub. Need on tingitud kristalliseerumissoojuse eraldumisest kristallide tekkimisel või kristallivõre tüübi muutumisel. Kuumutamiskõveratel on analoogsed horisontaalsed osad tänu sulamissoojuse neeldumisele.

Sulamite puhul oleneb jahtumiskõverate kuju komponentide koguselisest vahetõrrest ja sulami liigist. Kahekomponentse sulami mõlemal puhtal komponendil *A* ja *B* on oma jahtumiskõver. Moodustades neist sulameid, milles komponendid *A* ja *B* esinevad erinevates kogustes, saame iga sulami kohta üles võtta oma jahtumiskõvera. Näiteks on joonisel 2.10 kujutatud plii-antimonisulamite jahtumiskõveraid erinevate plii ja antimoni vahetõrgete puhul. Ühendades need jahtumiskõverad ühte diagrammi, saame komponentide *A* ja *B* sulamite olekudiagrammi (joonis 2.11). Vertikaaltelg on temperatuuritelg. Horisontaaltelg on kontsentratsioonitelg, millel kajastub sulami protsentuaalne koostis. Vasakpoolne ots vastab 100% Pb-le ja 0% Sb. Paremale liikudes suureneb antimoni ja väheneb plii osakaal sulamis.

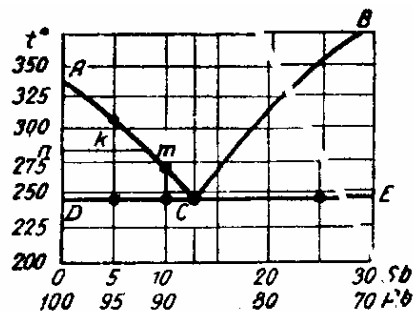
Joonis 2.9. Puhta raua jahtumiskõver ja struktuuri polümorfseid muutused.



Joonis 2.8. Valandi tüüpiline makrostruktuur: 1 – peeneteraline koorik, 2 – sammakristallide tsoon, 3 – võrdtelgsete kristallide tsoon.



Joonis 2.10. Plii-antimonisulamite jahtumiskõverad.



Joonis 2.11. Plii-antimonisulamite olekudiagramm.

Kristalliseerumise alguspunktide 1 – 1' geomeetriselised kohad moodustavad joone *ACB* (joonis 2.11). Sellest ülalpool on sulam vedel, millest ka joone nimi – *likvidusjoon*. Sulami täielikku tardumist näitavate punktide 2 – 2' geomeetriseliseks kohaks on joon *DCE* (joonis 2.11). Sellest allpool on sulam tahke, millest ka joone nimi – *solidusjoon*. Temperatuurivahemikes likvidus- ja solidusjoone vahel eksisteerivad üheaegselt kaks faasi – vedel ja tahke. Sulami faas on ühesuguse keemilise koostisega ja ühesuguste füüsikaliste omadustega osade kogum, mida teistest osadest eraldab piirpind. Joonisel 2.11 toodud olekudiagrammi täpsem nimi on *faasidiagramm*.

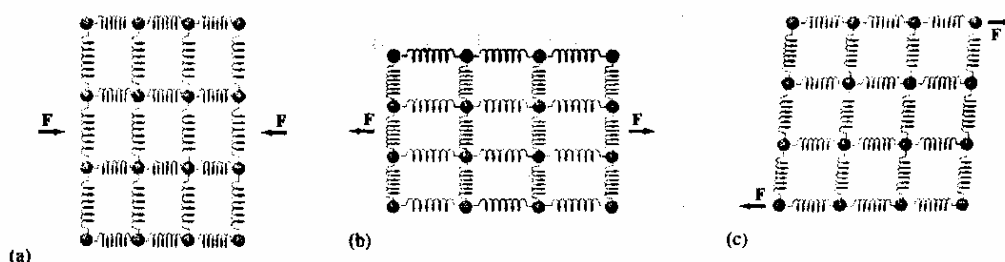
Sulamiga jahtumisel diagrammi joonel *AC* hakkavad eralduma *Pb* kristallid. Sulamis on nüüd kaks faasi, mis erinevad keemiliselt koostiselt – tahke faas koosneb puhtast *Pb*-st, vedel faas *Pb* ja *Sb*-st.

Joonel *CB* hakkavad eralduma *Sb* kristallid. Punktis *C* eralduvad vedelast sulamist üheaegselt nii *Pb* kui ka *Sb* kristallid, moodustades mehaanilise segu, mida nimetatakse *eutektikumiks*. Joone *DCE* ülejäänud punktides on veel tardumata sulam saavutanud punktile *C* vastava koostise ja tardub eutektikumiks. Seejuures joonel *DC* tekib struktuur, mis koosneb *Pb* kristallidest ja eutektikumist, joonel *CE* aga *Sb* kristallidest ja eutektikumist.

2.5. Metallide ja sulamite mehaanilised omadused

2.5.1. Deformatsioon ja purunemine

Deformatsiooniks nimetatakse tahke keha ehk tahkise kuju ja mõõtmete muutumist väliskoormuse toimel. *Elastseks deformatsiooniks* nimetatakse koormuse mõju lakkamisel kaduvat deformatsiooni. Tahkise aatomid olid paigutatud ümber suhteliselt vähe ja koormuse eemaldamisel võtsid nad esialgsed asendid tänu aatomitevahelistele tõmbe- ja tõukejõududele. Nende jõudude toimet võib võrrelda vedrude toimega, mille külge näivad aatomid olevat kinnitatud (joonis 2.12).



Joonis 2.12. Aatomite ümberpaigutus kristallivõres survejõu *F* toimel (a), tõmbejõu *F* toimel (b) ja nihkejõu *F* toimel (c).

Elastsele kehale mõjuva pinge ja tema deformatsiooni vahel kehtib võrdeline seos (Hooke'i seadus)

$$\sigma = E \epsilon,$$

kus *E* on elastsusmoodul.

Seega on elastsusmoodul materjalide elastsuse näitaja ja teda võib käsitleda aatomitevaheliste sidemete mõõduna tahketes kehaes ehk tahkistes.

Metallide elastsuse näitajad on:

- normaalelastsusmoodul E (normaalpinge σ ja joondeformatsiooni ϵ suhe),
- nihkeelastsusmoodul G (nihkepinge τ ja nihkedeformatsiooni γ suhe),
- mahtelastsusmoodul K (rõhu p ja suhtelise mahumuutuse ν suhe).

Raua puhul on moodulite väärtused $E = 2,17 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$ ja $G = 8,47 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$.

Plastne deformatsioon algab kui pinged ületavad proportsionaalsuspiiri. Pärast koormuse eemaldamist kaob elastne kuid säilib plastne deformatsioon. Metallide kristallid nihkuvad üksteise suhtes. Plastsel deformatsioonil muutuvad metallide mehaanilised omadused: suurenevad tõmbetugevus ja kõvadus, väheneb plastsus. Metall *kalestub* tänu dislokatsioonide arvu suurenemisele kristallivõres, mis tõstab vastupanu edasisele deformeerimisele. Kalestumisel vähenevad metalli tihedus ja vastupanu korrosioonile, suureneb elektritakistus ja muutuvad ferromagnetiliste materjalide magnetomadused. Kalestumisnähtust kasutatakse ära metallide tugevdamiseks ja kõvendamiseks külmsurvetöötlemisel.

Plastsele deformatsioonile järgneb keha *purunemine*. Eristatakse kahte liiki purunemist:

- *habras purunemine* toimub normaalpingete tagajärjel, puudub eelnev märgatav deformatsioon;
- *sitke purunemine* toimub nihkepingete tagajärjel, eelneb märgatav plastne deformatsioon.

Purunemise esimeses staadiumis tekib mikropragu terade piiril või kristallivõres olevate defektide (dislokatsioonide) piirkonnas, kus pingete kontsentratsioon põhjustab prao. Purunemise teises staadiumis areneb pragu läbi tahke keha. Hapral purunemisel toimub see kiiresti, sitkel purunemisel aeglaselt. Seetõttu on habras purunemine ohtlikum.

Murdepinna järgi võib otsustada purunemise iseloomu üle. Kiuline, matt murdepind paljude mikropragudega osutab sitkele purunemisele. Kristalliline, läikiv murdepind ühe-kahe mikropraoga osutab haprale purunemisele.

Eriliseks purunemisviisiks on *väsimuspurunemine*, mis seisneb materjali korduvas plastses deformeerimises ja katketugevuse vähenemises aatomitevaheliste sidemete järk-järgulise nõrgenemise tõttu. Väsimuspragu tekib hetkel, kui katketugevus on vähenenud mõjuvate pingeteni. See väike pragu ei põhjusta keha purunemist, sest tegelikud pinged on väiksemad tugevuspiirist. Edasisel tsüklilisel koormamisel muutub väsimuspragu sügavamaks vähendades sellega materjali töötava ristlõike pindala. Kui ristlõike pindala väheneb niivõrd, et tegelikud pinged ületavad tugevuspiiri, siis keha puruneb.

2.5.2. Materjalide mehaanilised omadused

Materjalide vastupanu deformeerimisele ja purunemisele iseloomustavad materjalide mehaanilised omadused: tugevus, kõvadus, plastsus ja sitkus.

Tugevus on materjali võime purunemata taluda koormust. Metallide tugevusnäitajateks on proportsionaalsuspiir, voolavuspiir, tugevuspiir jt. Eristatakse staatilist, dünaamilist, kestustugevust jm.

Kõvadus on materjali võime vastu panna kohalikule plastsele deformatsioonile. Kõvaduse määramiseks surutakse kõvast materjalist otsikut – indentorit uuritava materjali pinda.

Plastsus on materjali võime muuta purunemata talle rakendatud väliskoormuse mõjul oma kuju ja mõõtmeid ning säilitada jäävat deformatsiooni pärast väliskoormuse lakkamist.

Sitkus on materjali omadus koormamisel taluda (enne purunemist) olulist deformeerimist. Sitkuse vastandomadus on *haprus*.

Sõltuvalt koormamisviisist eristatakse *staatilisel*, *dünaamilisel* ja *tsüklilisel* koormamisel määratavaid mehaanilisi omadusi.

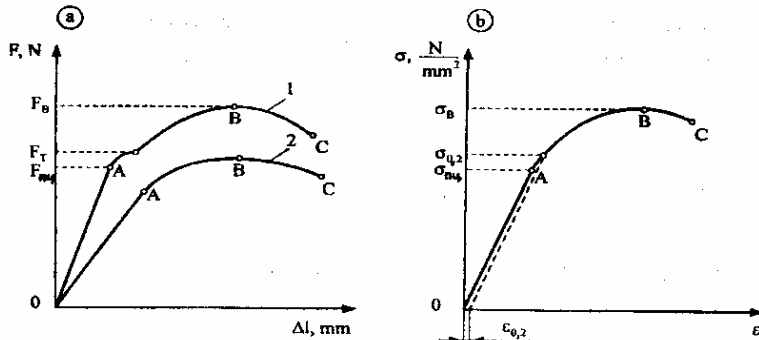
Koormamist, mida tehakse teatud kindlatel standardtingimustel, nimetatakse *teimiks*.

2.5.3. Staatilisel koormamisel määratavad omadused

Staatilisel koormamisel tehakse tõmbeteim, surveteim, paindeteim, väändeteim ja kõvadusteim. Metallide puhul kasutatakse kõige enam tõmbeteimi (malmi puhul ka surveteimi), millel määratavad omadused on metallide valiku ja neist valmistatavate toodete tugevusarvutuse aluseks.

Tõmbeteim

Tõmbeteimil määratakse Eesti standardi EVS-EN 10002-1 kohaselt materjali tugevusomadustest voolavuspiir (R_{eH} – ülemine, R_{eL} – alumine, R_p – tinglik) ja tõmbetugevus R_m , plastuse näitajatest katkevenivus $A\%$ ja katkeahenemine $Z\%$. Nende parameetrite väärtused pingehikutes N/mm^2 ehk MPa määratakse katsekehade ehk teimikute abil, mille mõõtmed ja kuju sätestab sama standard.



Joonis 2.13. Tõmbediagrammid

Tõmbeteimil koostatakse katseandmete tuginedes tõmbejõu ja pikenemise (joonis 2.13. a) või pinget ja deformatsiooni (joonis 2.13. b) diagrammid.

Tõmbediagrammi lõigus OA kehtib proportsionaalne seos jõu (pinge) ja pikenemise (deformatsiooni) vahel. Punktile A vastavat pinget σ_{III} nimetatakse proportsionaalsuspiiriks. See arvutatakse kui $\sigma_{III} = F_{III} / A_0$, kus A_0 on teimiku ristlõike algpindala.

Elastuspiir R_e^D on pinge, milleni deformatsioon on elastne. Proportsionaalsus- ja elastuspiir on enamuse metallide jaoks niivõrd lähedaste väärtustega, et neid tõmbediagrammil ei saa eristada.

Koormus üle elastuspiiri kutsub esile teimiku jääva pikenemise. Mõnede metallide (raud, väikese süsinikusisaldusega terased) tõmbediagrammil esineb nn voolavusplatvorm (joonis 2.13. a), millest järeldub, et metall voolab ilma koormust suurendamata. Pinget, mis vastab jõule F_T , nimetatakse voolavuspiiriks σ_T . Selle väärtus arvutatakse kui $\sigma_T = F_T / A_0$. Enamiku metallide tõmbediagrammil voolavusplatvorm puudub (joonis 2.13. b). Seepärast kasutatakse voolavuspiiri asemel tinglikku voolavuspiiri $R_{p0,2}$, mis määratakse jääva deformatsiooni $\epsilon = 0,2\%$ korral.

Tõmbetugevuspiir e tõmbetugevus on pinge σ_B , mis vastab maksimaalsele jõule F_B ja mis arvutatakse kui $\sigma_B = F_B / A_0$. Haprad materjalid purunevad pärast selle pinget saavutamist. Plastsetel materjalidel moodustub teimikul kael – ristlõike pindala väheneb ja teimik puruneb.

Materjalide plastuse näitajad – katkevenivus A ja katkeahenemine Z määratakse alljärgnevalt:

$$A = \frac{(l_k - l_0) \cdot 100\%}{A_0}, \quad Z = \frac{(A_0 - A_k) \cdot 100\%}{A_0},$$

kus l_0 – teimiku tööosa algpikkus,

l_k – teimiku tööosa pikkus pärast katkemist (lõpp-pikkus),

A_0 – teimiku tööosa ristlõike algpindala,

A_k – teimiku minimaalne ristlõikepindala pärast katkemist (lõpp-pindala).

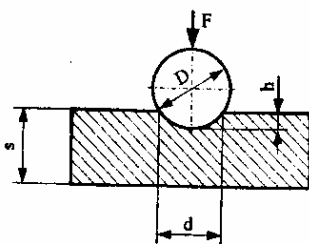
Surveteim

Surveteimil määratakse materjalide mehaanilised omadused nii nagu tõmbeteimi puhulgi. Erinevalt tõmbeteimist määratakse surveteimil survetugevus R_m^D ja suhteline lühenemine δ ning ristlõike laienemine ψ . Survedigramm koordinaadistikus jõud-lühenemine on näha joonisel 2.14. Tingliku voolavuspiiri survele $\sigma_{0,2}^C$ ja survetugevuse σ_B^C arvutamine on analoogne tõmbeteimi pingete arvutamisega, kui lähtutakse survedigrammi jõududest $F_{0,2}^C$ ja F_{max}^C .

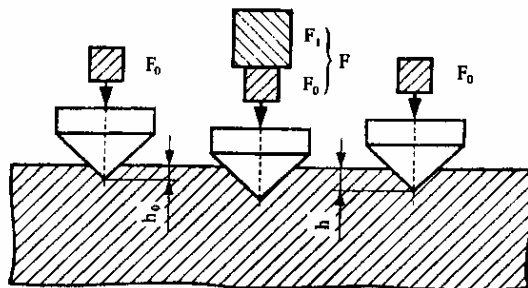
Kõvadusteim

Kõvadus on materjali võime vastu panna kohalikule plastsele deformatsioonile, kui tema pinda tungib suurema kõvadusega keha. Kõvadust määratakse otsiku – *indentori* toime järgi materjali pinnasse. Väga kõvast materjalist (teemant, kõvasulam, karastatud teras) indentoril on kuuli, koonuse või püramiidi kuju. Kõvaduse määramiseks rakendatakse indentorile teatud koormust, mille toimele ta tungib materjali pinda. Pärast koormuse kõrvaldamist jääb indentorist materjali jälg. Mida pehmem on materjal, seda sügavamale tungib indentor ja seda suurem on jälg. Kõvadust hinnatakse mitmel meetodil.

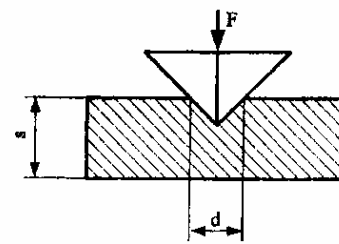
Brinelli kõvaduse määramiseks surutakse uuritava materjali pinda karastatud teraskuul. Kuuli läbimõõt on kas 10, 5, 2,5, 2 või 1 mm. Brinelli kõvadusarv määratakse kuulile toimiva jõu ja tekkiva sfäärilise jälje pindala suhtena. (joonis 2.15). Standardtingimustes on kuuli läbimõõt 10 mm, kuulile mõjuv jõud on 30 000 N ja mõjumisaeg 10–15 s. Sel juhul tähistatakse kõvadust näiteks nii – 185 HB.



Joonis 2.15. Kõvaduse määramine Brinelli meetodil.



Joonis 2.16. Kõvaduse määramine Rockwelli meetodil.



Joonis 2.17. Kõvaduse määramine Vickersi meetodil.

Rockwelli kõvadus määratakse teraskuuli, läbimõõduga 1,588 mm ja survejõu $F=980$ N, või teemantkoonuse, tipunurgaga 120° ja survejõu $F = 588$ N, materjali sisse surumise teel. Katsetamisel surutakse kõigepealt kuul või koonus materjalisse jõuga $F_0 = 98$ N ja fikseeritakse tema asend. Seejärel rakendatakse eelmainitud jõudusid F ja siis taastatakse esialgne jõud F_0 . Kõvadust iseloomustab kuuli või koonuse materjalisse tungimise sügavuste vahe (joonis 2.16).

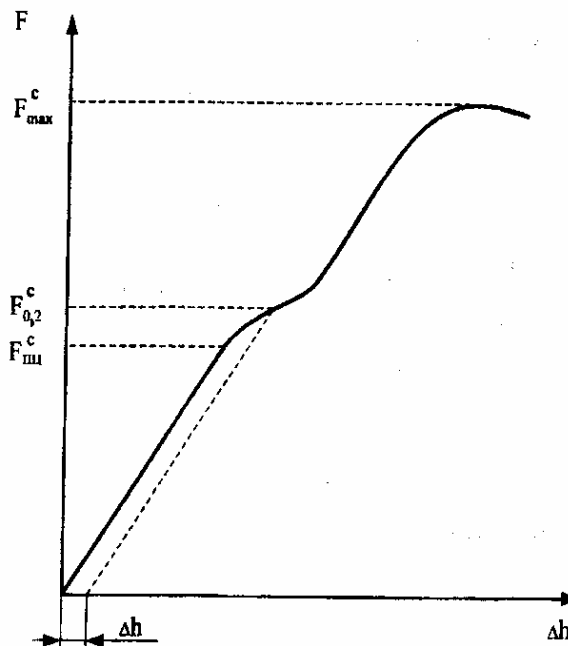
Kõvadusarv saadakse vahetult indikaatori skaalalt. Skaalaid on mitu A, B, C jt ning nad märgitakse kõvaduse tähisesse HRA, HRB, HRC jt.

Vickersi kõvaduse määramise meetod põhineb teemantpüramiidi surumisel uuritava materjali pinnasse. Meetod võimaldab määrata nii pehmete kui ka väga kõvade materjalide kõvadust ja sobib ka õhukeste metallpinnete kõvaduse määramiseks. Neljatahulise teemantpüramiidi tahkudevaheline tipunurk on 136° ja rakendatav jõud 9,8 kuni 980 N (joonis 2.17).

Pärast püramiidi surumist materjali pinda jääb jälg, mille diagonaal mõõdetakse ja tulemuse järgi antakse hinnang kõvadusele. Standardtingimustel ($F = 300$ N ja koormuse kestus 10–15 s) on kõvaduse tähis näiteks 500 HV. Erinevused standardtingimustest märgitakse pärast tähti HV.

2.5.4. Dünaamilisel koormamisel määratavad omadused

Dünaamiline on selline koormamine, mil koormus muutub (kas suuruse või suuna poolest) kiiresti. Peamiseks materjalide katsetamise mooduseks on löökpaandeteim.



Joonis 2.14. Survedigramm.

Tabel 2.1. Metallide tugevusomadused (1, lk 60).

Materjal	Tugevusomadused N / mm ²		
	$\sigma_B (R_m)$	$\sigma_T (R_p)$	σ_{-1}
Süsinikteras			
- külmtõmmatud	455	275	240
- lõõmutatud	750	475	340
Legeerteras	2000	1720	690
Alumiiniumsulamid	310	276	97
Titaanisulamid	1035	885	515
Vasesulamid (68% Cu)	524	435	145
Magneesiumsulamid	215	110	80

3. METALLIDE SAAMINE

3.1. Metallurgia

Metallurgia on tööstusharu, mis tegeleb metallide ja metallisulamite saamisega looduslikest ühenditest – maakidest – ja nende töötlemisega.

Metallurgilised protsessid jaotatakse olenevalt nende füüsikalise-keemilise iseloomust järgmiselt.

Pürometallurgia – metallide ja sulamite saamine kõrgel temperatuuril, mis tekib kütuse põlemisel. Nii saadakse malmi, terast ja paljusid värvilisi metalle.

Hüdro metallurgia – metallide saamine nende soolade vesilahustest. Kasutatakse mõnede värviliste metallide tootmiseks. Püro- ja hüdro metallurgilised protsessid täiendavad teineteist ja neid kombineeritakse omavahel.

Elektrometallurgia – metallide ja sulamite saamine elektrienergia abil. Kasutatakse legeeritud terase, rasksulavate ja keemiliselt aktiivsete metallide (Ti, Mo, Cr, W, V jt) tootmiseks. Elektrokeemilise protsessi – elektrolüüsi abil saadakse Al, Zn, Cu jt värvilisi metalle.

Pulbermetallurgia – metallipulbrite saamine ja nendest toodete valmistamine.

3.2. Malmi saamine

3.2.1. Toorained

Malm on rauasulam, mille süsinikusisaldus on üle 2,14%.

Malmi saamisel on tooraineteks rauamaak, mille koostisse kuuluvad rauda sisaldavad mineraalid, mangaanimaak, räbusti ja kütus.

Rauamaake nimetatakse nende koostises olevate mineraalide järgi: *hematiit* Fe_2O_3 (sisaldab 50–60% Fe), *magnetiit* Fe_3O_4 (sisaldab 55–65% Fe), *limoniit* $Fe_2O_3 \cdot n H_2O$ (sisaldab 30–50% Fe), *sideriit* $FeCO_3$ (30–40% Fe). Alati on rauamaagis aherainet (peamiselt savi ja kvartslüüsi) ning kahjulikke lisandeid (S, P, As jt).

Mangaanimaaki, milles Mn esineb oksiidide ja karbonaatidena (MnO_2 , $MnCO_3$ jt), lisatakse rauamaagile 2–3% malmi omaduste parandamiseks.

Räbustiks on lubjakivi CaCO_3 , mis kuumutamisel laguneb ja eraldub CaO . Räbusti on vajalik aheraine jäägi ja kütuse tuha sidumiseks ning eraldamiseks.

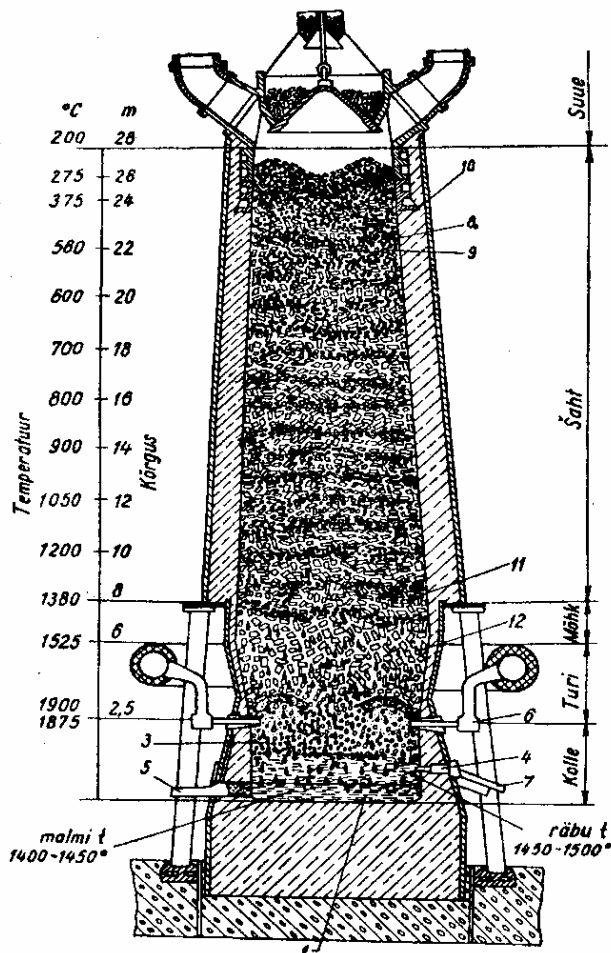
Kütuseks on peamiselt koks, mis saadakse kivisöe koksistamisel, st kuivdestillatsioonil 13–18 tundi ilma õhu juurdepääsuta. Koksi maksumus moodustab ligikaudu poole malmi omahinnast, mistõttu kasutatakse ka teisi kütuseid (looduslik gaas, kivisöetolm, masuut). Kütuse ülesandeks on lisaks kõrge temperatuuri tekitamisele olla keemiliseks reagentiks raua redutseerimisel oksiididest.

Et tagada tootmise efektiivsus on vaja toorained vastavalt ette valmistada. Oluline on maagi peenestamine tüki suuruseni 30–100 mm. Pesemisega eraldatakse rasked maagi osakesed aherainest – liivast ja savist. Särdamisega eemaldatakse niiskus ja põletatakse ära väävel. Magnetsepareerimisel eraldatakse magnetiline maak mittemagnetilisest aherainest.

3.2.2. Malmi pürometallurgia

Malmi tootmine pürometallurgilisel meetodil toimub kõrgahjudes (joonis 3.1). Need on šahtahjud kõrgusega üle 30 m ja läbimõdduga 7–8 m, kus tootmine toimub pidevalt kuni remondini. Selline ahi annab 4–4,5 miljonit tonni malmi aastas.

Toorained – maak, räbusti ja kütus – puistatakse ahju ülalt, kus nad oma raskusega pikkamööda allapoole laskuvad. Ahju allosas tekitatud soojus antakse tõusvate kuumade gaaside poolt alla laskuvatele ainetele.



Joonis 3.1. Kõrgahi: 1 – sulamalm, 2 – malmiava, 3 – sularäbu, 4 – räbuava, 5 – malmirenn, 6 – gaasitoru otsakud, 7 – räburenn, 8 – kütus, 9 – maak, 10 – räbusti, 11 – malmi tilgad, 12 – räbu tilgad.

Kõrgahjuprotsess seisneb oksiidse rauamaagi redutseerimises šahtahjus koksi abil, aheraine jääkide ja kütuse tuha eemaldamises räbusti abil ning vedelmalmi saamises.

Kõrgahjus toimuvad järgmised füüsikalise-keemilised protsessid.

Kütuse põlemine sissepuhutavas õhus nii, et temperatuur ahjus tõuseb 1 800–2 000 °C.

Raua redutseerimine skeemi järgi $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$ toimub Co , C ja H_2 mõjul kõrgahju šahtis.

Raua rikastamine süsinikuga algab šahti ülaosas 400–500 °C juures ja jätkub kuni kuni vedel metall jõuab ahju allosas oleva koldeni.

Malmi moodustumine toimubki vedela metalli voolamisel koldesse, kus selles lahustuvad kasulikud (Mn , Si) ja kahjulikud (P , S) lisandid, ning kujuneb 3,7–4% süsinikku sisaldav malm. Süsinik esineb malmis peamiselt raudkarbiidi Fe_3C kujul, mis lahustub rauas.

Malm lastakse kõrgahjust välja 4 kuni 6 korda ööpäevas. Selleks avatakse ahju malmi väljalaskeava 2 (joonis 3.1) ja malm voolab renni 5. Edasi läheb sula malm kas terasesulatamisahjudesse või valatakse metallvormidesse. Viimastes jahutatakse malmi veega ja jahtunud kangid laaditakse vagunitesse.

Saadud malmist 80–85% kasutatakse ära terase valmistamiseks. Ülejäänud on valumalm, mille süsinikusisaldus on 2,14% kuni 4%, mis sisaldab ligikaudu 4% räni, 2% mangaani, vähem fosforit ja väävlit. Valumalmi turustatakse kangidena ja temast valmistatakse valamise teel masinahituse tooteid.

3.3. Teras saamine

3.3.1. Teras pürometallurgia

Teras on rauasulam, mille süsinikusisaldus on alla 2,14%.

Teras saamiseks on lähteained toormalm ja terasmurd, nn vanaraud. Kuna terases on süsinikusisaldus, samuti ka muude lisandite sisaldus väiksem kui malmis (tabel 3.1), siis seisneb malmist terase valmistamine lisandite koguse vähendamises.

Tabel 3.1. Malmi ja terase keemiline koostis %.

Materjal	C	Si	Mn	P	S
Toormalm	<4,4	0,76–1,26	<1,75	0,15–0,30	0,03–0,07
Teras (vähese C sisaldusega)	0,14–0,22	0,12–0,30	0,40–0,65	0,05	0,055

Seda tehakse lisandite oksüdeerimisega ja nende üleviimisega räbusse või gaasistamisega. See protsess vajab palju hapnikku. Varasemad, kuni XX sajandi alguseni kasutusel olnud terase saamise protsessid seisnesid vedelmalmist õhu läbipuhumises, milles olev hapnik oksüdeeris lisandid. Käesoleval ajal on põhiliseks terase saamise meetodiks hapnikkonverterprotsess, kus malmi lisandite eemaldamiseks kasutatakse puhast hapnikku. Sulatusseade – konverter – täidetakse 70% ulatuses vedela toormalmiga, lisaks veel terasmurd ja lubi. Sisse puhutakse hapnikujuga. Saadakse vedel teras.

Toormalmist iga lisandi eraldamiseks tuleb luua teatud kindlad tingimused. Ajaliselt võib terase saamise metallurgilist protsessi jaotada järgmistesse etappidesse.

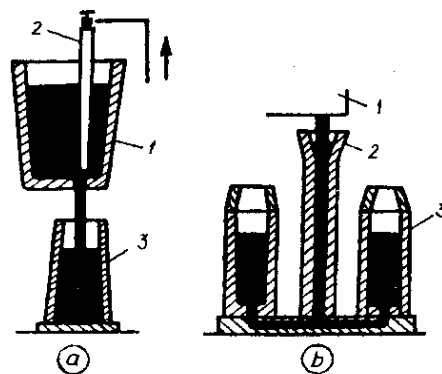
1. Lähteaine sulatamine ja süsteemi metall-räbu tekkimine. Kuna temperatuur on alguses suhteliselt madal, siis oksüdeeruvad kõigepealt Fe (seda on kõige rohkem), Si, P, Mn ja kerkivad oksiididena räbusse. Sel etapil on oluline kahjuliku lisandi P eemaldamine, mis toimubki tänu CaO sisaldusele räbus.
2. Teras "keemine" on seotud temperatuuri tõusmisel süsiniku oksüdeerumisega ja eraldumisega mullide näol. Sel etapil eemaldatakse väävel.
3. Teras desoksüdeerimine. Teras saamisel oli hapnik vajalik lisandite eemaldamiseks. Valmis terases on ta aga kahjulik lisand, mis halvendab terase omadusi. Selleks, et hapnikust vabaneda, viiakse läbi terase desoksüdeerimine kas sadestamisel või difusioonil. Olenevalt protsessi täielikkusest saadakse rahulik (täielikult redutseeritud), keev või poolrahulik teras.
4. Teras legerimine seisneb legerivate elementide lisamises sulaterasele. Väheaktiivsed elemendid (Ni, Co, Mo, Cu), mis praktiliselt ei oksüdeeru, võib lisada protsessi suvalisel etapil. Aktiivsed elemendid (Si, Mn, Al, Cr, V, Ti) lisatakse protsessi lõpus.

3.3.2. Teras tootmine

Valmis vedel teras juhitakse sulatusseadmest valukoppa ja sealt edasi valuplokkivormidesse. Nendest saadakse valuplokkid, mida töödeldakse edasi valtsimise ja sepistamise teel. Valuplokke saadakse ülevaltvalu, sifoonvalu (joonis 3.2) või pidevvalu (joonis 3.3) meetodil.

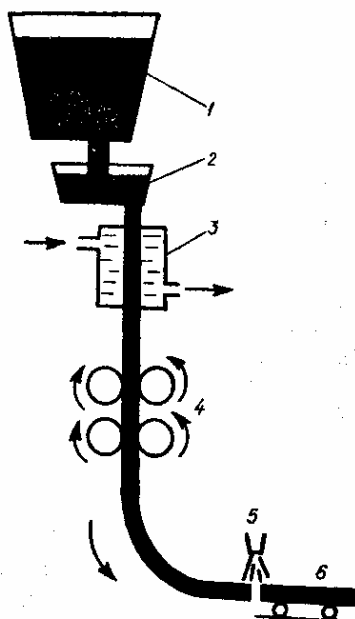
Metall jahtub valuplokkivormis ja tardub. Tekkivate kristallide kuju ja suurus sõltuvad soojuse äravoolu suunast ja kiirusest. Tavaliselt koosneb terasest valuplokk kolmest tsoonist (joonis 3.4).

Vormi seina lähedal on jahtumine kiire ja sinna kujuneb peeneteraline koorik 1 (joonis 3.4). Edasise jahtumise kiirus on suurem vormi normaali suunas ja tekivad sellesuunalised suured sammaskristallid 2. Valuploki keskel, kus soojuse äravool kõigis suundades on ühesugune, tekivad võrdtelgsed



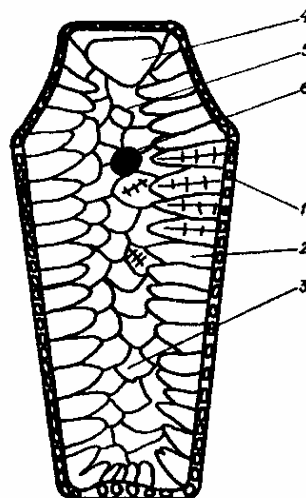
Joonis 3.2. Terasvaluplokkide valamine.

- a) ülaltvalu: 1 – kopp, 2 – sulgur, 3 – valuplokkivorm;
b) sifoonvalu: 1 – kopp, 2 – düstkanal, 3 – valuplokkivorm.



Joonis 3.3. Terasest valuplokkide pidevvalu:
 1 – kopp, 2 – vahkopp, 3 – kristallisaator,
 4 – veovaltsid, 5 – lõikepölet, 6 – valuplokk.

kristallid 3. Et vedelmetalli maht on suurem ja valuploki väliskiht tardub kõigepealt, siis jääb valuplokk kahanemistühik 4. Sinna võivad jääda ka gaasitühikud 5 ja räbutükid 6.



Joonis 3.4. Terasvaluploki struktuur:
 1 – peenekristalliline, 2 – orienteeritud sammakristalliline, 3 – orienteerimata jämedakristalliline, 4 – kahanemistühik, 5 – gaasitühik, 6 – räbutükk

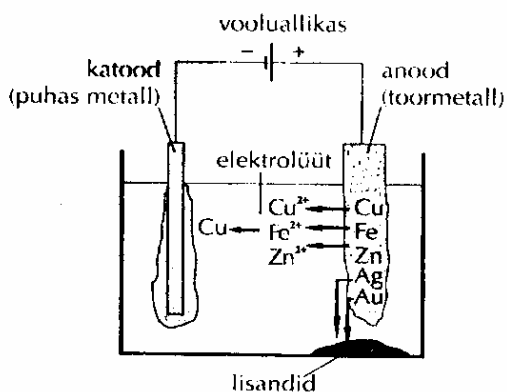
3.4. Värviliste metallide saamine

Vask

Vase saamiseks kasutatakse 1–6% vasesisaldusega vasemaake ja vaske sisaldavaid vanametalli jäätmeid. Maakides leidub enam kui 230 vaske sisaldavat ühendit. Enamasti on need sulfiidid (CuFeS_2 , CuS , Cu_2S), oksiidid (Cu_2O , CuO) või hüdrokarbonaadid ($\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$, $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$).

Oksiidsete ja hüdrokarbonaatsete maakide puhul kasutatakse hüdrometallurgiat. Maaki töödeldakse väävelhappega $\text{CuO} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{CuSO}_4 + \text{H}_2\text{O}$ ja tekkinud vasesoola vesilahusest saadakse vask asendusreaktsiooniga $\text{CuSO}_4 + \text{Fe} \rightarrow \text{FeSO}_4 + \text{Cu}$. Saadud vase puhtus on 70%.

Sulfiidsete maakide puhul kasutatakse püroelektrometallurgiat. Rikastatud maagi kontsentraat sulatatakse ahjus, kus tekivad kaks segunenematut komponenti – vasekivi ($\text{Cu}_2\text{S} + \text{FeS}$) ja räbu. Räbu eemaldatakse ja vasekivi oksüdeeritakse konverteris õhuga läbipuhumise teel kuni toorvase saamiseni $2\text{Cu}_2\text{S} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Cu}_2\text{O} + 2\text{SO}_2$ ja seejärel $2\text{Cu}_2\text{O} + \text{Cu}_2\text{S} \rightarrow 6\text{Cu} + \text{SO}_2$. Toorvask sisaldab umbes 99% vaske ja teda puhastatakse edasi elektrolüütiliselt, st rafineeritakse (joonis 3.5).



Joonis 3.5. Metallide elektrolüütiline puhastamine.

Toorvask, mis saadakse tavaliste metallurgiliste meetoditega, on elektrolüüsivannis anoodiks, ta lahustub elektrolüüdis, milleks on CuSO_4 ja H_2SO_4 vesilahus, ning sadestub uuesti vaba metallina katoodile, milleks on puhas elektrolüütiline vask. Lisandid kas sadestuvad anoodi alla elektrolüüsivanni põhja või jäävad lahusesse, kust neid hiljem keemiliste või elektrokeemiliste võtetega kätte saab. Paljud lisandid on kallid ja defitsiitsed metallid (As, Sb, Bi jt).

Nii saadakse puhas vask, milles lisandeid on vaid 0,01–0,001%.

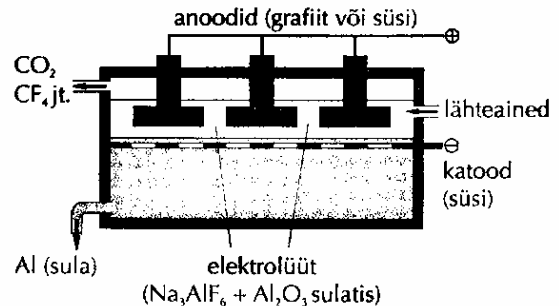
Alumiinium

Levinuimad alumiiniumimaagid on boksiit $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (15–35% Al) ja krüoliit Na_3AlF_6 . Puhta alumiiniumi saamine seisneb maagist kõigepealt puhta Al_2O_3 saamises ja selle järgnevas redutseerimises alumiiniumiks ja hapnikuks elektrolüüsil.

Al_2O_3 saadakse maakide töötlemisel NaOH-ga ja kuumutamisel pöördahjus temperatuuril 1 200 °C. Edasine töötlemine toimub elektrolüüsisivannis, sest pürometallurgia ei ole rakendatav Al suure keemilis aktiivsuse ja Al_2O_3 suure keemilise püsivuse tõttu.

Elektrolüüdiks on Al_2O_3 ja krüoliidi sulalahus, mille sulamistemperatuur on 1 300 °C (puhta Al_2O_3 sulamistäpp on 2 050 °C), anoodiks grafiit või süsi ja katoodiks süsi (joonis 3.6).

Elektrolüüdiks ei sobi vesilahus, sest Al on negatiivsema elektrodipotsiaaliga (-1,66 V) kui vesinik ja seetõttu vesilahuse kasutamisel eralduks katoodil vesinik, mitte aga Al. Vedel alumiinium koguneb vanni põhja, kust ta eemaldatakse.



Joonis 3.6. Alumiiniumi tootmine.

Magneesium

Magneesium esineb maakides peamiselt karbonaatidena (magnesiit – 28% Mg, dolomiit – 13% Mg) ja kloriididena (karnalliit – 9% Mg).

Puhta Mg saamiseks kasutatakse tema sulatatud soolade elektrolüüsi, nii nagu Al puhulgi.

Elektrolüüdiks on peamiselt karnalliit, anoodiks – grafiit ja katoodiks on terasplaadid. Elektrolüüdiks ei sobi soolade vesilahused, sest Mg madala elektrodipotsiaali (-2,38 V) tõttu eralduks katoodil vaid vesinik. Karnalliidis olev MgCl_2 laguneb ioonideks ning Mg positiivneioon redutseerub katoodil. Anoodil eraldub gaasiline kloor.

Saadava Mg puhtus ulatub kuni 99,99% .

Vähempuhta Mg võib saada magnesiidi või dolomiidi pürometallurgilisel redutseerimisel kõrgel temperatuuril (1 150 °C) vaakumis.

Titaan

Titaani leidub maakides oksiididena – rutiil (60% Ti) ja ilmeniit (32% Ti). Tema kättesaamine on aga raske, sest Ti reageerib kõrgel temperatuuril hapniku ja lämmastikuga, vedelas olekus aga kõikide tulekindlate materjalidega. Titaani saamise põhiliseks viisiks on metallotermia, mis seineb järgmises.

Kõigepealt kuumutatakse elektriahjus titaanimaagi kontsentratsiooni ja söe segu kloori keskkonnas, mille tulemusena saadakse punakas vedelik TiCl_4 . Teisel etapil redutseeritakse seda vedelikku magneesiumiga inertsete gaaside (Ar, He) keskkonnas ja saadakse käsnakujuline titaan. Viimasel etapil sulatatakse käsntitaan vaakumahjus ja valatakse plokkideks.

4. RAUA-SÜSINIKUSULAMID

4.1. Raud ja süsinik

Raud (Fe – ferrum) on hõbevalge metall, mis esineb mitme modifikatsioonina. Kuni temperatuurini 769 °C on ta ferromagnetiline ruumkesendatud kuubilise kristallivõrega nn α -raud (joonis 2.9). Temperatuuril 769 °C (Curie punkt) muutub raud paramagnetiliseks, kuigi kristallivõre seejuures ei muutu. Temperatuurivahemikus 910–1 400 °C on raual tahkkesendatud kuubiline kristallivõre nn γ -raud. Kõrgematel temperatuuridel on raual jälle ruumkesendatud kuubiline kristallivõre kuni sulamistemperatuurini 1 539 °C.

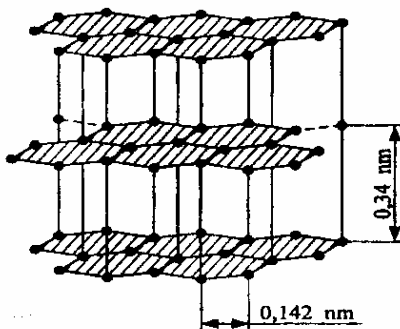
Raud on tänapäeva tehnikas kõige tähtsam metall, ehkki teda puhtal kujul peaaegu ei kasutata vähese tugevuse tõttu. Rauasulamid moodustavad aga 95% kogu maailma metallitoodangust.

Raud moodustab lahuseid paljude elementidega: metallidega – asendustüüpi lahuseid (vt punkt 2.3, joonis 2.6. a), süsinikuga, lämmastikuga ja vesinikuga – sisendustüüpi lahuseid (vt joonis 2.6. b). Suurem osa rauasulameid sisaldavad süsinikku – rauasüsinikusulamid, mis jagunevad terasteks (süsinikusisaldus kuni 2,14%) ja malmideks (süsinikusisaldus 2,14–4%).

Süsinik (C – *carboneum*) esineb looduses kahe modifikatsioonina – teemandi ja grafiidina. Teda on ka kivi- ja pruunsöes, naftas, turbas, maagaasis ja atmosfääris CO₂ kujul 0,03 mahuprotsenti. Kõikide organismide koostises on süsinikuühendeid keskmiselt 18 massiprotsenti.

Teemandikristallis on süsinikuaatomid omavahel väga tugevasti seotud ja moodustavad kolmemõõtmelise kristallivõre. Teemant on väga tihe (3 500 kg/m³) ja kõva (suhteline kõvadus 10 ühikut), dielektriline mineraal.

Grafiidis paiknevad süsinikuaatomid paralleelsete kihtidena (joonis 4.1), kusjuures ühes kihis paiknevate aatomite vahel on tunduvalt tugevamad sidemed kui erinevates kihtides olevate vahel.



Joonis 4.1. Grafiidi struktuur.

Selline struktuur määrab grafiidi unikaalsed omadused. Näiteks plastilisus, mis seletub ühe aatomitasandi hõlpsa libisemisega teise suhtes (pliiats, grafiitmäärde). Aatomite tugev side tasandites ja nõrk side kihtide vahel võimaldab interkaleerida – viia tasandite vahele – grafiiti mitmesuguste ainete aatomeid ja molekule, rikkumata seejuures aatomite sidemeid tasapindades. Näiteks sisestades AsF₅ saame grafiidile vasega võrdse elektrijuhtivuse tasandites, kuid ristisuunas miljon korda väiksema. Grafiidi ühendid leelismetallidega lähevad madalatel temperatuuridel (–268,93 °C) ülijuhitvasse olekusse, ehkki ei grafiidil ega leelismetallidel eraldi seda omadust ei ole. Tasandites on grafiidi aatomite vahelised sidemed teemandile lähedase tugevusega.

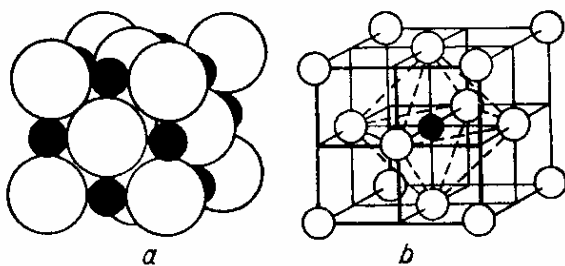
4.2. Fe-Fe₃C faasidiagramm

Süsiniku lahustuvus rauds sõltub raua kristallivõre tüübist.

Ruumkesendatud kuupvõres (α-raud) on liiga vähe ruumi, et sinna võiks mahtuda süsiniku aatom. Analüüs näitab siiski vähest süsinikusisaldust (umbes 0,02%) α-rauas. See on võimalik tänu sellele, et raua reaalses kristallivõres esineb defekte, eriti just terade piiridel, ja just sinna võivad asetuda mõned süsiniku aatomid.

α-rauda, milles on vähesel määral lahustunud süsinikku nimetatakse *ferriidiks*.

Tahkesendatud kuupvõres (γ-raud) on keskel tühimik, kuhu süsiniku aatom võib mahtuda (joonis 4.2. b). Suhteliselt vaba on ka servade keskkohdades, ehkki see koht ei kuulu mitte ainult ühele võrele, vaid neljale. Ka sinna võivad paigutuda süsiniku aatomid. Kui kõik võimalikud tühimikud on täidetud, näeb kristallivõre välja nagu joonisel 4.2. a).



Joonis 4.2. Sisendustüüpi tahke lahuse kristallivõre: a – kõik tühimikud täidetud, b – austeniit.

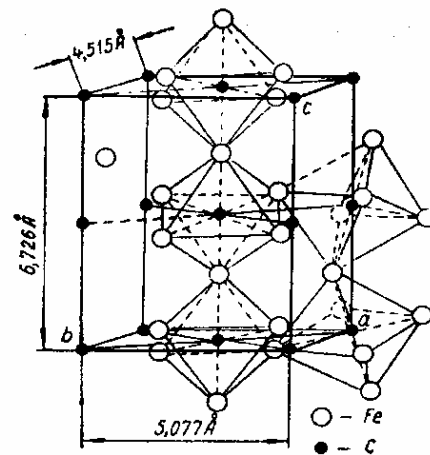
Süsiniku lahust γ-rauas nimetatakse *austeniidiks*. Süsiniku maksimaalne lahustuvus γ-rauas ehk austeniidis on 2,14% ja seda 1 130 °C juures. Kõrgemal temperatuuril algab sulamine ja süsiniku kontsentratsioon austeniidis väheneb.

Süsinik ja raud moodustavad ka keemilise ühendi – raudkarbiidi (Fe₃C), mida nimetatakse *tsementiidiks*. Selle kristallidel on keerukas oktaeedritest koosnev struktuur (joonis 4.3). Iga oktaeedri keskel asub süsinikuaatom.

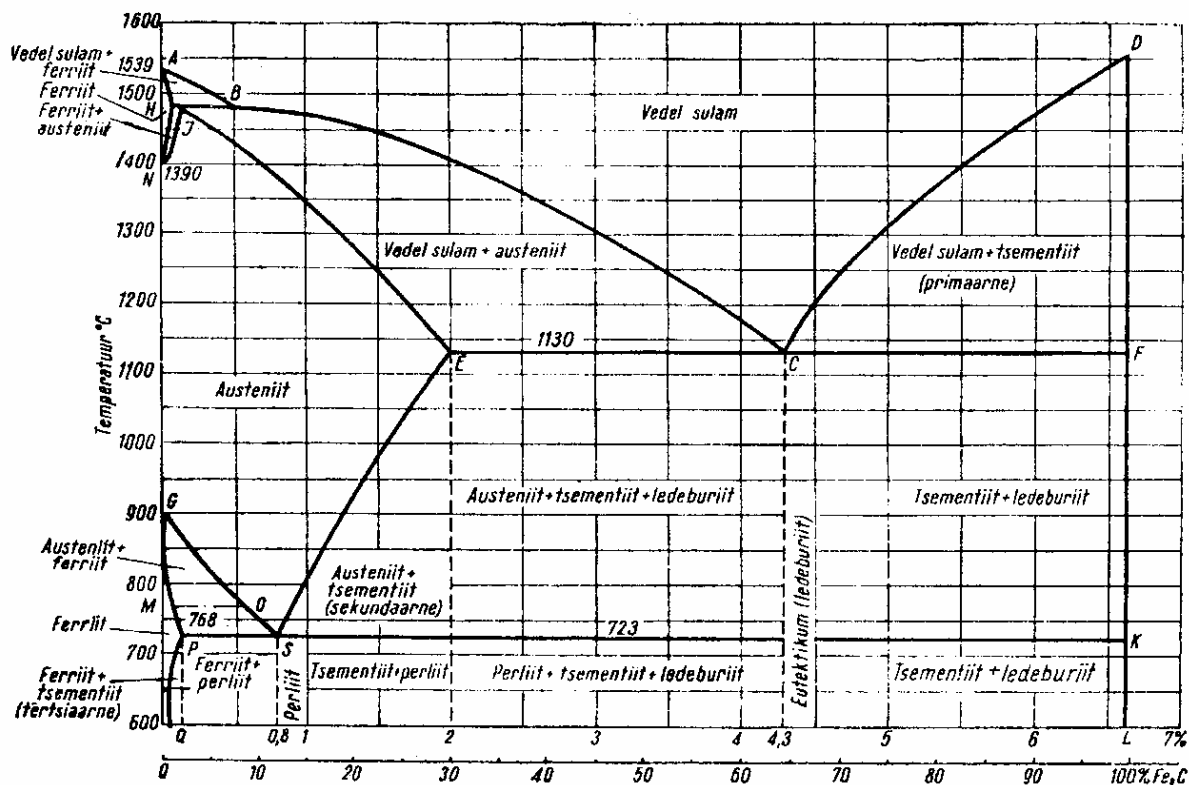
Tsementiidil on metallilised omadused: elektrijuhtivus, metalliline läige jm. Tema sulamistemperatuur on 1 600 °C. Ta on väga kõva (kriimustab klaasi, HB 800) ja praktiliselt nulliga võrduva plastilisusega.

Tsementiit võib moodustada asendustüüpi tahkeid lahuseid. Ta on ebapüsiv ühend ja teatud tingimustel laguneb. See asjaolu on oluline suure süsinikusaldusega malmide jaoks.

Nagu kõigi kahekomponentsete sulamite kohta (vt näiteks plii-antimonisulamite faasidiagramm joonisel 2.11) nii võib ka raua ja süsiniku sulamite kohta koostada faasidiagrammi. Kontsentratsioonitelje vasakpoolses otsas oleks puhas raud. Parempoolsesse otsa ei ole aga mõtet panna puhas süsinikku, sest praktilist huvi pakuvad ja kasutamist leiavad vaid väikese süsinikusaldusega sulamid. Seetõttu sobiks sinna hoopis paremini tsementiit, milles sisaldub 6,67% süsinikku ja diagrammi võiks nimetada ka raudtsementiit diagrammiks (joonis 4.4).



Joonis 4.3. Tsementiidi kristalli struktuur.



Joonis 4.4. Raud-süsinik faasidiagramm.

Raud-süsinik faasidiagrammil (joonis 4.4) joon ABCD on likvidusjooneks, millest ülalpool on sulam vedel, ja joon AHJECF solidusjooneks, millest allpool on sulam tahke. Kuna raual on kaks allotroopset kuju – α -raud ja γ -raud ning ta moodustab süsinikuga ka keemilise ühendi, siis esinevad süsteemis järgmised faasid.

Tsementiit, mida tähistab joonisel 4.4 vertikaaljoon DFKL.

Ferritiit, mis joonisel 4.4 esineb jooonte GPQ ja AHN ning temperatuuritelje vahel.

Austeniit, mille ala joonisel 4.4 on NJESG.

Kolm horisontaaljoont diagrammil HJB, ECF ja PSK tähendavad kolme faasimuutust.

Temperatuuril 1 495 °C (joon HJB) tekib austeniit. See toimub ainult nendes sulamites, mis sisaldavad süsinikku 0,1–0,5%.

Temperatuuril 1 147 °C (joon ECF) tekib eutektiline segu austeniidist ja tsementiidist, mida nimetatakse *ledeburiidiks*. See toimub sulamite puhul, mis sisaldavad rohkem kui 2% süsinikku.

Temperatuuril 727 °C (joon PSK) laguneb austeniit ferriidi ja tsementiidi seguks, mida nimetatakse *perliidiks*. See toimub kõigis sulamites, mis sisaldavad rohkem kui 0,02% süsinikku (vastab süsiniku kontsentratsioonile punktis P), seega praktiliselt kõigis kasutatavates raua-süsinikusulamites.

Diagramm (joonis 4.4) on keeruka kujuga. Tema paremaks mõistmiseks tuleks vaadelda faasilisi muutusi ühes teatud kindla kontsentratsiooniga sulamis. Selleks tuleks kontsentratsioonitelje punktist, mis vastab sulami koostisele, tõmmata vertikaaljoon ja vaadata, milliseid alasid diagrammil ta lõikab. Liikudes sellel joonel ülalt alla same teada, millised faasimuutused toimuvad sulamis selle jahtumisel alates vedelast olekust kuni temperatuurini, mil faasimuutused lõpevad.

4.3. Terased

4.3.1. Teraste liigitus

Eurostandard EN 10020 liigitab kõik terased kaheks – mittelegeerterased ja legeerterased. Terase legeerituse määrab lisandite sisaldus. Kui see on väiksem tabelis 4.1 toodud normist, siis on tegemist mittelegeeritud terasega, kui suurem, siis on tegemist legeerterasega.

Tabel 4.1. Lisandite sisaldus mittelegeer- ja legeerterastes (6, tabel 1.1).

Tähis	Nimetus	Sisaldus (% massist)	Tähis	Nimetus	Sisaldus (% massist)
Al	Alumiinium	0,10	Pb	Plii	0,40
B	Boor	0,0008	Se	Seleen	0,10
Bi	Vismut	0,10	Si	Räni	0,50
Co	Koobalt	0,10	Te	Telluur	0,10
Cr	Kroom	0,30	Ti	Titaan	0,05
Cu	Vask	0,40	V	Vanaadium	0,10
La	Lantaniidid	0,05	W	Volfram	0,10
Mn	Mangaan	1,65	Zr	Tsircoonium	0,05
Mo	Molübdeen	0,08	Muud lisandid (fosfor, väävel, lämmastik), v.a süsinik		0,05
Nb	Nioobium	0,06			
Ni	Nikkel	0,30			

4.3.2. Mittelegeerterased

Mittelegeerterased jagunevad:

- tavaterased,
- kvaliteetterased,
- vääristerased.

Tavateraste süsinikusisaldus on $\geq 0,10\%$, fosfori- ja väävlisisaldus $\geq 0,045\%$ ning nad ei sisalda legeerivaid elemente (va Si ja Mn). Neil ei ole erikvaliteeditunnuseid ja nad ei ole mõeldud termotötluseks ega eritöötlemiseks (sügavtõmbamiseks, külmprofileerimiseks jne). Tavateraste mehaaniliste omaduste piirväärtused on järgmised: tõmbetugevus $R_m \leq 690 \text{ N/mm}^2$, voolavuspiir $R_{p0,2} \leq 360 \text{ N/mm}^2$, pikenemine $A \leq 26\%$, purustustöö löökpaindel $AV \leq 27 \text{ J}$.

Kvaliteetterastele ei esitata erinõudeid termotötluse ega mittemetalsete lisandite sisalduse osas. Keemiline koostis ja valmistamisviisid on aga küllalt täpselt määratud ja nii on saavutatud teatud kindlad mehaanilised ja tarbimisomadused.

Vääristerased sisaldavad süsinikku üle 0,25% ja on seega karastatavad, kusjuures standardid esitavad nõuded läbikarastavuse ja pinnakõvaduse kohta. Neis on väga vähe mittemetalsete lisandeid (S- ja P-sisaldus

kuni 0,020%). Standardites esitatakse nõuded mehaaniliste omaduste suhtes – löögisitkus, purustustöö löökpaindel vähemalt 27 J.

4.3.3. Legeerterased

Legeerterased jagunevad:

- legeerkvaliteetterased,
- legeervääristerased.

Legeerkvaliteetteraste kasutusalaad kattuvad suurelt osalt mittelegeerteraste omadega, kuid erinevused ilmnevad legeerivate elementide sisalduses ja sellest tingitud kasutusalas (ei kasutata parendatult või pindkarastatult). Legeerkvaliteetteraste hulka kuuluvad keevitatavate teraskonstruksioonide, surveanumate ja -torustike terased, rõõbaste terased, ainult Cu-ga, Si-ga või Si ja Al-ga legeeritud terased (magnetterased).

Legeervääristeraste erilised töötlus- ja kasutusomadused on tagatud täpse keemilise koostise ja valmistamisviisiga. Sellesse gruppi kuuluvad roostevabad- (C sisaldus alla 1,20%, Cr sisaldus üle 10,5%), kiirlõike- (Mo, W ja V kogusisaldus 7%), kuumuskindlad-, kuullaagri-, tööriista- ja muud eriomadustega terased.

4.3.4. Teraste tähistus

Teraste tähistamine toimub Eurostandardite EN järgi. Nende loomisel on aluseks olnud Saksa standardid DIN. Iga terase tähistamiseks kasutatakse kahte tähist:

- terase margitähis (EN 10027-1),
- terase tunnusnumbrit (EN 10027-2).

Terase margitähis koosneb põhitähisest ja lisatähisest. Lisatähised iseloomustavad kas mehaanilisi ja füüsikalisi omadusi (Grupp 1), või keemilist koostist (Grupp 2).

Nii on põhitähisena kasutusel järgmised tähed: **S** – ehitusterased, **E** – masinaehitusterased, **B** – sarrusterased, **L** – torujuhtmete terased, **P** – surveotstarbelised terased, **R** – relsiterased, **H** – külvaltsterasleht, **D** – pehmeterasleht külmvormimiseks, **M** – elektrotehniline terasplekk jne.

Järgnevalt toome näiteks mõned teraste margitähised (põhi- ja lisatähis koos):

S355JO – ehitusteras, mille elastsuspiir on $R_e = 355 \text{ N/mm}^2$ ja purustustöö 0°C juures 27 J;

P265B – surveotstarbeline teras elastsuspiiriga $R_e = 265 \text{ N/mm}^2$ gaasiballoonide valmistamiseks;

E295 – masinaehitusteras elastsuspiiriga $R_e = 295 \text{ N/mm}^2$;

B500N – sarrusteras elastsuspiiriga $R_e = 500 \text{ N/mm}^2$ normaalse algpikenemisega.

Terase tunnusnumber on kuni seitsmekohaline number, mille esimene number näitab materjali põhigruppi (I – teras). Järgmised kaks numbrit tähistavad terase klassi, neljas ja viies number tähistavad terase järjekorranumbrit antud klassis. Kuues ja seitsmes on lisanumbrid, mis tuuakse ära vajadusel iseloomustada terase saamisviisi (6. positsioon) ja väljastamisolekut (7. positsioon).

Näiteks on mittelegeeritud tavaterastele omistatud klassinumbrid 00 ja 90, kvaliteetterastele 01 kuni 09 ja 91 kuni 99, vääristerastele klassinumbrid 10 kuni 19. Legeerteraste klassinumbrid on 20 kuni 89.

4.3.5. Terase termotöötlus

Termotötluse eesmärgiks on metalli omaduste muutmise teema struktuuri muutmise teel.

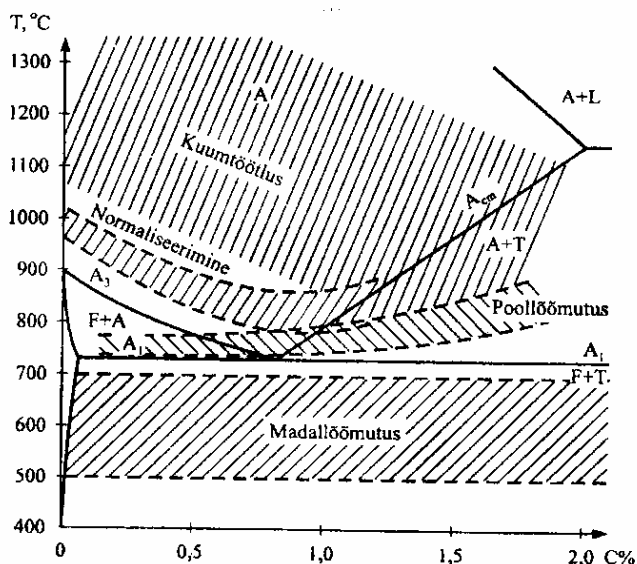
Temperatuuri muutumisel sulamites toimuvaid struktuurimuutusi kajastavad faasidiagrammid. Iga struktuurimuutus vajab oma kulgemiseks teatud aega. Faasidiagrammid on koostatud eeldusel, et kõik muutused jõuavad täielikult toimuda diagrammides näidatud temperatuurivahemikes. Kuumutamise või jahutamise kiiruse ja tingimuste muutmiseega on võimalik faasimuutusi kiirendada, aeglustada või koguni vältida. Nii on võimalik kujundada metallile soovitud struktuur. Peamised tegurid, mis mõjutavad termotötlust on temperatuur ja aeg. Olulised on kuumutuskiiirus ja jahutuskiiirus ning teatud temperatuuridel hoidmise aeg.

Sulami omaduste oluliseks muutmiseks termotöötlemiseks tuleb muuta tema struktuuri. Selleks on vaja, et temperatuur tõuseks üle faasidiagrammiga määratud faasimuutuse temperatuuri.

Sulami omadused võivad muutuda aga ka tema kuumutamisel madalamatel temperatuuridel.

Lõõmutamine

Igasugune kuumutamine suurendab aatomite liikuvust ja korrastab niiviisi struktuuri ning võib muuta ka omadusi. Näiteks kui metallis on eelneva töötlemisega (plastne deformeerimine külmas olekus, lõiketöötlemine jm) tekkinud sisepinged, siis on kuumutamise (500–650 °C) ja sellele järgneva aeglase jahutamisega võimalik anda toote struktuurile stabiilsem olek. Sellist termotöötlemise viisi nimetatakse *madallõõmutamiseks*.



Joonis 4.5. Terase lõõmutustemperatuuride vahemikud.

Täisloõmutusel kuumutatakse sulam üle faasimuutuse piiri A_{C3} (joonis 4.5) temperatuuri ja jahutatakse seejärel aeglaselt. Täht "c" temperatuuri tähise indeksis tähendab kuumutamist, jahtumisel oleks sama temperatuuri indeksiks täht "r" (prantsuskeelsetest sõnadest).

Sellise töötlemisega saadakse valamisel või sepistamisel tekkinud jämedateralise struktuuri asemel peeneteraline sisepingeteta struktuur. Kuumutamisel tekkinud austeniit muutub aeglasel jahutamisel peeneteraliseks ferriitperliitstruktuuriks.

Eristatakse veel *poollõõmutust*, mida kasutatakse terase kõvaduse vähendamiseks, plastsuse suurendamiseks ja sisepingete kaotamiseks.

Karastamine

Karastamine seisneb terase kuumutamises üle A_{C3} piiri ja järgnevas kiires jahutamises. Faasimuutused, mis sel puhul toimuvad, seisnevad selles, et austeniit (süsiniku tahke lahuse γ -rauas) ei saa laguneda ferriidiks ja tsementiidiks piiril A_{F1} , nagu näeb ette faasidiagramm, vaid muutub *martensiidiks* (süsiniku üleküllastatud tahke lahuse α -rauas).

Varem konstateerisime süsiniku väga vähest lahustuvust α -rauas (vt punkt 4.2) – 0,02%. Et kiirel jahtumisel süsinikku ei eraldu, siis on martensiit üleküllastatud tahke lahuse. Austeniidis asuvad raua aatomid tahkesendatud kuupvõre. Martensiidis rühmituvad raua aatomid ruumkesendatud kuupvõreks.

Kiire jahutamine on vajalik temperatuurivahemikus 650–550 °C, kuna just selles vahemikus tekib austeniidist kõige enam martensiiti. Mida kiirem jahutus, seda rohkem tekib martensiiti ja seda suurem kõvadus saadakse. Seevastu temperatuurivahemikus 300–200 °C on soovitatav aeglane jahutamine – mida aeglasem jahutamine, seda vähem tekib sisepingeid ja pragusid. Jahutuskeskkonnad on vesi, õli ja soolade ning leeliste vesilahused.

Olulist rolli karastamisel etendab terase süsinikusisaldus. Martensiidi kõvadus tõuseb kui süsinikusisaldus suureneb 0,2% kuni 0,8%. Samuti suureneb ka karastusefekt. Edasine süsinikusisalduse tõus ei tõsta kõvadust, sest suureneb jääkausteniidi, mis ei muutu martensiidiks, kogus.

Kiirel kuumutamisel, näiteks kõrgsagedusvooluga, kuumeneb kõigepealt toote välispind. Kui toode nüüd kiirelt jahutada, saadakse karastusefekt vaid pinnakihis. Tegemist on *pindkarastusega*, mida läbinud tooteid iseloomustavad kõva pinnakiht ja sitke südamik.

Noolutamine

Karastamisega saavutatud suure kõvadusega kaasneb väike vastupanu löökkoormustele ja deformatsioonidele. Neid omadusi on võimalik parandada karastamisele järgneva *noolutamise*ga.

Noolutamine seisneb kuumutamises temperatuurideni alates 200 °C, hoidmises sellel temperatuuril vähemalt tunni ja jahutamises õhus. Selline noolutus ei vähenda kõvadust, kuid tõstab märgatavalt terase sitkust.

Termokeemiline töötlus

Termokeemiline töötlus erineb teistest termotöötlusviisidest selle poolest, et lisaks struktuurilistele muutustele, toimub pinnakihi keemilise koostise muutumine sinna difundeeruvate elementide tõttu. Difusioon ja seega ka termokeemiline töötlus sõltuvad difundeeruva elemendi lahustuvusest põhimetallis. Töötlemisel moodustub difuusne kiht, mille pinnal elemendi kontsentratsioon on kõige suurem ja mis väheneb kaugenemisega pinnakihist. Väikesel difusioonikiirusel tekib kõrge kontsentratsiooniga õhuke kiht, suurel aga vastupidi.

Tsementiitimine on terase pinnakihi rikastamine süsinikuga.

Kui terases on vähe süsinikku (0,05–0,25%), siis ei anna karastamine erilist efekti, kuna kõvadus jääb martensiidi väikesest süsinikusisaldusest tingituna madalaks. Sel juhul osutub vajalikuks tsementiitimine koos järgneva karastamisega. Nii võib saada kõva ja kulumiskindla pinnakihi ja pehme ning sitke südamiku.

Tsementiitimisel hoitakse terast temperatuuridel 920–950 °C süsinikurikkas keskkonnas (puusüsi, BaCO₃, NaCO₃ jm), mille tagajärjel pinnakihi süsinikusisaldus tõuseb 0,8–0,9%.

Nitriitimine on terase pinnakihi rikastamine lämmastikuga, et tõsta pinnakihi kõvadust, kulumiskindlust, korrosioonikindlust ja väsimustugevust. Selleks tuleks toodet hoida temperatuuril 500–600 °C ammoniaagi keskkonnas. Nitriiditud kiht on suure kõvadusega kuni 400 °C ja lühiajaliselt kuni 650 °C.

Pinnakihte võib rikastada ka metallidega nagu kroom, vanaadium, alumiinium jt.

4.4. Malmid

4.4.1. Malmide struktuur ja omadused

Malm erineb terasest suurema süsinikusisalduse poolest (üle 2,14%). Süsinik esineb malmis kas seotud kujul tsementiidina (Fe₃C) või vaba grafiidina. Esimesel juhul on tegemist valgemalmiga, teisel – hallmalmiga.

Valgemalm on saanud oma nime murdepinna valge värvuse järgi. Tema struktuuriks on ledeburiit. Ta on väga kõva ja habras.

Hallmalmid jagunevad järgmiselt:

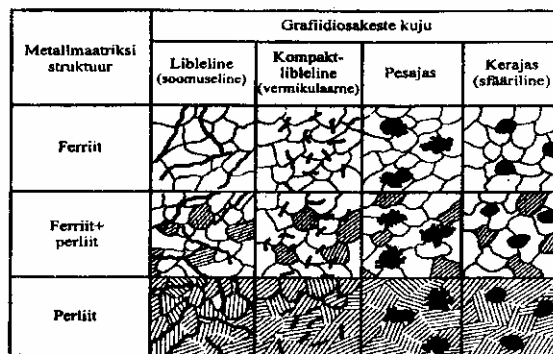
- liblegrafiidiga, kus kogu süsinik esineb vabas olekus libledena (joonis 4.6);
- keragrafiidiga, kus kogu süsinik esineb vabas olekus keragrafiidina. See saavutatakse malmile modifikaatorite (näiteks Mo ~ 0,05%) lisamisega;
- tempermalm, kus kogu süsinik on vabas olekus pesagrafiidina. See saadakse valgemalmist keemilise koostise ja jahtumiskiiruse vastava valikuga.

Vaba grafiidiga malme jaotatakse struktuuri järgi nii:

- perliitmalm, mille struktuur koosneb perliidist ja grafiidist,
- ferriitmalm, mille struktuur koosneb ferriidist ja grafiidist,
- ferriitperliitmalm, mille struktuuris on ferriit ja perliit ning grafiidiosakesed.

Temperalmide ferriit- või perliitstruktuur saadakse termotöötlusega – lõõmutamisega. Teistel malmidel tekib see jahtumise protsessis, mida vastavalt juhitakse.

Hallmalmid on tunduvalt väiksema kõvadusega kui valgemalm. Liblegrafiidiga malm on rabe, sest grafiidiliblesid võib käsitada mikropragudena. Temperalmid ja keraja grafiidiga kõrgtugevad malmid on küllaltki sitked. Ülevaate vaba grafiidiga malmide mehaanilistest omadustest annab tabel 4.1.



Joonis 4.6. Malmi võimalikud struktuurid.

Tabel 4.1. Malmide mehaanilised omadused (1, lk 158).

Malmi liik	Tõmbetugevus N/mm ²	Kõvadus HB	Katkevenivus %
Liblegrafiidiga	100–350	190–275	~0
Keragrafiidiga	350–1000	140–360	22
Pesagrafiidiga	300–800	100–320	12–15

4.4.2. Malmide tähistus

Malme tähistatakse kooskõlas standardiga EVS-EN 1560. Igal malmil on margitähis ja tunnusnumber.

Margitähised on kuni kuuepositsioonilised.

Esimesel positsioonil on tähed **EN**, mis tähendab, et tegemist on Euronormiga.

Teisel positsioonil on tähed **GJ**, kus **G** tähistab valamist ja **J** rauda.

Kolmandal positsioonil on grafiidi struktuuri tähistav täht: **L** – liblegrafiit, **S** – keragrafiit, **M** – pesagrafiit, **V** – vermikulaargrafiit, **N** – vaba grafiit puudub (on vaid tsementiidis seotu), **Y** – erikujuline.

Neljandal positsioonil näidatakse vajaduse korral metalse põhimassi struktuur. Seejuures tähistavad tähed järgmisi struktuure: **A** – austeniit, **F** – ferriit, **P** – perliit, **M** – martensiit, **L** – ledeburiit, **Q** – karastatud, **T** – parendatud, **B** – musta südamikuga, **W** – valge südamikuga.

Järgmisi positsioone kasutatakse mehaaniliste omaduste, keemilise koostise või muude lisanõuete tähistamiseks.

Mehaanilisi omadusi tähistades näidatakse arvudes tõmbetugevus, katkevenivus, löögisitkus ja kõvadus ning tähega katsekehade valmistamise viis: **S** – eraldi valatud katsekeha, **U** – valatud proovikeha, **C** – valandist väljalõigatud katsekeha. Näiteks tõmbetugevuse (N/mm²) tähistamisel **EN-GJL-150C**, **EN-GJV-400U**. Kui on vaja ka katkevenivust (%) näidata, siis **EN-GJS-350-22C**. Vajadusel näidatakse löögisitkust toatemperatuuril – **RT**, või madalal temperatuuril – **LT**; näiteks **EN GJS-400-18S-RT**. Kõvaduse markeerimisel (**HB** – Brinelli järgi, **HV** – Vickersi järgi, **HR** – Rockwelli järgi) näiteks **EN-GJL-HB155**.

Keemilise koostise tähistades pannakse margitähisesse täht **X**, millele järgnevad keemiliste elementide sümbolid ja nende sisaldus täisprotsentides.

Muid lisanõudeid tähistatakse nii: **D** – valatud olekus, **H** – termotöödeldult, **W** – keevitatav, **Z** – muud nõuded. Näiteks **EN-GJW-360-12S-W**.

Tunnusnumbrid näevad välja nii – **EN-JL 1020**. Siin esimene numbrikoht on **1** – markeerimisel tõmbetugevuse järgi, **2** – markeerimisel kõvaduse järgi, **3** – markeerimisel keemilise koostise järgi.

5. TOODETE VALMISTAMISE TEHNOLOOGIA

5.1. Valamine

Valamine ehk valu on metallidest, plastmassidest, keraamilistest jm materjalidest toodete (valandite) valmistamine sulatatud materjali valuvormi sisestamisega (joonis 5.1). Valamine on ökonoomne viis suurte ja väikeste keeruka kujuga toodete valmistamiseks.

Vedelmetalli valamisel vormi võtab metall vormi kuju ja säilitab selle ka pärast jahtumist ning tardumist. Nii võib saada väga keeruka kujuga tooteid, mille valmistamine teiste tehnoloogiatega oleks väga töömahukas või suisa võimatu. Sel viisil valmistatakse näiteks sisepõlemismootorite silindriplokid ja kolvid, pumpade tööriistad, turbiinide labad, tööpinkide sängid – korpused jm. Umbes pooled masinate detailid on saadud vormi valamise teel.

Olenevalt valuvormi materjalist eristatakse ühekordse kasutamisega vorme ja kordv-kasutamisega vorme. Esimesse rühma kuuluvad sellised valumeetodid nagu valamine liivvormidesse, koorikvalu, täppisvalu jt. Teise rühma kuuluvad kokillvalu, survevalu, tsentrifugaalvalu jt. Millist meetodit kasutatakse, see sõltub valandite hulgast ja nõutavast täpsusest ning majanduslikest kaalutlustest.

5.1.1. Vedelmetalli vormitavus

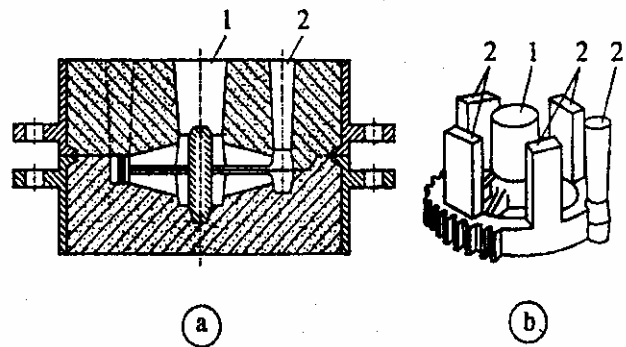
Kvaliteetse valandi saamiseks peab metall või metallisulam olema hea vedelvoolavusega ja tema tardumisel ei tohi maht muutuda, ei tohi tekkida pragusid ega tühimikke.

Vedelvoolavus on materjali omadus täita valuvorm vedelas olekus. Halva vedelvoolavusega materjali voolamine võib lõppeda enne kui kogu vorm on täitunud. Tulemuseks on defektne valand. Seda võib juhtuda kui vorm on väga keeruka kujuga või õhukeseseinaline. Vedelvoolavus oleneb nii valatava materjali omadustest (viskoossus, pindpinevus) kui ka vormi omadustest (soojusjuhtivus) ja valamistingimustest (rõhk). Enamasti kasutatakse valamiseks hea vedelvoolavusega eutektse koostisega metallisulameid, mis tarduvad madalamal temperatuuril kui nende puhtad algkomponendid. Parim vedelvoolavus on hallmalmil, halvim Mg-sulamitel.

Valukahanemine on valusulami omadus jahtumisel tardudes mõõtmel ja mahult väheneda. Eristatakse joonkahanemist ϵ_j ja mahtkahanemist ϵ_m , mille vahel on seos $\epsilon_m \approx 3 \epsilon_j$. Joonkahanemine on hallmalmidel 0,9–1,3%, terastel 2–2,4%, vasesulamitel 1,4–2,3%, alumiiniumsulamil 0,9–1,5%. Kahanemine põhjustab kahanemistühikuid ja poore, valandite pragunemist ja kaardumist.

Kahanemistühik on suhteliselt suur ja paikneb valandi viimasena tardunud osas. Valandi jahtumisel tardub kõigepealt vormi seinaga kokkupuutuv koorik. Vedelmetalli tase jääb ülemisest koorikust madalamale ja sinna tekib tühi ruum. Kahanemispoorid ja gaasimullid on väikesed tühikud, mis tekivad samuti valandi viimasena tarduvates osades.

Kahanemine tekitab valandis pingeid ja deformatsioone, mille põhjuseks on takistatud kahanemine. Takistused võivad olla mehaanilised (vormi kujust põhjustatud) või termilised (valandi erinevatest seinapaksustest põhjustatud erinevad jahtumiskiirused). Pinged põhjustavad valandites nii deformatsioone, siis kui pinged ületavad antud temperatuuril voolavuspiiri, kui ka pragusid, siis kui pinged ületavad tugevuspiiri.

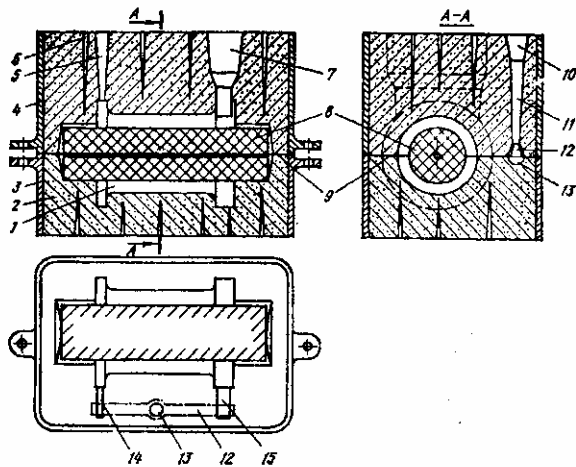


Joonis 5.1. Vedelmetalli valamine vormi, vormi ristlõige (a) ja valand (b) koos püstkanali – 1 ja avatud kompensatoritega – 2.

5.1.2. Valamise viisid

Valamine liivvormi

Liivvormvalu teel valmistatakse üle 80% valanditest. Liivvormi sisekuju kopeerib valandi kuju ja see saadakse mudeli abil. Mudel on valandi kujuga, valmistatud puidust, metallist või plastist. Tema mõõtmed on tulevases tootest pisut suuremad töölemisvaru tõttu. Mudeliga tehakse jäljend vormi. Vorm, mis valmistatakse liiva ja sideaine segust, koosneb kahest pooldest – ülemisest ja alumisest (joonis 5.2). Seda selleks, et paigutada vormi enne selle täitmist vedelmetalliga valandis vajalike avade kujulisi kärke ja selleks et vormi saaks valandi kättesaamiseks lahti võtta. Lahtivõtmise käigus tuleb valandi vabastamiseks vorm purustada. Seepärast nimetatakse seda meetodit valamiseks ühekordse kasutusega vormidesse.



Joonis 5.2. Valuvorm: 1 – vormiõõs, 2 – vormisegu, 3 – alumine vormkast, 4 – ülemine vormkast, 5 – tõusukanal, 6 – ventilatsioonikanal, 7 – kompensator, 8 – kärn, 9 – vormi lahtustasand, 10 – valulehter, 11 – püstkanal, 12 – räbupüüdel, 13 – metallikogur, 14, 15 – toitekanalid.

300–350 °C juures 1–1,5 tundi. Nii valmistatakse mõlemad vormipooled, mis seejärel ühendatakse klambritega ja täidetakse sulametalliga. Valandi eemaldamine vormist on tunduvalt lihtsam kui liivvormist. Puuduseks on kalli termoreaktiivse vaigu vajadus.

Koorikvalu meetodil toodetakse näiteks mootorite silindriplokke, vänt- ja nukkvõlle jm.

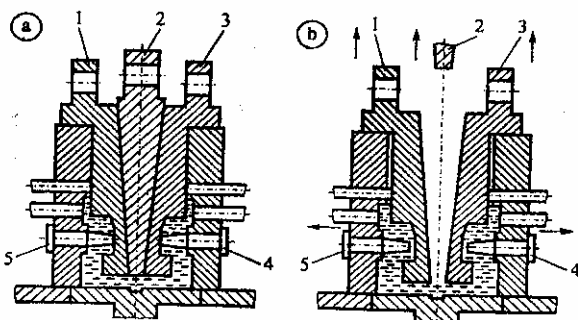
Täppisvalu

Täppisvalu meetodeil saadud valandite mõõtmed on tunduvalt täpsemad kui liivvormvalu puhul. Need on ühekordse kasutusega mudelitel ja tervikvormidel põhinevad väljasulatatava mudeliga (parafiin, steariin, tseresiin, rasvhapped jm) täppisvalu, gasifitseeruva mudeliga (vahtpolüstürool) täppisvalu ja lahustuva mudeliga täppisvalu.

Sel meetodil on otstarbekas toota valandeid, mis ei vaja täiendavat mehaanilist töötlemist (pumpade detailid, turbiinilabad, dekoratiivesemed jm).

Kokillvalu

Kokillvalu toimub korduvkasutusega (kuni 1 000 teras-, kuni 10 000 malm-, kuni 250 000 alumiiniumvalandit) vormidesse. Kokill ehk metallvorm valmistatakse tavaliselt malmist, vahel ka tööriistaterasest.



Joonis 5.3. Valamine kokilli. 1, 2, 3, 4, 5 – metallkärnid.

Keeruka kujuga valandi tootmiseks kasutatakse koostatavate kärnidega kokille. Näiteks on mootorikolvi valamiseks kasutusel kokill, milles kolvi siseõõnsust moodustav metallkärn koosneb keskmisest 2 (joonis 5.3) ja kahest külgmisest 1 ja 3 osast.

Pärast kokilli täitmist sulametalliga ja piisavalt tugeva kooriku moodustumist eemaldatakse keskmine 2 ning külgmised kärnid 1 ja 3 aga ka kolvis külgmisi avasid moodustavad metallkärnid 4 ja 5 (joonis 5.3. b). Valand eemaldatakse kokillist tõukuriga.

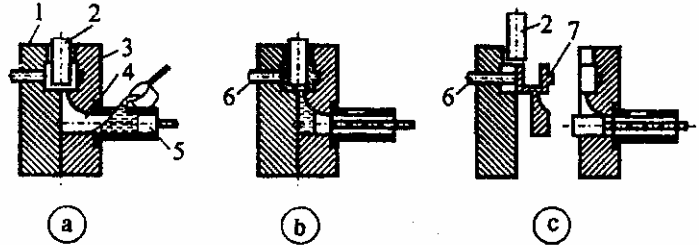
Kokillvalandite eelisteks on suur täpsus, pinnasiledus ja peeneteraline struktuur, mille tagab valandi intensiivne jahtumine.

Kokillvalu puudusteks on kokilli kõrge hind ja suhteliselt väike püsivus (eriti kõrge sulmistemperatuuriga metallist valandite tootmisel).

Survevalu

Survevalu toimub korduvkasutusega valuvormidesse, nn pressvormidesse, suure surve (kuni 300 MPa) ja kiirusega (kuni 120 m/s). Töötssükkel on lühikese kestusega ja toimub vaid survevalumasinatega (joonis 5.4).

Survevalu eeliseks on suur tootlikkus (kuni 3 600 valandit tunnis), valandi täpsus, sile pind ja peeneteraline struktuur. Meetodi peamiseks puuduseks on valandi poorsus, kuna gaasid ei jõua lühikese töötssükli tõttu eralduda.



(a) (b) (c)

Joonis 5.4. Survevalumasina töötssükkel:

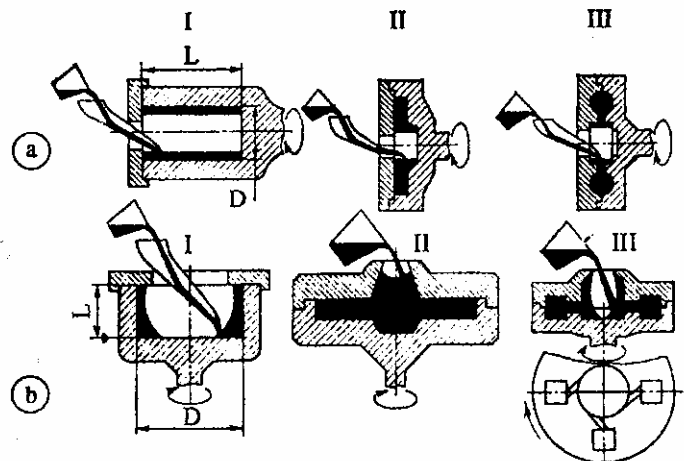
- 1 – pressvormi liikuv pool, 2 – metallkärn,
- 3 – pressvormi liikumatu pool, 4 – survekamber,
- 5 – kolb, 6 – valandi väljatõukur, 7 – valand.

Tsentrifugaalvalu

Tsentrifugaalvalu meetodi puhul toimub vedelmetalli vormimine tsentrifugaaljõudude toimel metallvormidesse (harvemini liiv- või koorikvormidesse). Olenevalt pöörleva vormi telje asendist eristatakse horisontaalset (joonis 5.5. a) ja vertikaalset (joonis 5.5. b) tsentrifugaalvalu.

Tsentrifugaaljõud parandavad vormi täitumist sulametalliga. Õõnsaks pöördekehaks kujunev metall jahtub kõige kiiremini väljast juhtides soojust vormi seina. Tardumine toimub väljast sissepoole. Saadakse poorideta peeneteralise struktuuriga valand.

Tsentrifugaalvalu eeliseks on võimalus saada sisemise õõnsusega valandeid kärne kasutamata. Horisontaalse pöörlemiseljega tsentrifugaalvalumasinatest toodetakse pikki (pikkuse ja diameetri suhe üle kolme) valandeid, näiteks malmtorusid. Vertikaalse pöörlemiseljega masinatega toodetakse lühemaid valandeid.



Joonis 5.5. Tsentrifugaalvalu skeemid.

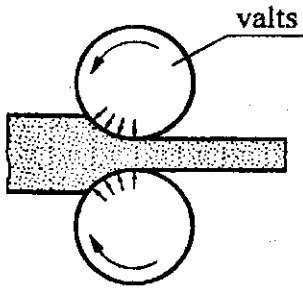
5.2. Survetöötlemine

Soovitava kujuga toode saadakse toorikut välisjõu abil plastselt deformeerides. Põhilised survetöötlemisviisid on valtsimine, pressimine, tõmbamine, sepistamine, stantsimine. Umbes 90% kogu terase- ja üle 50% värviliste metallide toodangust läbib mitmesuguseid plastse vormimise staadiume. 80% terasetoodangust valtsitakse, ülejäänud sepistatakse või pressitakse.

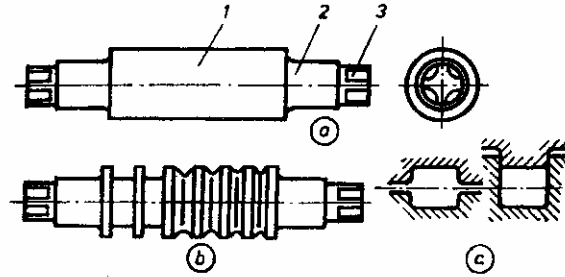
Valtsimine

Valtsimisel haaratakse metall hõõrdejõudude toimel kahe vastassuunas pöörleva valtsi vahele ja surutakse õhemaks (joonis 5.6). Et maht on jääv, siis järelikult tooriku pikkus ja laius suurenevad. Metallide hõõrdegurid kuumvaltsimisel on piirides 0,22–0,62 ja külmaltsimisel 0,04–0,18.

Valtsimise tööriistadeks on pöördekeha kujulised valtsid (joonis 5.7). Lehtmaterjal ja lint valtsitakse siledade valtsidega, keeruka profiiliga tooted – kalibreerivate valtsidega, mis annavad tootele soovitud profiili järkjärgult pärast mitmekordset valtside vahelt läbilaskmist.

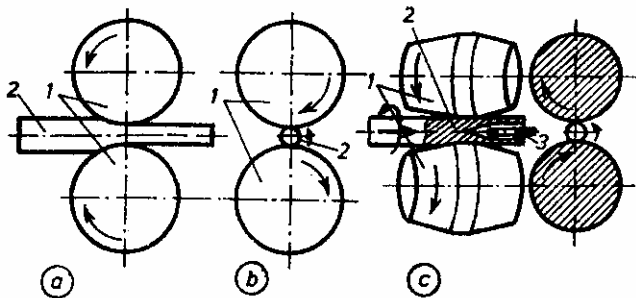


Joonis 5.6. Valtsimine.



Joonis 5.7. Valtsid ja kaliibrid: a) sile valts (1 – tööpind, 2 – kael, 3 - rist), b) kalibreeritud valts, c) lahtine ja kinnine kaliiber.

Olenevalt valtside ja toote suhtelisest liikumisest eristatakse kolme valtsimise põhiviisi: piki- (joonis 5.8. a), rist- (joonis 5.8. b) ja kaldvaltsimine (joonis 5.8).



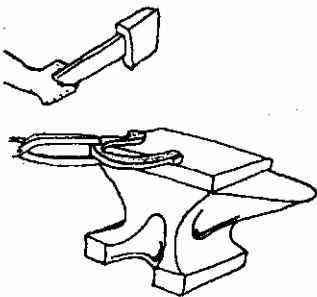
Joonis 5.8. Valtsimise põhiviisid: 1 – valtsid, 2 – toorik, 3 – torn sisemise õõnsuse moodustamiseks õmbluseta torude valtsimisel.

Pikivaltsimisel on valtsitava materjali liikumissuund risti valtside pöörlemistelgedega. Niisugusel valtsimisel väheneb materjali paksus ja suureneb peamiselt tema pikkus. Tüüpotooted on püsiva profiiliga lehtmaterjal ja mitmesugused profiilid: ümar-, ruut-, kuuskant-, kolmkant-, nurk-, karp-, rõõbas-, T ja topelt T profiilid.

Ristivaltsimisel pöörlevad paralleelsete telgedega valtsid samas suunas, pannes pöörlema tooriku, mis pikeneb oma telje sihis. Valtside ja tooriku pöörlemisteljed on paralleelsed. Tüüpotooted on perioodilise profiiliga valtsmetall.

Sepistamine

Sepistamist kui vähetootlikku töötlemisviisi, mis kasutab universaalseid tööriistu, kasutatakse üksik- või väikeseeriatootmises. Eristatakse käsi- ja masinsepistamist. Käsitsi sepistatakse väikesi tooteid – sepiseid (kuni mõnekilogrammise massiga) alasil käsivasaraga (joonis 5.9).



Joonis 5.9. Käsise pistamine.

Suuri sepiseid, mille mass võib ulatuda kuni 350 tonnini (näiteks hüdrogeneraatorite võllid, valtsid), sepistatakse masinatega. Masinad kasutavad ära langeva vasara kineetilist energiat (õhkvasarad) või hüdropressi staatilist jõudu (töövedeliku rõhk kuni 30 MPa).

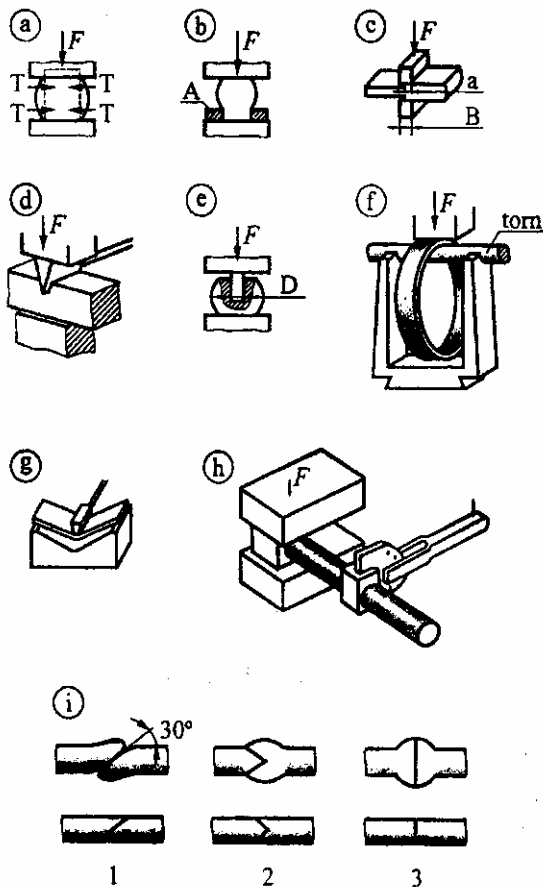
Sepiste toorikuteks on valuplokid (suurtel sepistel) või mitmesuguse profiiliga valtsmetall. Sepistamisoperatsioonidega (joonis 5.10) antakse sepisele teatud kindel kuju.

Jämedamisel vähendatakse tooriku kõrgust ja suurendatakse ristlõiget. Venitamisel suurendatakse tooriku pikkust ja vähendatakse ristlõiget. Augustamisel saadakse toorikusse õõnsus. Painutamisel ja väänamisel muudetakse nurka tooriku osade vahel. Jaotusoperatsioonid tükeldavad materjali kas osaliselt või täielikult.

Stantsimine

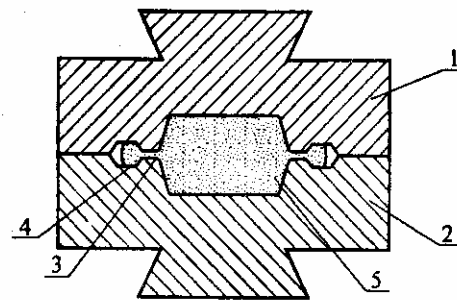
Masstootmises kasutatakse toote plastseks vormimiseks spetsiaalset, tavaliselt kahest poolt koosnevat vormi – stantsi. Stantsimine on materjali survetöötlemine, mille puhul toode saadakse toorikut stantsis plastselt deformeerides. Eristatakse vormstantsimist ja lehtstantsimist.

Vormstantsimisel saab deformeeritav metall voolata stantsi siseõõnes. Kinnises stantsis peavad tooriku ja toote mahud olema täpselt võrdsed. Lahtises stantsis (joonis 5.11) saadakse stantsi eralduspinnas tekkiva kraadiga toode.



Joonis 5.10. Sepistamisoperatsioonid:

a – jämendamine, *b* – kohtjämendamine, *c* – piki-venitamine, *d* – soonetamine, *e* – augustamine, *f* – ringvenitamine, *g* – painutamine, *h* – väänamine, *i* – sepakeevitamine.



Joonis 5.11. Vormstants:

1 – ülemine pool, 2 – alumine pool, 3 – kraadisoon, 4 – kraadisoon, 5 – toode.

Tooriku maht võetakse toote mahust suurem. Tekkinud kraat eemaldatakse lõikestantsis. Vormstantsimise toorikud võivad olla spetsiaalselt valmistatud või mitmesuguse profiiliga valtsmetalli tükid.

Kuumvormstantsimisel on tooriku temperatuur üle rekrustalliseerimistemperatuuri, kuid alla solidustemperatuuri (terastel vahemikus 780 °C kuni 1100 °C). Külmvormstantsimisel on tooriku temperatuur alla rekrustalliseerimistemperatuuri.

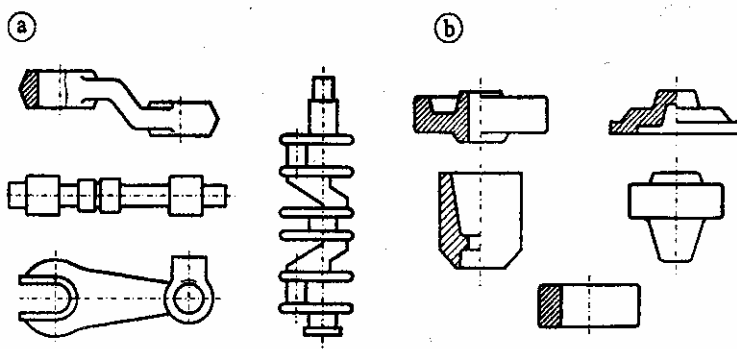
Kuumvormstantsimise tootlikkus on tunduvalt suurem kui sepistamisel. Sel teel valmistatakse massiivseid tooteid, mida iseloomustab suur täpsus ja väikesed materjalikaod (joonis 5.12). Täiendavat lõiketöötlemist vajavad vaid kokkupuutepinnad teiste detailidega.

Külmvormstantsimise peamised meetodid on pressimine ja jämendamine. Sel teel valmistatakse väikesi metalltooteid, sest külma metalli, mille tugevus on suur, deformeerimiseks on vaja palju energiat. Plasttoodete mõõtmeid vajaliku deformatsioonienergia hulk ei piira.

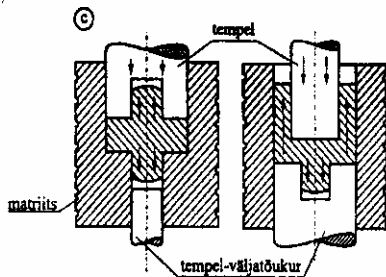
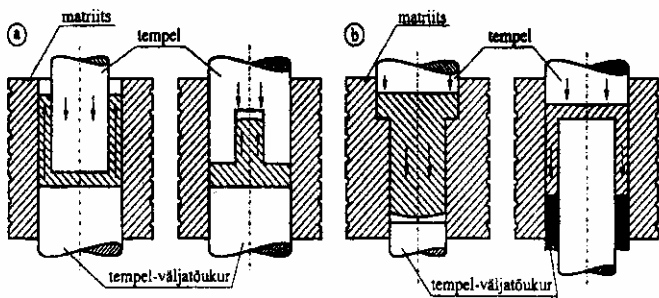
Külmpressimisel asetatakse toorik matriisi avasse, kust materjal pressitakse templiga peenemasse õõnde. Eristatakse otse-, vastu- ja kombineeritud pressimist (joonis 5.13).

Otsepressimisel ühtib toormaterjali voolamise suund templi liikumise suunaga (joonis 5.13. b). Vastupressimisel on liikumised vastassuunalised (joonis 5.13. a). Kombineeritud meetodil voolab osa materjali templi liikumise suunas, osa vastassuunas (joonis 5.13. c).

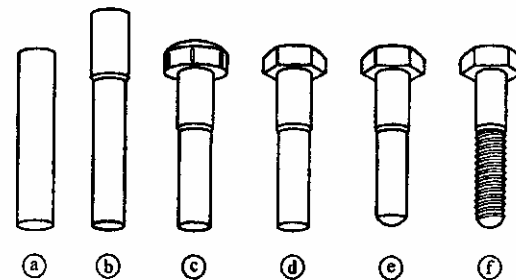
Metalli külmpjäendämist kasutatakse laialdaselt väikeste masstootmise detailide – naelte, neetide, mutrite ja poltide toorikute jt valmistamiseks. Nende toorikutena kasutatakse terasest või värvilisest metallist traati (joonis 5.14).



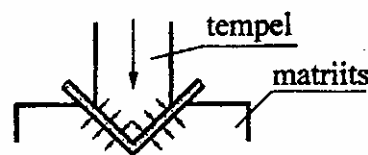
Joonis 5.12. Kuumvormstantsimise tooted.



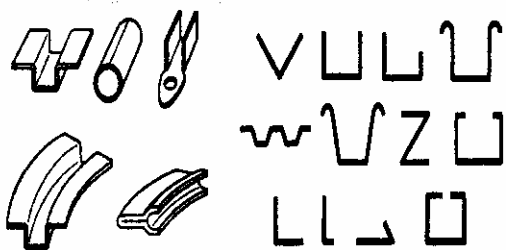
Joonis 5.13. Külmpressimine.



Joonis 5.14. Poldi kombineeritud külmpressimine / külmpjäändamine järgneva keermerullimisega.



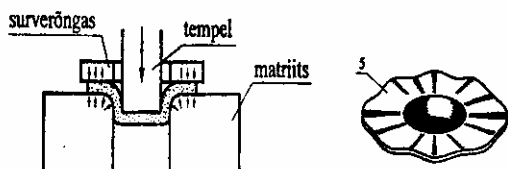
Joonis 5.15. Lehtmaterjali stantsimine.



Joonis 5.16. Lehtstantsitud tooted.

Lehtstantsimisel on toorikuks õhuke, kuni 10 mm paksune lehtmaterjal, mida deformeeritakse plastselt (joonis 5.15). Tooted on mitmesuguse ruumilise kujuga, suure täpsusega ja kõrge pinnakvaliteediga (joonis 5.16).

Vormimisoperatsioonidest üks olulisemaid on painutamine, kus muudetakse tooriku telje sihti. Pärast plastset deformeerimist paindel toimub elastne tagasinihe, st saadud raadius väheneb jõu eemaldamisel. Teine oluline operatsioon on sügavtõmbamine, kus tasasest toorikust vormitakse süvendiga ruumiline ja õõnsa põhjaga toode – kapsel (joonis 5.17).

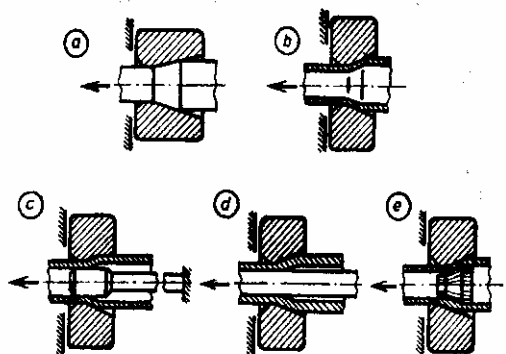


Joonis 5.17. Sügavtõmbamisoperatsioon.

Tempel surub tooriku matriitsi avasse ja tõmbab enda järel ka tooriku ülejäänud rõngakujulise ääriku. Lõpuks surub tempel kogu tooriku läbi matriitsi ava. Juhul kui ääriku mõõtmed ületavad teatud piiri ($D - d > 20$ materjali paksust), võivad tekkida voldid 5 (joonis 5.17). Selle vältimiseks kasutatakse surverõngast, mis surub tooriku äärt kindla jõuga matriitsi pinna vastu.

Tõmbamine

Tõmbamiseks nimetatakse metalltooriku läbitõmbamist etteantud profiiliga avast. Tõmbamisprotsessis tooriku ristlõikepindala väheneb ja pikkus suureneb. Tõmbamine toimub reeglina külmal, et mitte vähendada materjali tõmbetugevust. Erinevad tõmbamisviisid on toodud joonisel 5.18 ja tõmbamisega toodetavate profiilide näited joonisel 5.19.

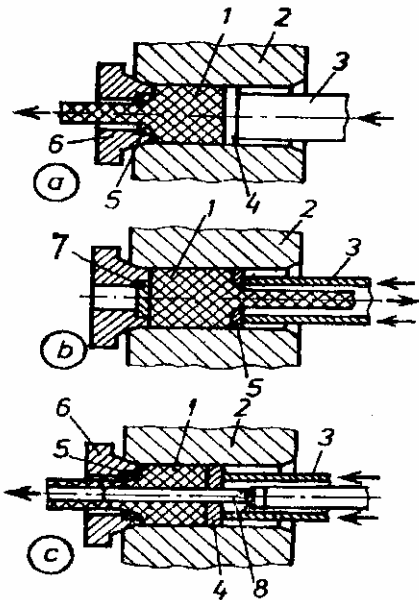


Joonis 5.18. Tõmbamise skeemid: a – traadi tõmbamine, b – torude tõmbamine, c – torude tõmbamine liikumatul tornil, d – torude tõmbamine liikuvall tornil, e – torude tõmbamine ujuvall tornil.

Ekstrusioon

Ekstrusioon on survetöötlusmeetod, kus konteinerisse paigutatud toorik surutakse templi abil läbi matriitsi välja. Nii saab töödelda väga plastilisi metalle (Cu, Al, Mg, Pb) ja nende sulameid, enamasti kuumalt.

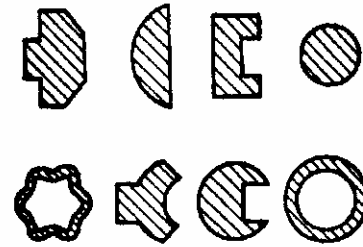
Protsessi kahest meetodist annb ülevaate joonis 5.20. *a* ja *b* ning toru valmistamisest ekstrusiooni teel joonis 5.20. *c*. Ekstrusiooni teel toodetavaid profile näeme joonisel 5.21.



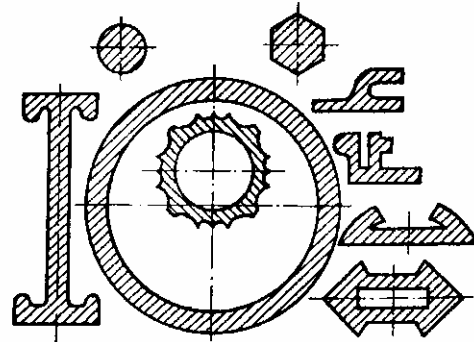
Joonis 5.20. Ekstrusiooni meetodid:
a - päriekstrusioon, *b* - vastuekstrusioon,
c - toru valmistamine päriekstrusiooniga.

Ekstrusioonpressi osad:

- 1 – toorik, 2 – presskonteiner,
- 3 – tempel, 4 – press-seib,
- 5 – matriits, 6 – matriitsihoidik,
- 7 – sulgseib, 8 – ekstrudeerimistorn.



Joonis 5.19. Tõmbamisega toodetavaid profile.



Joonis 5.21. Ekstrusiooni teel valmistatud profile.

5.3. Lõiketöötlemine

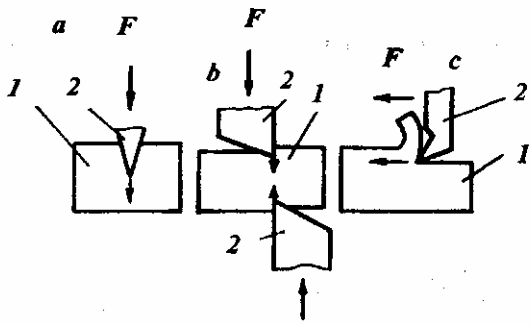
5.3.1. Lõikamine

Suur osa masinaelemente saavad oma lõpliku kuju ja mõõtmed toorikute lõiketöötlemise tulemusel. Väljalõikamisega valmistatakse paljud lehtmaterjalist tooted. Lõikamisel saadakse soovitud toode toorikult laaste lõigates. Et sel teel võib saada siledade pindadega ja täpsete mõõtmetega tooteid, siis kasutatakse masina- ja aparaadiehituses erinevaid lõiketöötlemisviise väga palju.

Lõikeprotsessi kinemaatika ja lõiketera geomeetria põhjal jaotatakse protsessid kolmeks:

- lõikamine sümmeetrilise teraga (joonis 5.22. *a*),
- lõikamine kääridega (joonis 5.22. *b*),
- lõikamine laastu eraldamisega (joonis 5.22. *c*).

Jõu *F* (joonis 5.22) toimel materjali 1 tungiv tera 2 tekitab oma külgedel materjalis survepinged. Materjal deformeerub algul elastselt, tera edasiliikumisel muutuvad deformatsioonid plastseteks ja materjal puruneb lõikeserva läheduses, kus pinged on kõige suuremad.

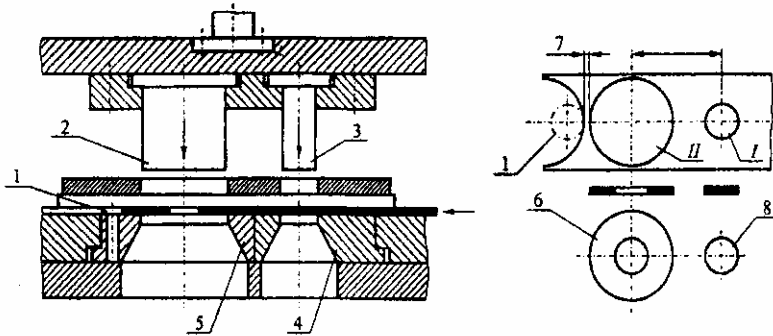


Joonis 5.22. Lõikeprotsesside liigid.

Lisaks jõusuunalisele lõikeliikumisele võib terale anda lõikeservasihilise sirgjoonelise või pöörleva liikumise.

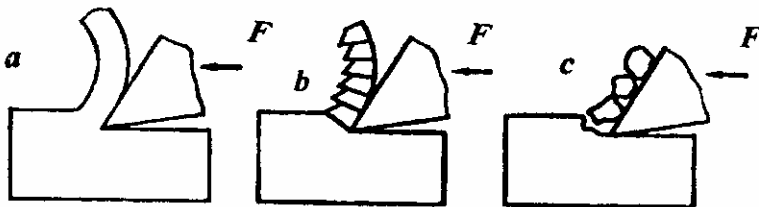
Sümmeetrilise teraga lõikamisel tungib kiilukujuline lõikeriist (kirves, nuga, meisel) materjali sisse ja tükeldab selle.

Kääridega lõikamisel tekitavad terad lõikeservi ühendavas pinnas materjali purunemist põhjustavad nihkepinged, mille tagajärjel materjal lahutatakse osadeks. Analoogselt toimub lõikamine lõikestantsides, kus materjal jääb templi ja matriitsi vahele (joonis 5.23).



Joonis 5.23. Väljalõikestants: I ja II ribatoorikusse stantsimisel lõigatavad avad; 1 – piiraja, 2 ja 3 – välis- ja sisekontuuri templid, 4 ja 5 – sise- ja väliskontuuri matriitsid, 6 – valmistoode (seib), 7 – ribatooriku olulised mõõtmed, 8 – stantsimisjääk.

Laastu lõikamisel tungib kiilukujuline tera materjali. Tasandis, mis on risti tera liikumisega, tekivad normaalpinged, tera liikumise tasandis tekivad nihkepinged. Selline keerukas pingeolukord põhjustab kristallidevahelisi nihkeid, mis lõppevad metalli purunemisega ja laastu tekkimisega. Laastu kuju sõltub lõigatava materjali omadustest ja lõikerežiimist. Plastsetele materjalidele on iseloomulik voolav laast (joonis 5.24. a), vähemplastsetele – kihiline laast (joonis 5.24. b) ja habrastele – murdelaast (joonis 5.24. c).



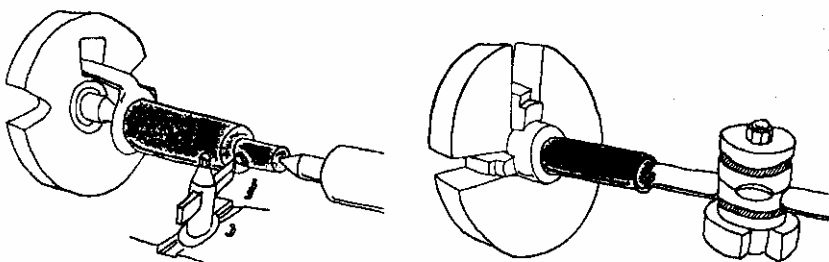
Joonis 5.24. Laastu liigid.

Edukaks lõikamiseks peab tera olema tunduvalt kõvem lõigatavast materjalist. Soovitavad omadused on ka kõrge kulumiskindlus ja kõvaduse säilimine kõrgetel temperatuuridel, mis kaasnevad intensiivse lõikamisega. Nii suguste omadustega on looduslikest materjalidest teemant, tehismaterjalidest boornitriid, titaan- ja volframkarbiidkermised ning tööriistaterased.

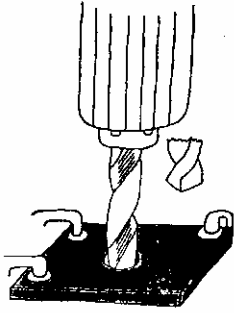
5.3.2. Lõiketöötlemisviisid

Treimine

Treimisel eraldatakse pöörleva tooriku välis- või sisepinnalt laaste lõiketeraga. Tooriku pöörlemine on pealiikumine ja lõiketera kulgev liikumine on ettenihkeliikumine. Nii valmistatakse mitmesuguseid pöördkehi: silinder-, koonus- ja muude kujupindadega.



Joonis 5.25. Välis- ja sisetreimine.



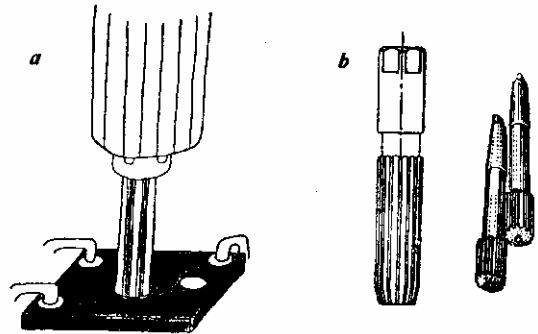
Puurimine

Puurimisel valmistatakse silindrilised avad pöörleva lõikeriistaga – puuriga, millele antakse samaaegselt ka kulgev teljesuunaline liikumine (joonis 5.26). Et puurimine on suhteliselt väikese täpsusega töötlemisviis, siis on ta sageli eeltöötlemisviisiks järgnevale sisetreimisele, hõõritsemisele (joonis 5.27. a), kammlõikamisele (joonis 5.28) või sisekeermete lõikamisele.

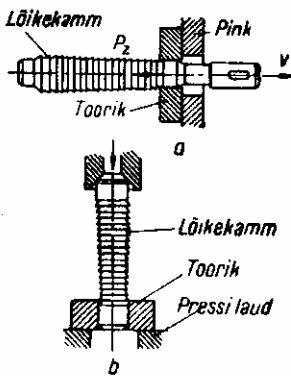
Joonis 5.26. Puurimine.

Hõõritsemine

Hõõritsemisega saab puuritud avadele anda siledama pinna ja täpsemad mõõtmed. Lõikeriistaks on masin- või käsihõõrits (joonis 5.27. b), mis lõikeprotsessis liigub nagu puurigi – pöörleb ja liigub samaaegselt kulgevalt. Hõõritsa lõikava osa ette tehakse suunamiskoonus, mis tagab lõikeriista parema suunamise ettepuuritud avasse.



Joonis 5.27. Hõõritsemine.



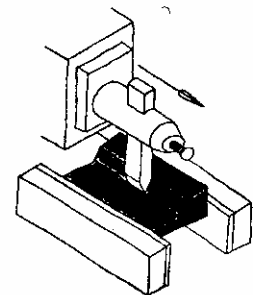
Kammlõikamine

Kammlõikamisel lõigatakse tooriku sise- või välispinnalt laaste erilise mitmeteralõikeriistaga – lõikekammiga, mis tõmmatakse või pressitakse toorikust läbi (joonis 5.28. a ja b). Kammlõikamisega valmistatakse liistusooni, mitmesuguse kujuga läbivaid avasid (joonis 5.28), sisselõikeid ja süvendeid.

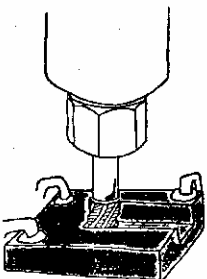
Joonis 5.28. Kammlõikamine.

Hõõveldamine

Hõõveldamisel lõigatakse toorikult laaste tooriku suhtes edasi-tagasi liikuva lõikeriistaga (joonis 5.29). Hõõveldamisega võib teha tasapindu, mitmesuguseid kujupindu, liistusooni ja süvendeid. Hõõveldamine on väiksema tootlikkusega kui kammlõikamine.



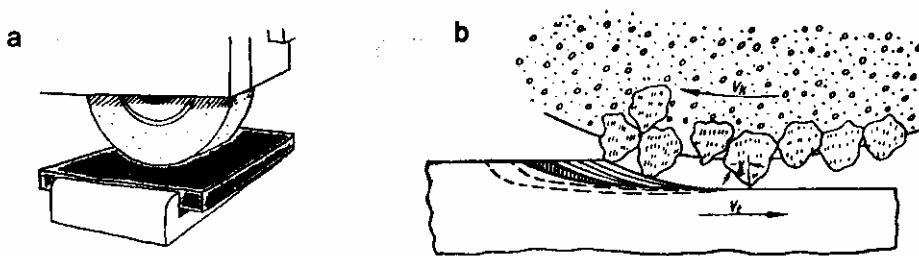
Joonis 5.29. Hõõveldamine.



Freesimine

Freesimine on üks universaalsemaid lõiketöötlemisviise, kus toorik liigub kulgevalt ja lõikeriist – frees – pöörleb (joonis 5.30). Frees on pöördkehakujuline lõikeriist, mille lõikehambad kujutavad endast üksikuid lõiketeri. Lõikeriista pöörlemistelg võib olla tooriku suhtes suvalise nurga all. Freesimisega saab valmistada tasa- ja kõverpindu, hammasrataste hambaid, tükeldada materjali jne.

Joonis 5.30. Freesimine.



Joonis 5.31. Tasalihvimine ja lihvimise olemus.

Lihvimine

Lihvimine on tooriku pinna puhastõõtlemine abrasiivlõike-riistaga. Metalltoorikuid töödeldakse pöörlevate lihvketastega. Lihvitavate pindade kuju ja lihvimisviisi järgi eristatakse välisümarlihvimist, siseümarlihvimist, kujulihvimist ja tasalihvimist (joonis 5.31. a). Lihvimine hõlmab ka lõike-riistade teritamist. Abrasiivosakeste tööst lihvimisel annab ettekujutuse joonis 5.31. b.

Elektrotehnoloogiline lõikamine

Lõikamise elektrotehnoloogiaid kasutatakse kui mehaanilised lõikamisviisid ei anna soovitud tulemusi. Neid kasutatakse väga kõvade, sitkete ja habraste materjalide lõikamiseks, või väga kitsaste soonte ja väikese läbimõõduga avade töötlemiseks, või väga siledate pindade saamiseks. Kasutatakse elektrofüüsikalisi ja elektrokeemilisi meetodeid, kus tooriku küljest materjali eraldamiseks rakendatakse elektrienergiat ja selle poolt transformeeritud heli-, valgus-, soojus-, keemilist ja mehaanilist energiat. Loetleme mõned sellised lõikamisviisid: elektroerosioontöötlus, elektrokeemiline töötlus, ultrahelitöötlus, töötlemine kontsentreeritud energiavooga (elektronikiirega, laserikiirega, plasmajoaga).

5.4. Pulbermetallurgia

Pulbermetallurgia on toodete valmistamisviis, kus lähteaineteks on materjalide pulbrid ja mille käigus põhikomponenti ei sulatata. Sel viisil võib saada samu tooteid mis valamise, pressimise või lõikamise teel, kuid tunduvat väiksema materjalikuluga. Tootmine on majanduslikult efektiivne vaid suurte toodangukoguste juures, sest vajab kalleid tehnoloogilisi rakiseid ja seadmeid.

Pulbermetallurgia võimaldab saada selliseid materjale ja tooteid, mida pole võimalik saada teisi tehnoloogiaid kasutades. näiteks suure poorsusega materjalid (filtrid, poorsed laagrid jm), kõvasulamid jt.

Pulbermaterjalidest toodete valmistamise tehnoloogia koosneb järgmistest operatsioonidest:

- pulbrite saamine,
- pulbrite ettevalmistamine,
- toote tooriku vormimine,
- toote paagutamine,
- toote täiendav töötlemine.

Pulbrite saamine

Materjalide pulbrite valmistamismetodeid on kaks – mehaaniline ja füüsikalisk-keemiline.

Mehaanilistest meetoditest enamkasutatavad on jahvatamine ja sulametalli pihustamine. Jahvatamiseks sobivad näiteks metallijäätmed, mis on teiste tehnoloogiate paratamatuteks kaasnähtudeks. Sulametalli pihustamine on suure tootlikkusega võte raua, terase, vase, pronksi, tsingi jm pulbrite saamiseks.

Füüsikalisk-keemilistel meetoditel saadud pulbrite keemiline koostis erineb oluliselt lähtematerjali omast. Nendest meetoditest on olulisemad oksiidide taandamine, elektrolüüs, metallide lenduvate ühendite dissotsiatsioon jt. Sel teel saadakse kõrge sulamistemperatuuriga metallide (W, Ta, Mo, Nb jt) aga ka teiste metallide (Fe, Cu, Ni, Co, Zr jt) pulbreid.

Pulbrite ettevalmistamine

Pulbrite ettevalmistamine seisneb pulbrite lõõmutamises, sõelumises ja vajaliku koostisega pulbrisegu segamises.

Lõõmutamine on vajalik pulbrikujulise metalli plastuse suurendamiseks. Seda toimetatakse kaitsegaaside keskkonnas sulamistemperatuurist poole madalamal temperatuuril (raual 650–750 °C).

Sõelumisega sorteeritakse pulbrid vastavalt osakeste mõõtmetele. Seejuures osakeste mõõtmete puhul üle 50 µm võib kasutada sõelu, peenemate osakeste puhul õhkseparatsiooni.

Pulbrisegu valmistatakse segistite abil, kuhu puistatakse lisaks põhimaterjalile veel näiteks plastifikaatoreid (parafiin, steariin jt) pressitavuse parandamiseks, kergelt lenduvaid ühendeid suure poorsusega toodete saamiseks jm.

Vormimine

Toote tooriku vormimine võib toimuda külmpressimise, kuumpressimise, vibrovormimise, valtsimise, ekstrusiooni või muul teel.

Enamkasutatav on toote külmpressimine vormides (joonis 5.32) rõhul 100–1 000 MPa. Vorm täidetakse pulbriseguga ja pressitakse (joonis 5.32. a). Seejärel tõugatakse valmis brikett vormist välja (joonis 5.32. b).

Kuumpressimine erineb külmpressimisest selle poolest, et pulbrit kuumutatakse üheaegselt pressimisega. Nii võib saada läbi väiksemate rõhkudega. Sel viisil valmistatakse suuregabriidilisi ja keerukamaid tooteid.

Vibropressimine seisneb pulbri tihendamises pressimise teel koos kaasneva vibratsiooniga. Ühtlase tiheduse saavutamiseks kulub vibropressimisel vähem energiat kui tavalisel külmpressimisel.

Valtsimise teel võib saada pulbriest mitmesuguse profiiliga linte, traati, latte jm. Punkris 1 (joonis 5.33) olevat pulbrit 2 antakse pidevalt valtside 3 vahelisse pilusse, kus pulber surutakse kokku pidevaks profiiliks 4.

Ekstrusioon tähendab pulbri pressimist kas külmalt või kuumalt läbi matriisis oleva profileeritud ava (joonis 5.20). Saadakse suure pikkusega toode, mis seejärel paagutatakse. Tehnoloogia eelduseks on, et pulbrisegu sisaldab rohkesti (kuni 15%) plastifikaatorit, näiteks parafiini.

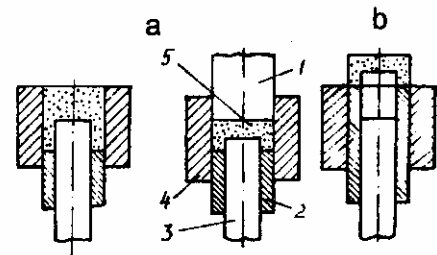
Paagutamine

Pärast toote vormimist tuleb teda tugevuse tõstmiseks termiliselt töödelda – paagutada. Paagutamiseks kuumutatakse toode temperatuurini, mis on 0,7–0,8 osa sulamistemperatuurist ja hoitakse sel temperatuuril 2–3 tundi kaitsegaaside keskkonnas. Mitmekomponendilise pulbrisegu puhul määratakse temperatuur põhimetalli järgi. Paagutamisel toimuvad keerukad füüsikalise-keemilised protsessid, mille tulemusena suureneb toote tihedus ja tugevus tänu pulbriosakeste vahelisele kontaktpindade suurenemisele.

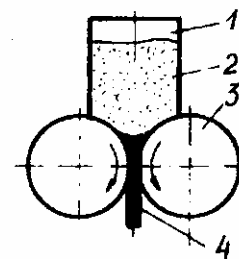
Eristatakse tahke- ja vedelfaasilist paagutamist. Esimesel juhul toimuvad kõik paagutamisega kaasnevad protsessid tahkes faasis. Teisel juhul kaasneb paagutamise ühe või ka mitme komponendi sulamine. Nii võib saada praktiliselt poorideta tooteid.

Täiendav töötlemine

Toote täiendav töötlemine pärast paagutamist võib osutada vajalikuks mitmete eriomaduste andmiseks. Näiteks toote kuju ja mõõtmete täpsustamiseks, immutamiseks õlidega, mehaaniliste omaduste muutmiseks termilise töötlemisega jm.



Joonis 5.32. Külmpressimine vormis: 1 – ülemine tempel, 2 – tõukur, 3 – alumine tempel, 4 – matriits, 5 – brikett.



Joonis 5.33. Pulbri valtsimine profiiltooteks.

5.5. Näiteid toodete valmistamisest

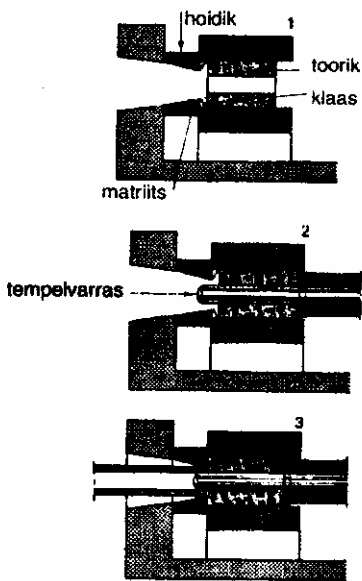
Torude valmistamine

Terastorud valmistatakse kas õmbluseta või õmblusega.

Õmbluseta terastorud valmistatakse kõrge temperatuurini kuumutatud ümarterasest. Toru valmistamise esimesel etapil saadakse ümar torutoorik. Sellest võib valmistada toru valtsides teda kuumalt korduvalt läbi paarisvaltsides olevate erineva suurusega ümarate soonte. Torude sees on tempelvarras, mille ümber valtsimine toimub (joonis 5.8. c).

Peenemaid (alla 30 mm) ja eriti täpsete mõõtetega õmbluseta torusid võib valmistada külmtõmbamisega vastavas tõmbepingis (joonis 5.18).

Õmbluseta torusid võib valmistada ka torutoorikut pressides. Selleks tuleb pressida kuumutatud ja läbistatud toorik läbi matriitsi, kasutades tempelvarrast ja klaasjahu, mis vähendab matriitsi kulumist (joonis 5.34). Sel viisil võib valmistada kuni 20 m pikkusi torusid.

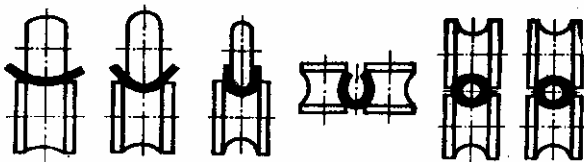


Joonis 5.34. Toru pressimine.

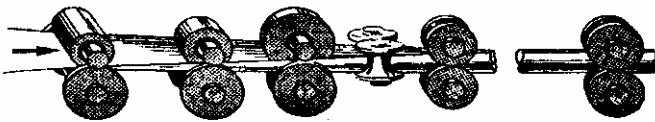
Õmblusega terastorud võib olenevalt õmbluse asukohast liigitada pikiõmblusega torudeks ja spiraalõmblusega torudeks.

Pikiõmblusega torud valmistatakse erineva laiuse ja paksusega teraslindist. Vormimisvaltside abil painutatakse lint torukujuliseks (joonis 5.35 ja 5.36) ja keevitatakse elekterkeevitusega. Servad kuumenevad sulamistemperatuurini ja kaks surveratast suruvad prao kinni. Tekkinud kõrgendus hõõveldatakse maha väljastpoolt. Toru jahutatakse ja suunatakse õgvendusvaltsidele ning seejärel lõigatakse torud 6–12 m pikkusteks tükkideks. Kogu protsess toimub täisautomaatmasinatega, mis võivad valmistada kuni 100 m toru minutis.

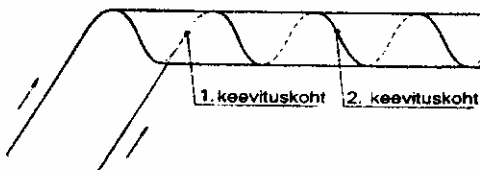
Teraslindist võib valmistada ka spiraalõmblusega torusid. Rullist lahtikeritav lint suunatakse õgvendusvaltside läbimise järel painutusvaltsidesse, mis vormivad lindist spiraalse toru. Lindi spiraalsed servad keevitatakse pulber-kaarkeevitusautomaadiga esmalt seest- ja seejärel ka väljastpoolt (joonis 5.37).



Joonis 5.35. Toru valtsimine ribast.



Joonis 5.36. Toru valtsimine lindist.



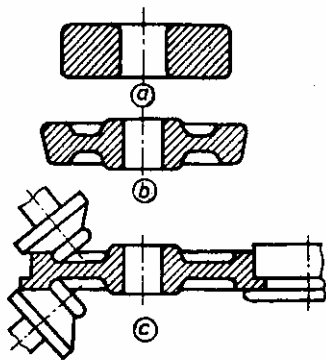
Joonis 5.37. Spiraalõmblusega toru valmistamine.

Nii saadakse siledad pinnad, mis ei vaja järeltöötlemist. Tööpingist tulev lõputu toru lõigatakse 12 m pikkusteks tükkideks. Spiraal-torude läbimõõdud on tavaliselt vahemikus 100–1200 mm.

Malmstorud valmistatakse tsentrifugaalvalu meetodil (joonis 5.5. a) keraja grafiidiga temper-malmist.

Vasktorud valmistatakse esmalt pressimisega (joonis 5.19) temperatuuril 800–900 °C, millele järgneb külmtõmbamine (joonis 5.18). Tõmbamisega saadavad torud on kõvad ja neid tarvitakse sirgetena pikkusega 5,5 m. Osa vasktorusid lõigatakse pehmeks ja neid tarvitakse 25 m pikkustes rullides.

Vasktorud on saadaval ka umbes 2 mm paksuse polüeteenplastiga kaetult, valgeks värvituna ja vahtplastist soojusisolatsiooniga.



Joonis 5.38. Vaguniratta valmistamine.

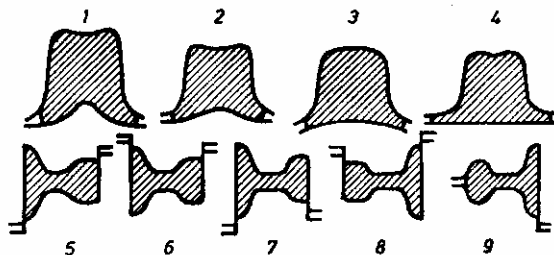
Raudteevaguni ratta valmistamine

Raudteevaguni ratta valmistamisel rakendatakse erinevaid surve- ja löiketöötlusviise järjest.

Lähtetoorikuks on kas valand või valtsmetall. Kõigepealt lähtetoorik kuumutatakse ja siis valmistatakse sepistamisega-jämendamisega ratta toorik (joonis 5.38. a).

Selles on augustamisega tehtud ava. Vormstantsimisega antakse rattale kuju (joonis 5.38. b). Ratta pöid tehakse valtsimispingil (joonis 5.38. c).

Valmisvaltsitud rattal töödeldakse treimisega õigesse mõõtu teljeava pind.



Joonis 5.39. Raudteerööpa valtsimine.

Raudteerööpa valtsimine

Raudteerööpa profiil saadakse järjerguliste valtsimisoperatsioonide tulemusena (joonis 5.39).

6. ALUMIINIUM JA ALUMIINIUMISULAMID

6.1. Alumiiniumi ja tema sulamite omadused

Alumiiniumi eripäraks on väike erikaal ($\gamma = 2,7 \text{ N/mm}^3$) ja suhteliselt madal sulamistemperatuur (657°C). Võrreldes rauaga on tema erikaal kolm korda väiksem ja seetõttu kasutatakse alumiiniumi ja tema sulameid laialdaselt lennukitööstuses. Lisaks sellele iseloomustab teda suur plastilisus ja väike tugevus ($R_m = 100 \text{ N/mm}^2$, $R_{p0,2} = 30 \text{ N/mm}^2$, HB25, $\delta = 35\%$). Alumiiniumil on kõrge elektri- ja soojusjuhtivus ning väga suur sulamissoojus.

Väikese tugevuse tõttu puhast alumiiniumi konstruktsioonimaterjalina ei kasutata, kuid kasutatakse sulameid, milles teda on suures koguses. Õhu käes alumiinium korrodeerub ja tema pinnale tekib Al_2O_3 kile, mis kaitseb metalli edasise korrosiooni eest.

Tehnikas kasutatavad alumiiniumisulamid jaotatakse deformeeritavateks (pressitavad, valtsitavad, sepistatavad) ja valusulamiteks.

Deformeeritavate sulamite grupi kõige markantsemaks esindajaks on *duralumiinium*, mille koostisse kuuluvad: Cu – 3,8–4,9%, Mg – 0,4–1,6%, Mn – 0,3–0,9%, Si $\leq 0,5\%$, Fe $\leq 0,5\%$, Al – ülejäänud osa. Olulised on siin Al-Cu-Mg. Sulam on termiliselt töödeldav – lõõmutatav ja karastatav. Duralumiiniumi tõmbetugevus ulatub kuni 460 N/mm^2 . Tema puuduseks on madal korrosioonikindlus. Tema kaitsmiseks korrosiooni eest kasutatakse plakeerimist. Plakeerimisel valtsitakse duralumiiniumi koos puhta alumiiniumi lehtedega kuumas olekus. Alumiinium keevitub duralumiiniumiga ja kaitseb teda korrosiooni eest.

Valatavatest alumiiniumisulamitest on kõige levinumad *silumiinid*, mida kasutatakse laialt auto- ja lennukiehituses. Silumiinid on alumiiniumi sulamid räniga. Hea vedelvoolavus võimaldab saada keeruka kujuga valandeid, näiteks aparaatide korpusi ja nende osi. Mehaanilised omadused (R_m kuni 300 N/mm^2) jäävad alla malmile, mistõttu ei sobi kasutamiseks kõrgendatud tugevusnõuete puhul.

6.2. Alumiiniumisulamite tähistus

Alumiiniumi ja alumiiniumisulamite tähistamise kohta on kehtestatud Eesti Vabariigi Standardid, mis on kooskõlas vastavate Eurostandarditega:

- **EVS-EN 573** – Deformeeritavate toodete keemiline koostis ja kuju,
- **EVS-EN 1780** – Mittelegeeritud ja legeeritud alumiiniumkangid ümbersulatuseks, ligatuurideks ja valanditeks.

Iga alumiiniumisulamite tähistamiseks kasutatakse tunnusnumbrit ja margitähist.

Tunnusnumber koosneb neljast tähest ja neljast või viiest numbrist. Kolm esimest tähte on **EN A**, kus **A** tähistab alumiiniumi. Neljas täht on **W** kui tegemist on deformeeritava sulamiga, **B** kui mittelegeeritud või legeeritud alumiiniumkangiga, **C** kui valandiga ja **M** kui ligatuuriga (abisulam, mille koostisse kuuluvad elemente omastab legeeritav metall paremini kui puhtaid elemente).

Tunnusnumbreid, mis näitavad keemilist koostist, on deformeeritavatel sulamitel neli ja valusulamitel viis. Esimene number tähistab mõlemal juhul sulami gruppi ja see on:

- puhas Al (min 99,0% või rohkem) 1XXX või 1XXXX
- Al – Cu sulamid 2XXX või 2XXXX
- Al – Mn sulamid 3XXX
- Al – Si sulamid 4XXX või 4XXXX
- Al – Mg sulamid 5XXX või 5XXXX
- Al – Mg-Si sulamid 6XXX
- Al – Zn sulamid 7XXX või 7XXXX
- Al – muud elemendid 8XXX.

Tunnusnumbrite näiteid: **EN AW-5052** (deformeeritav sulam), **EN AB-44000** (valusulam).

Margitähisteks on keemiliste elementide tähistused, mille järel näidatakse %-des nende sisaldus.

Tavaliselt antakse sulami margitähis tunnusnumbri järel kandilistes sulgudes.

Näiteks: deformeeritav sulam – **EN AW-5052 [AlMg2,5]** või **EN AW- AlMg2,5**,
valusulam – **EN AC-44000 [AlSi11]** või **EN AC- AlSi11**.

7. VASK JA VASESULAMID

7.1. Vase ja tema sulamite omadused

Puhas vask, lisandite üldine hulk alla 0,1%, on väga plastiline, suure elektri- ja soojajuhtivusega, hea kuumapüsivusega. Tema eriraskus on $8,9 \text{ N/mm}^2$, sulamistemperatuur $1083 \text{ }^\circ\text{C}$, $R_m = 270 \text{ N/mm}^2$, $\delta = 40\text{--}50\%$. Elektri juhtivuselt jääb ta alla vaid hõbedale. Lisandid (eriti vismut ja plii) halvendavad elektri juhtivust ja teevad vase rabedaks.

Vase sulameid tsingiga nimetatakse *valgevaskedeks* ehk *messingiteks*. Praktilist kasutamist on leidnud kuni 45% tsingisisaldusega vasesulamid. Maksimaalse plastilisusega on 30% tsingisisaldusega sulam, mis on ka hea vedelvoolavusega. Suure vasesisaldusega messingid on kallimad, sest vask on kallim kui tsink, ja neil on kullale sarnane läik. Kasutatakse juveliirtööstuses ja nimetatakse tombakuks.

Vase sulameid tinaga nimetatakse tinapronksideks. Üle 5–6% tinasisaldusega pronkse kasutatakse valupronksidena. Valamisel iseloomustab neid väike kahanemine – 1% (messingitel ja malmil – 1,5%, terasel – 2%). Pronksidel on suur keemiline püsivus ja seetõttu kasutatakse teda veevarustuse armatuuri valmistamiseks.

Tina säästmiseks ja pronksi hinna vähendamiseks lisatakse pronksidele 5–10% tsinki. Parema töödeldavuse saavutamiseks lisatakse pronksile 3–5% seatina.

Vase sulameid alumiiniumiga, räniga, berülliumiga jt elementidega nimetatakse samuti pronksideks.

Alumiiniumpronksidel (sisaldavad 5–10% Al) on paremad mehaanilised omadused ja neist valmistatakse mitmeid masinaelemente – pukse, juhtpindu, äärikuid, hammasrattaid jm.

Ränipronksid (sisaldavad 4–6% Si) on tinapronksidele sarnaste omadustega ja nad asendavad neid.

Berülliumpronks (ca 2% Be) on suure tugevuse ja elastsusega, suure keemilise püsivusega, hea keevitatavuse ja lõiketöödeldavusega. Temast valmistatakse elastseid tundlikke elemente – vedrusid, membraane jm.

Pliipronks (sisaldab 30% Pb) on masinaehituses kasutusel antifriktsioonmaterjalina.

7.2. Vase ja vasesulamite tähistus

Vase ja vasesulamite tähistamiseks kasutatakse margitähiseid vastavalt rahvusvahelisele standardile ISO1190/1, tunnusnumbreid vastavalt standardile EVS EN 1412 ja materjali oleku tähistust vastavalt standardile EVS EN 1173.

Margitähistus põhineb materjalide keemilise koostise näitamisel.

Puhta vase (vähemalt 99,0% vaske) margitähis on **Cu**, millele järgnevad vase tüüpi iseloomustavad suurtähed, näiteks **Cu-ETP**, **Cu-DHP**, **Cu-FRHC**.

Vasesulamite margitähis koosneb põhielemendi tähisest **Cu**, millele järgnevad legerivate elementide keemilised sümbolid ja nende sisaldust täisprotsentides (kui see on üle 1%) näitavad arvud. Deformeeritavate- ja valusulamite võimalikku sarnast koostist silmas pidades on valusulamite tähistes täht **G**.

Tunnusnumbrid on kuuepositionilised. Esimesel kohal on täht **C**, mis tähistab vaske. Teisel kohal on täht, mis tähistab materjali liiki: **B** – valukangina ümbersulatamiseks ja valandite valmistamiseks, **C** – valandina,

M – ligatuur, **R** – rafineeritud mittedeformeeritav vask, **S** – joote- ja keevislisamaterjal, **W** – materjal deformeeritud toodetena, **X** – mittestandarditud materjalid. Positsioonidel 3 kuni 5 on numbrid 000-st kuni 999-ni. Kuuendal positsioonil on taas täht, mis näitab materjaligruppi.

Materjali oleku tähis koosneb neljast sümbolist, millest esimene on täht ja ülejäänud numbrid. Tähtedega tähistatakse järgmisi omadusi: **A** – katkevenivus, **B** – vedru paindepiir, **D** – tõmmatud, mehaanilisi omadusi määratlemata, **G** – terasuurus, **H** – kõvadus, **M** – valmistamisolekus, mehaanilisi omadusi määratlemata, **R** – tõmbetugevus, **Y** – tinglik voolavuspiir $R_{p0,2}$. Tähtedele järgnevad numbrid näitavad vastava mehaanilise omaduse väärtust.

Näiteid vase ja vasesulamite tähistamisest:

- vask 99,95% - line, margi ja oleku tähistega **Cu-OF-A007**, katkevenivus 7%, tunnusnumber **CW008A**,
- vase sulam tsingiga – valgevask ehk messing, margi ja oleku tähised **CuZn37-G020**, tsingi sisaldus 37%, keskmine terasuurus 20 μm , tunnusnumber **CW508L**;
- vase sulam tsingi ja pliiga, margi ja oleku tähised **CuZn36Pb3-M**, tsingi sisaldus 36%, Plii sisaldus 3%, valmistamisolekus (numbritega ei iseloomustata), tunnusnumber **CW603N**;
- vase sulam tina ja pliiga – pronks, margi ja oleku tähised **CuSn4Pb2-R550**, tina sisaldus 4%, plii sisaldus 2%, tõmbetugevus 550 N/mm², tunnusnumber **CW455K**.

8. PLASTID

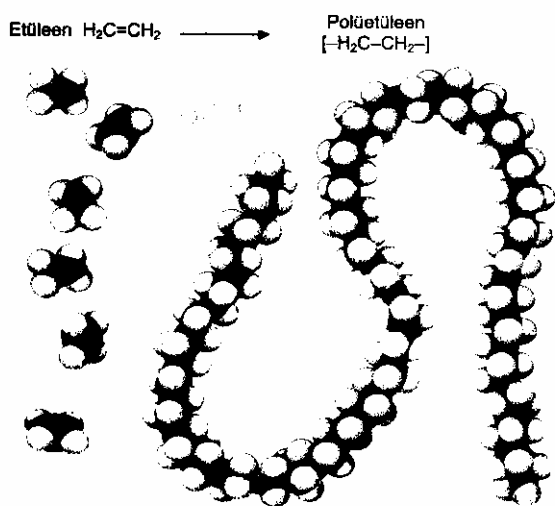
8.1. Plastide üldised omadused

Plastid ehk *plastmassid* on materjalid, mis koosnevad looduslikest (tselluloos, kautšuk) või sünteetilisest polümeeridest, millele on lisatud mineraalseid või orgaanilisi täiteaineid plasti omaduste muutmiseks soovitud suunas (plastifikaatoreid, stabilisaatoreid, pigmente, pooritekitajaid, määrdeaineid jm).

Polümeer on orgaaniline ühend, mille molekul on moodustunud ühe või mitme lihtsama ühendi – monomeeri molekulide polümerisatsiooni (molekulide ühinemise) teel või polükondensatsiooni (molekulide ühinemisel eraldub vesi või alkohol) teel.

Plaste hakati tootma juba XIX sajandi keskpaiku, kuid laiemal leviku said nad pärast II maailmasõda. Tänapäevalgi luuakse järjest uusi, üha kõrgemate omadustega plaste, mis asendavad edukalt traditsioonilisi konstruktsioonimaterjale.

Plastide üldisi omadusi: väike tihedus, suhteliselt suured, kuid metallidest väiksemad tugevusnäitajad, head soojusisoleerimis- ja dielektrilised omadused, vastupidavus keemiliselt ja bakterite suhtes, hea töödeldavus, rabedus madalatel temperatuuridel, mehaaniliste tugevusnäitajate alanemine temperatuuri tõustes, kõrge korrosioonikindlus, tundlikkus orgaaniliste lahustite suhtes, kiire vananemine õhuhapniku ja ultraviolettkiirguse toimel, roomavus (plastne deformerumine suhteliselt väikestel koormustel), jäätmete tülikas utiliseerimine.



Joonis 8.1. Polümeeri molekuli lineaarne ahel.

Plasti omadused määrab eelkõige temas sisalduv põhikomponent – polümeer. Neid liigitatakse termoplastseteks ja termoreaktiivseteks.

Termoplastsete polümeeride molekulid on lineaarse ahela kujulised (joonis 8.1).

Need polümeerid lähevad kuumutamisel voolavasse olekusse (just nagu “sulavad”). Jahtudes omandavad nad jälle esialgsed omadused. Tüüpilised termoplastsed polümeerid on polüetüleen (lühendatult – PE), polüpropüleen (PP), polütetrafluoretüleen (PTFE), polüstüreen (PS), polüvinüülkloriid (PVC), polüamiid (PA), polümetüülmetakrülaat (PMMA), polükarbonaat (PC) jt. Neile täiteainete lisamisega saadud aineid nimetatakse *termoplastideks*.

Termoreaktiivsete polümeeride molekulidel on ruumiline struktuur, mis tekib kui lineaarse ahelaga molekulide vahel tekivad põiksidemed ja moodustub sõrestik. Kuumutades see sõrestik ei lagune ja termoreaktiivne polümeer ei muutu ei pehmeks ega voolavaks. Tüüpilised termoreaktiivid on

epoksüvaik (EP), fenoolformaldehüdvaik (PF), polüestervaik jt. Neile täiteainete lisamisega saadud aineid nimetatakse *reaktoplastideks*.

8.2. Termoplastid

Polüetüleen

Saadakse etüleeni polümeriseerimisel. On piimjasvalge, poolläbipaistev, väga elastne, hea dielektrik, vastupidav hapete, leeliste ja orgaaniliste lahustite toimele, vananeb õhuhapniku ja valguse toimel kiiresti, muutub +100 °C juures pehmeks ja voolavaks, on keevitav.

Polüetüleenist valmistatakse kilet, torusid, voolikuid, toidunõusid, juhtmete isoleerimist jm.

Eristatakse kõrgsurve- (väikese tihedusega) ja madalsurve (suure tihedusega) polüetüleeni, millest valmistatakse tooteid valamise ja ekstrusiooni teel.

Polüetüleenil alusel valmistatakse mitmete eriomadustega plaste – antistaatilisi, valguskindlaid, fotolagunevaid, isekustuvaid, vulkaniseeruvaid, elektrit juhtivaid jm.

Polüpropüleen

Saadakse propeeni polümeriseerimisel. On hallikasvalge või kollakas lõhnata materjal, hea dielektrik, polüetüleenist suurema tugevuse ja jäikusega, kõrge väsimustugevusega, hea keemiline vastupanuga, habras madalatel temperatuuridel.

Polüpropüleenil kasutatakse mitmesuguste tehnikatoodete (eriti raadiotehniliste) valmistamiseks valamise, pressimise ja ekstrusiooni teel. Materjali tootvad firmad on andnud mitmetele oma toodangu markidele kõlavaid nimesid nagu elpon, mopron, silpon jm.

Polüstürool

Saadakse stüreeni polümeriseerimisel. On värvitu, läbipaistev, küllaltki kõva, kuid rabe, vähese kuumakindlusega, vähese vastupidavusega lahustitele, hästi värvitav pigmentidega.

Polüstüroolist valmistatakse nii tehnikatooteid, kui ka tarbekaupu ja mänguasju kõiki plastide töötlemise võtteid kasutades. Näiteks on enamik arvutustehnikast polüstüroolist korpustes. Vahtpolüstürool tihedusega (16–40 kg/m³) on väga hea soojusisolatsiooni- ja pakendimaterjal, mis on vastupidav niiskusele, kuid on tuleohtlik ja ei talu lahusteid. Kasutades täiteainena kautšukit, saadakse löögikindel polüstürool.

Polüvinüülkloriid

Saadakse kloorvinüüli polümeriseerimisel. On kollakas, läbipaistmatu, sitke, väikese kuumakindlusega, puhtal kujul väga jäik, mistõttu kasutatakse koos plastifikaatoritega. Rohke plastifikaatori lisamisega muutub väga painduvaks ja temast valmistatakse plastikaate ehitus- ja kaablitööstusele (killed, torud, lehed, profiiltooted), tehisnahka jalatsi- ja tekstiilitööstusele, põrandakatet – relviini. Tooted valmistatakse peamiselt ekstrusiooni ja survevalu teel. Survevalumeetodil valmistatakse temast uisu- ja suusasaapaid.

Polüakrülaat

Enam kasutatakse polümetüülmetakrülaati, mida saadakse metüülmetakrülaadist. On värvitu, hea läbipaistvusega (orgaaniline klaas), lahustub hästi orgaanilistes lahustites, väikese kuumakindlusega.

Kasutatakse lehtede kujul läbipaistvate konstruktsioonelementide, valgustehniliste ja dekoratiivtoodete valmistamiseks.

Polüamiid

Saadakse aminohapete ja diamiinide polükondensatsioonil (kapron) või laktaamide astmelisel polümeriseerimisel (nailon). Mõlemad on kõvad, sitked ja tugevad ning neid kasutatakse peamiselt tekstiilkiudainete valmistamiseks. Kompaktse materjalina sobivad liugelaagrite ja hammasrataste valmistamiseks, sest on heade antifriksioonsete omadustega ja kulumiskindlad. Põhilised töötlemisviisid on survevalu ja ekstrusioon.

Polükarbonaat

Saadakse difenüülpropeeni polükondenseerimisel. On hele, hea läbipaistvusega (kuni 87%), suure tihedusega (1 300 kg/m³), hea löögisitkusega, heade dielektriliste omadustega, töötemperatuurid jäävad vahemikku –100 °C kuni +130 °C, hästi värvitav pigmentidega.

Polükarbonaatidest valmistatakse optilisi detaile, lehti, kilesid, olmemasinate (kohvimasinate, mikserite jt) korpuseid jm.

Fluorplast

Saadakse tetrafluoreteeni ja trifluoreteeni polümeriseerimisel. Esimesel juhul saadakse polütetrafluoretüleen, mille kaubanduslik nimetus on teflon, tööstuslik – fluorplast. Ta on piimjasvalge, läbipaistmatu, erakordselt vastupidav hapetele, leelistele ja orgaanilistele lahustitele (võrreldav kulla ja platinaga), kuumakindel (kaotab struktuuri +327 °C juures, laguneb +415 °C), töötemperatuuri vahemik –270 °C kuni +260 °C, head antifriksioon- ja dielektrilised omadused, nõrgad mehaanilised omadused, kaldumus roomavusele, üks kõige kallimaid plaste.

Kasutatakse tööpindade katmiseks ja toodete valmistamiseks, millelt nõutakse antifriksioonilisi omadusi ja püsivust laias temperatuurivahemikus. Näiteks köögitehnika katmiseks, aga ka kolvirõngaste, liugelaagrite pukside jm valmistamiseks. Tooted valmistatakse pooltoodetest – plaatidest, torudest jm mehaanilise töötlemise teel.

8.3. Reaktoplastid

Fenoplast

Saadakse fenooli ja aldehüüdide polükondensatsioonil. Protsessi käivitab kõvendi lisamine vedelale vaigutaolisele lähteainele. Sisaldavad rohkesti orgaanilisi (puidujahu jm) või anorgaanilisi (kaoliin, grafiit, metallid, klaas jm) täiteaineid pulbri (talk), kiudude (puit, klaas, asbest jm) või kihtide (paber, riie) kujul.

Tooted valmistatakse pressimise või pooltoodetest (lehed, profiilid) lõiketöötlemise teel. Tooted eraldavad mõni aeg pärast valmistamist mürgiseid fenooli.

Epoksüplastid

Saadakse epoksüvaikude kõvenemisel polüamiinide toimel. Erinevate vaikude, kõvendite, täiteainete ja muude lisandite kombineerimisega saadakse palju erinevate omadustega tooteid. Suuremõõtmeliste toodete valmistamiseks kontaktvormimise teel kasutatakse täitematerjalina klaasriiet, klaaskiudu või süsinikkiudu.

Epoksüvaikude eeliseks on hea töödeldavus: hea adhesioon täiteainetega, kõvenemise aja ja temperatuuri reguleerimise võimalus, suur plastsus, keemiline inertsus, kõvenemisel ei teki lenduvaid aineid.

Aminoplastid

Saadakse karbamiidi või melamiini ja aldehüüdide polükondensatsioonil. Mõlemad on tugevad ja jäigad plastid küllaltki sarnaste omadustega. Töötemperatuurid kuni 80 °C ja 95 °C vastavalt, väga head dielektrikud, hea vastupanu enamikele kemikaalidele. Kasutatakse nii tarbekaupade (näiteks toidunõud) kui ka tehnikatoodete (elektrotehniliste) valmistamiseks.

Räniorgaanilised plastid

Sisaldavad lisaks polümeeridele tavaliste süsivesinike rühmade veel räni ja hapniku lüüsid (polüorganosiloksaanid e silikoonvaigud). Nende termokindlus (töötemperatuur kuni 550 °C) ületab tunduvalt orgaaniliste polümeeride oma. Lisaks sellele taluvad nad lühiajaliselt veelgi kõrgemaid temperatuure (2 000–3 000 °C).

Nad on head dielektrikud, külma- ja korrosioonikindlad ning mittemärguvad (toote pinnale moodustub vett tõrjuv kiht).

Polüestervaikudest plastid

Polüestervaigud olid esimesed konstruktsiooniplastid. Nendest hea voolavusega vaikudest võib kõvendi lisamisega vormida suuremõõtmelisi tooteid, millel täiteaineks tekstiil või klaasriie. Saadakse klaasplast, millest valmistatakse paadikeresid ja muid vähem koormatud laevaosi, masinate kabiine jm.

Puuduseks halb adhesioon täiteainetega, haprus, vähene kuumakindlus ja lõõgisitkus, suur kahanemine ja mürgiste ainete eraldumine kõvenemisel.

8.4. Plastkomposiidid

Plaste klassifitseeritakse ka põhiliste täiteainete liigi järgi.

Plastkomposiitideks nimetatakse materjale, mis koosnevad polümeerselt põhimaterjalist – *maatriksist* – ja seda tugevdavast täitematerjalist – *armatuurist*. Lisaks neile kahele komponendile võidakse lisada plastide omaduste parandamiseks veel *plastifikaatoreid* (termoplastide vormitavuse parandamiseks), *määrdeaineid* (plasti kleepumise vältimiseks pressvormi seintele), *stabilisaatoreid* (aeglustavad polümeeri vananemist) ja muid *erilisandeid* (vedeldid, põlemist takistavad ained jm).

Konstruktsioonidetallide valmistamiseks kasutatakse maatriksitena enam termoreaktiivseid polümeere. Armatuurist olenevalt eristatakse järgmisi plastkomposiite:

- klaasplastid,
- süsinikplastid,
- boorplastid,
- metalloplastid,
- organoplastid.

Klaasplastid olid ühed esimesed plastkomposiididest, mida hakati kasutama juba 1930-ndatel aastatel. Klaaskiudarmatuuri kasutatakse purustatud kiudude, kiududest punutud nõõri või kootud riide kujul. Klaasplast võib olla orienteeritud ühesuunalise või orienteerimata armatuuriga. Orienteerimisega saavutatakse maksimaalne tugevus ja jäikus ühes suunas. Optimaalne armatuuri maht on 60–65%, seda piirab maatriksi (tavaliselt epoksü- või polüestervaigud) märgamisvõime.

Armatuuri suure tugevuse tõttu (suurem kui terasel või duralumiiniumil) kasutatakse klaasplaste raskelt koormatud konstruktsioonidetailide valmistamiseks lennuki- ja raketikonstruktsioonides, ehituses, laevaehituses, keemiatööstuses (mahutid ja torud), elektrotehnikas.

Süsinikplastides on armatuuriks kas madala või kõrge elastsusmooduliga (sõltuvalt saamise tehnoloogiast) süsinikkiud. Maatriksiks on epoksü-, fenool- või silikoonvaigud. Süsinikplaste iseloomustab väike tihedus, suur jäikus, tugevus ja termopüsivus ning erinevalt teistest plastidest hea ja soojus- ja elektrijuhtivus.

Madala elastsusmooduliga süsinikkiudu kasutatakse voolu- või soojusjuhtide, filtrite, soojusekraanide, antifriktsioonmaterjalide jm valmistamiseks.

Kõrge elastsusmooduliga (150–500 GPa) ja suure tõmbetugevusega (1 500 MPa) süsinikkiudu sisaldava süsinikplasti tõmbetugevus ja jäikus ületavad klaasplaste, teraseid, alumiinium- ja titaanisulameid. Suhteliselt madalad on survetugevus ja nihketugevus. Seevastu on süsinikplastidel kõrge väsimustugevus ja hea vibratsioonisummutavus, mistõttu sobib näiteks propellerite ja lennukitiibade valmistamiseks.

Boorplastide armatuuriks olevad boorikiud on 10 korda jämedamad ja 30% tihedamad kui süsinikkiud. Maatriksiks on epoksü-, fenool- või silikoonvaigud.

Boorplastide survetugevus on 20–30% suurem kui tõmbetugevus. Kasutatakse lennukite raamiosade valmistamiseks, mis võimaldab lennukite nende osade massi vähendada 20–30% võrreldes alumiiniumsulameist valmistatutega.

Metalloplastides on armatuuriks metallipulbrid, terastraat jm metalltooted. Metalloplastide positiivsed omadused on: odavus, suurem tugevus võrreldes teiste plastkomposiididega, stabiilsed omadused.

Nende puuduseks on suur tihedus (5 000–6 000 kg/m³), mis vähendab eritugevust.

Organoplaste kasutatakse juba XX sajandi algusest saadik. Siis armeeriti plaste looduslike kiududega – puuvill, lina, tselluloos jm. Et nende looduslike kiudude tõmbetugevus on väike, siis on need asendatud sünteetiliste kiududega – kapron, nailon, lavsaan jt.

Organoplastidel on madal tihedus ja soojusjuhtivus, suur elastsus, väike jäikus ja survetugevus. Nende omadused sõltuvad armatuuri ja maatriksi vahelisest toimest plasti valmistamise ajal. Parimate omadustega on organoplastid, milles armatuurina kasutatakse kevlar-tüüpi aramiidkiudu ja maatriksina sama koostisega aramiidvaiku. Eritugevuse poolest ületavad nad tugevamaid klaasplaste 1,5 korda ja duralumiiniumi 10 korda. Erijäikus on neil 2–3 korda suurem kui klaasplastidel ja duralumiiniumil, kuid siiski väiksem kui süsinik- ja boorplastidel.

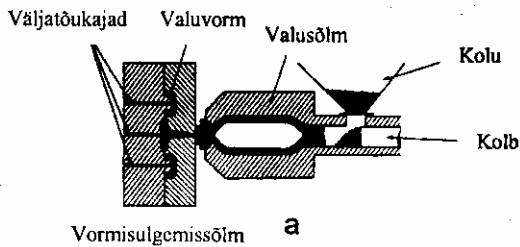
Eriti suur on organoplastide väsimustugevus ja löögisiskus, mis teeb nad asendamatuks kaitseriietuse ja spordivahendite (hokikepid, tennisereketid, suusad jm) valmistamisel.

8.5. Plastide töötlemine

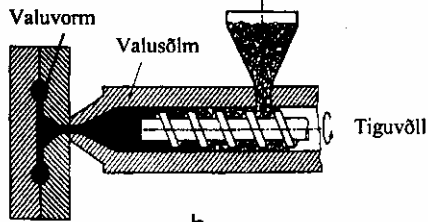
Töötlemisviis oleneb plasti liigist ja toote konstruktsioonist. Termoplaste valatakse, vormitakse ja töödeldakse ekstrusiooni teel. Neid võib ka keevitada. Reaktoplaste pressitakse, valatakse ja vormitakse. Mõlemat liiki plastide puhul võib kasutada lõiketöötlemist (treimist, freesimist, puurimist, saagimist).

Valamine

Vedel või graanulite kujul olev plast kuumutatakse (muutub vedelaks) ja surutakse tootekujulisse vormi. Plast võtab vormi kuju ja pärast jahtumist ning tardumist lükatakse valmis toode vormist välja. Enamik plaste on isegi kuumutades valamiseks liiga viskoossed. Seepärast toimetatakse tööstuses valamist surve all (joonis 8.2).



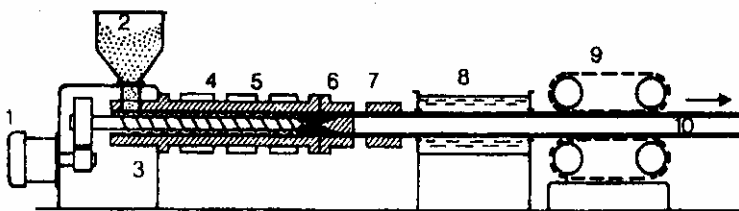
Vormisulgemissõlm a



Vormisulgemissõlm b

Joonis 8.2 Survevalumasin:

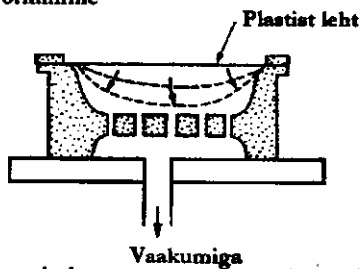
- a) suruva kolviga,
- b) tigupressiga.



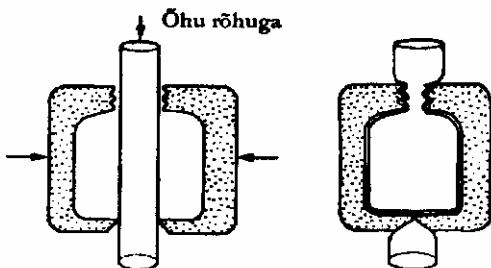
Joonis 8.3. Plasttoru valmistamine: 1- mootor,

- 2 - täitekuu, punker, 3 - ekstruuderpress, 4 - tigu,
- 5 - küttekeha, 6 - suuline, 7 - kalibraator, 8 - jahutus,
- 9 - tõmbepink, 10 - valmis toru.

(a) Vaakumvormimine



(b) Pnevumvormimine



Toote vormimise protsess jaguneb neljaks etapiks:

- vormi liikumine vastu suulist,
- materjali surumine vormi,
- materjali tardumine vormis,
- vormi avamine ja toote eemaldamine.

Termoplastide valamisel on temperatuur masina silindris 100–280 °C ja rõhk 57–400 MPa. Vormi temperatuur on 30–90 °C, mistõttu materjal tardub jahtubes ja võtab vormi kuju.

Reaktoplastide puhul on silindri temperatuur 80–95 °C ja rõhk 100–200 MPa. Nende survevalu on võimalik vaid korra kuna nad kaituvad lühikese aja vältel nagu termoplastid. Kuumas vormis (140–240 °C) materjal kõveneb reaktsioonide tulemusena.

Pressimine

Pressimisel viiakse vormi asetatud materjal rõhu ja kuumuse toimel plastsesse olekusse (polümeriseeritakse) nii, et ta täidab kogu vormi. Vormi pandud plasti pulber või graanulid muutuvad temperatuuril 170–200 °C ja rõhul 15–75 MPa voolavaks, täidavad vormipesa ja muutuvad keemiliste reaktsioonide tulemusena kõvaks ja lahustumatuks. Levinuim pressimis-skeem on otsepressimine, mis toimub analoogselt metallidele (joonis 5.13. b).

Ekstrusioon

Ekstrusiooni protsessi käsitlesime metallidega seoses ja selle skeem on toodud joonisel 5.20. Plastide töötlemisel toimub protsess analoogselt.

Termoplastid muudetakse ekstruuderi kuumas (140–240 °C) silindris pöörleva teo toimel plastseks ja see võimaldab suruda neid läbi vormiva kanali – suulise. Plasttoru tootmise skeem on toodud joonisel 8.3.

Vormimine

Lehtmaterjalide vormimine on ainult plastidele omane töötlemisviis. Kasutatakse üle- ja alarõhu abil vormimist, räägitakse vastavalt pneumo- või vaakumvormimisest (joonis 8.4).

Joonis 8.4. Lehtmaterjalist toodete vormimine vaakumiga (a) ja ülerõhuga (b).

9. KUMMID

9.1. Kummi lähteained

Kummi on suure elastsusega (pikenemine tõmbamisel kuni 800%), vibratsioone summutav (neelab kuni 40% temale rakendatud mehaanilisest energiast, muutes selle soojuseks), suure keemilise vastupidavusega, rahuldava mehaanilise tugevusega, kulumiskindel, gaase ja vedelikke mitteläbilaskev materjal, mida saadakse looduslikule või sünteetilistele kautšukitele mitmesuguste täiteainete lisamise ja vulkaniseerimise teel.

Looduslik kautšuk on kautšukitaimede, millest tähtsaim on Brasiilias ja Kagu-Aasias kasvav puu – hevea, piimamahl ehk lateksi koagulatsioonil tekkiv aine. Puud vaigutatakse, saadud mahl pestakse ja töödeldakse etaan- või metaanhappega. Koaguleerunud lateksist saadud kautšuk valtsitakse lehtedeks. Keemiliselt on ta küllastumata süsivesiniku – isopreeni – polümeer, millel on pikad spiraalsed molekulid (sellest suur elastsus). Tavatemperatuuril on ta kõrgelastses olekus. Temperatuuridel alla 0 °C kaotab looduslik kautšuk elastsuse, muutub rabedaks ja on kasutamiskõlbmatu -35 °C juures. Ka kõrgematel kui +50 °C temperatuuridel ei saa teda tarvitada, sest muutub pehmeks. Temperatuuril +90 °C läheb kautšuk vaigutaolisesse olekusse ja laguneb +250 °C juures. Looduslik kautšuk on hea dielektrik, lahustub hästi süsivesinikes (benssiinis, bensoolis) ja teistes orgaanilistes lahustites ning mineraalõlides, kuid ei lahustu vees, reageerib kergesti halogeenide ja osooniga, oksüdeerub õhuhapniku käes.

Vulkaniseerimisega muudetakse kautšuk kummiks, millel on suurem tugevus, kõvadus, elastsus, kuumus- ja külmakindlus. Vulkaniseerimine toimub temperatuuridel 140–200 °C toodete toorikute vormides või nõ vabalt kateldes, autoklaavides jm. Kummi omaduste erinevuse põhjustab kautšuki makromolekulide vaheliste keemiliste sidemete – võrkstruktuuri tekkimine. Sidemete tekkimisele aitavad kaasa vulkaniseerivad ained (väävel, seleen, naatrium, sünteetilised vaigud jt), kiirendid (orgaanilised sulfiidid jt) ja aktivaatorid (ZnO, MgO jt).

Sünteetilised kautšukid saadakse polümerisatsiooni teel mitmesugustest sünteetilisest dieenidest (butadien-, butadienakrüülnitriil-, butadienstüreen-, butüül-, eteenpropeen-, fluoro-, klorobutadien-, silikoon-, uretaankautšukid). Need on polümeerid, mis toatemperatuuril on kõrgelastses olekus. Vulkaniseerimisega saadakse neist mitmesuguseid üld- ja eriotstarbelisi kumme. Sageli kasutatakse sünteetilist ja looduslikku kautšukki koos.

Sünteetiliste kautšukite koostist ja struktuuri muutes saab neist valmistatud toodetele anda omadusi, mis looduslikul puuduvad. Teatud kautšukiliikidel on väärtuslikke eriomadusi. Nii on butadienstüroolkautšuk töövõimeline temperatuurini -70 °C, klorobutadienkautšuk on püsiv benssiinis ja õlides (õlikindel kummi), silikoonkautšukid on väga kuumus- ja külmakindlad. fluorokautšukid on püsivad kõrgete temperatuurideni ja mitmete keemiliselt aktiivsete ühendite (hapete, leeliste, hapniku, osooni) suhtes.

Kummitoodete mehaanilised omadused (tõmbetugevus, kõvadus, kulumiskindlus, väsimustugevus jm) olenevad kummisegu koostisest, eelkõige täiteainetest. Nendest tahm ja mangaankarbonaat kasutatuna suurtes kogustes (45–60%) tõstavad kummi tõmbetugevust ja kulumiskindlust. Kriit ja talk, mida lisatakse isegi kuni 70% , teevad kummitooted odavamaks ja tõstavad mehaanilisi omadusi.

Mõned täiteained (eelkõige amiinid) kaitsevad kummit kiire vananemise eest. Vananemine on kummitoodete füüsikalise-mehaaniliste omaduste muutumine ajas (kõvastumine, hapruse suurenemine jne).

Plastifikaatorid ehk pehmedajad (steariin- ja oleiinhapped, osokeriit, parafiin, mõned mineraalõlid) on ained, mis annavad kummile pehmust ja külmakindlust.

Värvaineid (vt p. 11.8. Lakk- ja värvpinded) lisatakse kummisegusse toodetele vajaliku värvuse andmiseks. Mõned neist aeglustavad ka kummi vananemist.

Vähemvastutusrikaste toodete koostisse lisatakse regeneraati, mis on tarvitatud ja kõlbmatuks muutunud kummi ümbertöötlemisel saadav plastiline materjal. Regeneraadi kasutamine alandab kummitoodete hinda ja tõstab veidi nende plastilisust.

9.2. Kummitoodete tehnoloogia

Kummitoodete saamise tehnoloogilise protsessi esimene etapp on kummisegu e toorkummi valmistamine. See algab kautšuki tükeldamisest. Plastilisuse suurendamiseks lastakse kautšukitükid läbi valtside. Seejärel segatakse kautšuk pulbrikujuliste lisanditega spetsiaalsetes segistites. Sel viisil saadud segu – toorkummi – on homogeenne, plastiline ja väikese elastsusega mass, mis on kergesti survega töödeldav. Sellele massile antakse tulevase toote kuju kas pressvormides, pressides läbi avade või valtside abil ja saadakse pooltoode.

Teisel etapil toimub vulkaniseerivat ainet sisaldava kummisegust pooltoote termiline töötlemine – vulkaniseerimine. Selle käigus saab toode oma lõplikud tarbimisomadused.

Kummitooted võib nende valmistamise tehnoloogia järgi jaotada kahte liiki.

1. Kummisegust pressvormides vulkaniseerimise teel valmistatavad tooted. Tooted võivad olla väga erineva ja keeruka kujuga. See valmistamisviis õigustab end masstootmise korral, kuna pressvormide valmistamine on kallis.
2. Kummiprofiilidest (lehe-, nõõri- ja toruprofiilidest) valmistatavad tooted.

Sileda või mustri- pinnaga kummilehed saadakse valtsimise teel. Muud profiilid valmistatakse kummisegu pideva väljapressimisega läbi profiilikujuliste avade tigupressidel (analoogselt plastide valmistamisega).

Kummeerimine on mitmesugusest materjalist toodete katmine kummiga kaitseks agressiivsete keskkondade toime eest. Kummiseguga kaetud tooted vulkaniseeritakse. Kummeeritud kangaste valmistamisel puistatakse liikuvale kangale kummisegu, mis seejärel, liikudes üle kuuma metallplaadi, vulkaniseerub. Analoogselt toimub ka kummeeritud presentvoolikute valmistamine.

Mõlema liigi toodete lähtematerjalide koostise varieerimisega võib anda toodetele soovitud omadusi.

10. TIHENDUSMATERJALID

10.1. Tihendid

Tihendid on seadised, mis väldivad või vähendavad vedeliku, auru või gaasi läbivoolu kaasdetailide vahelisest pilust. Eristatakse:

- liikuvate liidete tihendid, mis sulevad liikumatu ja liikuva detaili vahelise pilu, näiteks tihenduskarbid, mansetid jne.
- liikumatute liidete tihendid, näiteks detailide vahele asetatavad vahelehed, vaherõngad, nõörtopendid jne.
- kontaktitud tihendid, näiteks labürinttihend.

Liikumatu liidete tihendid on harilikult valmistatud kokkupuutuvate detailide materjalidega võrreldes pehmemast materjalist. Kõrge temperatuuri ja suure rõhu korral kasutatakse selliste tihendite materjalidena pehmeid metalle, nagu vask, alumiinium ja pehmed terased. Tavatemperatuuride ja -rõhkude puhul kasutatakse tihendite materjalidena kartongi, asbesti, kummi jt materjale.

Tihenduskarb on seadis, mis hermetiseerib masina liikuva ja liikumatu osa (näiteks silindri ja kolvi) vahelise pilu. Tihenduskarbi tihenduselement on pehme topend (näiteks asbest-, kanepi- või kumminõör) või asbestist ja grafiidist südamikuga metallrõngaste komplekt.

Tihendite konstruktsioone käsitletakse põhjalikumalt kursuse masinaelementide osas.

10.2. Tihendimaterjalid

Füiber

Kiudmaterjal, mis on saadud liimi mittesisaldava kaltsupaberi immutamisel tsinkkloriidi kontsentreeritud lahusega ja sellele järgneva pressimisega. Veekindluse tõstmiseks immutatakse mõningaid fiibrimarke parafiini või vahaga. Toodetakse lehtedena paksusega 0,4–3,0 mm ja torudena. Materjal on hea mehaanilise tugevusega, hea elektri- ja soojusisolaator. Temast valmistatakse tooteid lõikamise, stantsimise ja vormimise teel. Fiibrit kasutatakse masinate ja aparaatide tihendite valmistamiseks, samuti ka seibide ja friktsioonidetallide valmistamiseks ning naha asendajana tarbeesemetes.

Tihendipapp

Paberitaoline lehtmaterjal, mille 1 m² mass on üle 250 g (kui mass on 250–500 g, siis nimetatakse kartongiks). Valmistatakse jämedast kiudainest – pruunist tselluloosist, pooltselluloosist, sulfaatselluloosist jm. Toodetakse nii immutatud kui ka immutamata pappi, mida väljastatakse lehtedena paksusega 0,3–1,75 mm või rullides. Kasutatakse äärik- ja teiste ühenduste tihendite valmistamiseks.

Paroniit

Lehtmaterjal, mida valmistatakse asbestkiudaine, kautšuki, mineraalse täiteaine, väävli ja lahusti segu valtsimise teel. Toodetakse ka õli- ja bensiinikindlat ning võrguga armeeritud paroniiti. Lehtede paksus 0,4–6,0 mm. Paroniidist valmistatakse mitmesuguse kuju ja mõõtmetega äärikliidete tihendeid mootoritele, hüdroseadmetele, masinatele, aparaatidele. Samuti ka äärik- ja teiste ühenduste torustikele ülekuumendatud ja küllastunud auru, kuumu õhu ja gaasi, leelilahuste, nõrkade hapete, ammoniaagi jms teisaldamiseks.

Asbestriie, -lint, -paber, -papp, -nõõr

Asbest on mineraal, mille sulamistemperatuur on +1 550 °C ja mis laguneb kergesti peenikesteks (läbimõõduga kuni 0,5 µm) painduvateks kiududeks. Kiududel on väga suur tõmbetugevus (kuni 3 GPa, suurem kui terasel). Viimasel ajal on asbestil avastatud kantserogeenne toime, mistõttu tema kasutamisest paljudes valdkondades on loobutud. Siiski on asbesti sisaldavaid tehnikatooteid veel palju kasutusel. Tooted valmistatakse asbestkiududest koos puuvilla või sünteetiliste kiududega punumise või ketramise teel.

Asbesttihendimaterjale kasutatakse eelkõige soojusisolatsiooniks temperatuuridel kuni +400 °C. Soojusisolatsioonilindi paksusega 0,5 mm laius küünib 175 mm-ni, papi paksused 1,3 kuni 10 mm-ni ja nõõri läbimõõdud 0,75 kuni 32 mm-ni.

Tehniline vilt

Vilti saadakse villa *vanutamise*ga. See seisneb villakiudude kihi töötlemises kuumu vee või auruga neid samal ajal hõõrudes ja sõtkudes. Protsessi käigus haagivad villakiud end soomuseid pidi üksteise külge ja tekib tihe vildikiht. Naturaalsel lambavillal on soomuseid kiudude küljes eriti palju, mistõttu saadakse tugev vilt. Vilt on halb soojusjuht, imab hästi vett (seejuures tema tugevus väheneb), on hapetele vastupidavam kui leelistele (leelis lõhub villa põhivalgu – *keratiini* molekule). Kiudude läbimõõdust olenevalt eristatakse jäme- pooljäme- ja peenvilti. Vilti kasutatakse liikuvate liidete (näiteks võlli ja liugelaagri) tihendamiseks.

Tehniline nahk

Naturaalse naha põhiosa moodustavad kollageenikiudude kimbud. Nahka, millelt on eemaldatud karvkate, marrasknahk ja nahaalune sidekude ning mida on pargitud, kasutatakse tehnikas ajamirihmana rihmülekanetes, tihendina, trumminahana jne. Ajamirihmade paksus küünib kuni 6 mm-ni, kuid tihendid on tavaliselt tunduvalt õhemad. Nahk säilitab elastsuse temperatuurivahemikus -50 – +150 °C, kuid talub halvasti vett ja pole vastupidav hapetele ja alustele. Nahast valmistatakse mansett-, klapi-, karp-, rõngas- ja teisi vahetihendeid ning membraane.

Naturaalse naha asendajana mitmetes valdkondades kasutatakse tehisnahka, mis koosneb enamasti kahest kihist: aluskihist, milleks on kiuline kangas, ja kattekihist, milleks on polümeerne kelme. Tehisnahka tarbijateks on autoehitus, jalatsi-, mööbli- ja galanteriitööstus.

Muud materjalid

Tihendite materjalidena kasutatakse veel kummi (vt ptk 9), mitmeid plaste (vt ptk 8), erinevaid paberisorte jm materjale.

11. PINDED JA PINDAMISE TEHNOLOOGIA

11.1. Pinnete ülesanded ja liigid

Pinne ehk pinnakate on materjali kiht või mitu kihti, mis on kunstlikult tekitatud kaetavale pinnale. Pinde väliskiht puutub kokku ümbritseva keskkonnaga. Pinde aluskiht, milleks on iga väliskihi all asetsev kiht, puutub kokku alusega. Aluseks võib olla kas kaetav pind ise, või, mitmekihilise katte puhul, alumine kattekiht.

Pindeid kantakse toodetele järgmistel eesmärkidel:

- kaitseks,
- dekoratiivse ilme saamiseks,
- eriomaduste andmiseks.

Kaitset vajavad eelkõige korrosioonialdid materjalid. Kaitsvad pinded tõstavad tavaliselt ka toodete tugevust, kulumiskindlust ja vastupidavust agressiivsetes keskkondades töötamisel.

Dekoratiivsed pinded parandavad toodete välisilmet ja täidavad ka teatud kaitsefunktsioone.

Pinded võivad anda toodetele eriomadusi: muuta elektri- ja soojajuhtivust, elektriisolatsiooni ja magnetilisi omadusi, valguse kiirgamise või neeldumise võimet, keemilist püsivust, kulumiskindlust jm.

Pindeid liigitatakse materjali järgi *metalleteks, mittemetalleteks, lakk- ja värvkateteks*. Kõigil neil on spetsiifilised omadused ja pealekandmise tehnoloogiad. Paljudel juhtudel kasutatakse vajaliku pinde saamiseks mitut kattekihti. Näiteks kantakse tootele aluskihina kas metall-, metalloksiid- või fosfaatkate ja pealiskihina lakk- või värvkate.

Pinde valikul arvestatakse paljusid asjaolusid:

- toote eksploatatsioonitingimusi,
- toote välisilmele esitatavaid nõudeid,
- toote materjali ja konfiguratsiooni,
- pinna katmise tehnoloogilisi võimalusi,
- pinde lubatavat paksust.

Enamus pindeid saadakse galvaanilisel meetodil. Kasutatakse ka kuumsukeldust, pealesulatamist ja -pihustamist, termodifusiooni, termomehaanilist, vaakumkondensatsiooni jt menetlusi. Enne pindamist tuleb kaetavad pinnad ette valmistada.

11.2. Aluspinna ettevalmistamine pindamiseks

Kõik pindega kaetavad tooted tuleb pindamiseks ette valmistada. Seda on vaja kvaliteetse pinde saamiseks. Tuleb juhendada reeglist, mille kohaselt isegi *halb kate hästi ettevalmistatud pinnal peab paremini vastu kui hea kate halvasti ettevalmistatud pinnal*.

Metalltoodete pinnad vajavad puhastamist enne mistahes liiki pindega katmist. Seda tehakse mehaaniliste, keemiliste ja termiliste meetoditega. Tavaliselt kasutatakse mitut meetodit koos.

Mehaanilistest viisidest on kõige efektiivsemad puhastamine liiva- või terashaavlijoaga. Puhastuskambris suruõhu abil tekitatud juga juhitakse toote pinnale 150–200 mm kauguselt. Sel viisil puhastatakse suuri pindu. Väikesemõõtmelised tooted pannakse koos liiva või haavlitega pöörlevasse puhastustrumliisse. Abrasiivosakesed eraldavad pinnalt rooste, tagi ja õli.

Mehaanilistest puhastusvahenditest kasutatakse veel terasharju, liivapaberit, abrasiivkääsid, lihv- ja poleerpastasid.

Keemiline meetod seisneb pinna söövitamises inhibeeritud väävel- või soolhappelahusega. Väävelhappe söövituslahus on 10–20%-line, soolhappe söövituslahus 5–10%-line. Mõlemale lisatakse umbes 1% inhibiitorit, s.o ainet, mis pidurdab keemilisi reaktsioone lahuse ja puhastatava toote pinna vahel. Söövitamine soolhappes toimub kiiremini kui väävelhappes. Soolhappe kerge lenduvuse tõttu tuleb töötlemisel tagada hea ventilatsioon. Söövitusele järgneb metalli pinna neutraliseerimine 1–2%-lise

naatriumhüdrosüüdi lahusega, pesemine puhta veega ja passiveerimine 0,5%-lise naatriumnitriti lahusega. Kõiki neid protsesse tehakse vannides. Lõpuks kuivatatakse toode kuuma õhu (110–120 °C) käes 5 kuni 10 minutit.

Termiline puhastamine seisneb toote pinna kuumutamises hapnik-ettünpõletiga. See meetod põhineb metalli ja rooste soojuspaisumistegurite suurel erinevusel. Kuna rooste paisumistegur on väiksem kui metallil, siis koorub ta kuumutamisel metalli pinnalt maha. Samaaegselt põlevad metalli pinnalt ka määrde- ja rasvained ning pind on kohe valmis kruntimiseks või muuks edasiseks töötlemiseks. Termilist meetodit ei soovitata metalltoodetele ja -konstruktsioonidele seina paksusega alla 5 mm, et vältida toodete kõmmeldumist.

Määrde- ja rasvainetest puhastamine on samuti kvaliteetse pinde saamise eelduseks. Termiline meetod tagab pinna täieliku puhastamise. Teiste meetodite puhul tuleb teha rasvärastamine kui iseseisev puhastamisoperatsioon metalli pinna ettevalmistamisel pindamiseks. See seisneb pinna töötlemises orgaaniliste lahustitega ja mitmesuguste vesilahustega. Orgaanilistest lahustitest kasutatakse bensiini, lakibensiini, klooritud süsivesinikke (tetraklormetaan, kloroform) jt.

11.3. Galvaanilised pinded

Galvaaniline katmine toimub elektrolüüsi teel. Voolu juhtivasse keskkonda – lahusesse või sulatisse, mida nimetatakse elektrolüüdiks, asetatakse kaks elektroodi. Anood ühendatakse alalisvooluallika positiivse klemmiga ja katood negatiivse klemmiga. Elektrivoolu toimel algab keemiline protsess, kus ioonid liiguvad elektrolüüdis vastavalt oma laengu märgile vastasnimelisel laetud elektroodile. Elektronid katoodilt anoodile ja positiivsed metallioonid katoodile. Elektrolüüsivannis on protsessi lihtne juhtida muutes elektrolüüsi režiimi (voolutugevust, pinget) ja elektrolüüdi koostist. Kaetav toode puhastatakse roostest ja rasvainetest ning asetatakse elektrolüüsivanni, kus ta ühendatakse juhtme abil katoodiga. Anoodid võivad olla metallist, keemiliselt inertsest materjalist (grafiit, süsi) või metallioksiididest (PbO_2 , Fe_3O_4). Elektrolüüdiks on vastava metallisoola lahus.

Galvaanilised metallpinded liigitatakse anoodseteks ja katoodseteks.

Kui pindemetall on alusmetallist keemiliselt vähem aktiivne, siis on tegemist katoodpindega. Näiteks on vask, nikkel, tina ja hõbe rauale katoodpinneteks. Tsink ja kadmium aktiivsemate metallidena on rauale anoodpinneteks.

Katoodpinne kaitseb alusmetalli seni, kuni pindekiht on vigastamata. Alusmetallini ulatava vigastuse korral tekib galvaanielement, milles alusmetall on anoodiks. Kuna katoodi pind on väga suur võrreldes anoodiga, siis lahustub anood agressiivses keskkonnas kiiresti.

Anoodpinne kaitseb alusmetalli ka siis, kui selles on alusmetallini ulatuvaid vigastusi. Näiteks kaitseb tsinkpinne rauda seni, kuni kogu tsingikiht on lahustunud. Tsingi kaitsev toime laieneb mitme millimeetri kaugusele pinde servast. Tänu sellele ei korrodeeru tsinkpleki lõikeservad ja tsingitud terastraadi lõikekohad. Isegi tsingitud poldile keeratud terasmutri keere on kaitstud.

Galvaaniline kate on ökonoomne (kaitseefekt saavutatakse juba õhukese kihiga), alusega tugevasti seotud, kuid poorne ja keerulise kujuga toodetel ebatühtlase paksusega. Katte paksus võib olla 1 kuni 100 μm .

Tsinkimine

Pinne on helehalli värvi, kõvadusega 50–60 HV. Tsinkpinne kaitseb terast korrosiooni eest õhu käes kuni +70 °C, kuid niiskes mereõhus ei ole püsiv. Pinne on plastne – teda võib painutada ja valtsida, kuid mitte pressida. Tsinkpinnet võib tema omaduste parandamiseks kroomida või fosfaatida ja seejärel katta laki või värviga.

Kadmeerimine

Pinne on omadustelt sarnane tsinkpindega, kuid sellest veelgi tugevam. Säilitab omadused kuni +250 °C. Teda võib valtsida, pressida ja tõmmata. Ta on vastupidav mereveele, kuid ei ole vastupidav väävligaasidele ja orgaaniliste ainete aurudega saastunud atmosfääris. Värvuselt on pinne hõbehall veidi sinaka varjundiga.

Kadmiumpinne kantakse tavaliselt terasest, vasest ja vasesulamitest valmistatud toodetele. Teda võib järgnevalt kroomida või fosfaatida ja katta laki või värviga.

Vasetamine

Pinne on plastne, hästi valtsitav, poleeritav ja jooteliidetega ühendatav. Lubatud töötemperatuur on kuni +300 °C. Vaskpinnet ei kasutata iseseisva pindena korrosiooni vastu, vaid aluspindena terasest ja alumiiniumsulamitest toodetel. Järgnevateks, dekoratiivseteks pinneteks on nikkel- ja kroompinded.

Nikeldamine

Pinne on hõbehall ja kergesti poleeritav (peegeldusvõime 60%). Öhu käes kattub õhukese passiivse kilega, kuid säilitab oma läike. Pinde lubatud töötemperatuur on kuni +650 °C. Nikkelpinne kantakse tavaliselt vasest ja terasest toodetele.

Kroomimine

Pinne on keemiliselt vastupidav, temperatuuri- ja kulumiskindel. Pinde kõvadus, värvus jt omadused olenevad pindamise režiimist. Näiteks võib saada piimja, hästi poleeritava, vähese poorsusega, pehme pinde (250–270 HV). Teistel režiimidel võib saada kas läikiva, kulumiskindla, kõvadusega 1 200 HV, kuid mikropragudega kroompinde, või halli värvusega, eriti kõva ja hapra pinde. Kroompindega kaetakse terasest, alumiiniumi- ja tsingisulamitest tooteid.

11.4. Oksiid- ja fosfaatpinded

Oksiid- ja fosfaatpinded tekitatakse toodete pinnale asetades nad teatud ajaks hapete kontsentreeritud lahustesse, millele on lisatud oksüdeerijaid (nitraate, naatriumi või kaaliumi nitriteid, kaltsiumi jm). Tekkivad pinded koosnevad metalli oksiididest ja lahustumatutest ühenditest. Pinde moodustamisest võtavad otseselt osa alusmetalli ioonid. Pinne kasvab tavaliselt alusmetalli sisse, mistõttu toote mõõtmed ei suurene.

Oksüdeerimine

Pinnet kasutatakse väikese süsinikusaldusega terasest toodetele dekoratiivse välisilme andmiseks ja piiratud korrosioonikaitseks. Vastupidavust korrosioonile tõstetakse toodete täiendaval töötlemisel õliga. Pinde värvus on mustast tumehallini. Ta ei ole kulumiskindel.

Fosfaatimine

Pinne koosneb mittelahustuvatest mangaani, raua ja tsingi fosfaatidest, mis tekitatakse terasest, malmist, alumiiniumist, tsingist ja magneesiumist toodetele. Fosfaatimisel alusmetalli füüsikalised omadused ei muutu, kuid toote joonmõõtmed suurenevad 5 kuni 8 µm võrra. Pinde värvus on mustast helehallini ja ta on poorne ega ole seetõttu korrosioonikindel. Korrosioonikindluse tõstmiseks tuleb fosfaatpinded värvida.

Anodeerimine

Pinnet kasutatakse alumiiniumist ja tema sulamitest toodetele korrosioonikindluse andmiseks ning seisneb toote pinnale kristallilise Al₂O₃ kihi tekitamises. Pinne on dekoratiivne, värvitu. Sobib krundiks lakk ja värvkatete alla. Anodeerimisel toote mõõtmed veidi suurenevad.

11.5. Difuused pinded

Tsementeerimine

Tsementeerimine on terastoodete pinnakihi rikastamine süsinikuga difusiooni teel. See tõstab pinnakihi kõvadust ja kulumiskindlust. Süsinik difundeerub umbes +900 °C juures 2–3 mm sügavuseni ja tema optimaalne sisaldus on 0,8–0,9%. Tsementeerimiseks asetatakse tooted ahju või vanni süsinikurikkasse keskkonda, mille oluliseks komponendiks on kas puusüsi või kaltsineeritud sooda. Difundeerunud süsiniku hulk ja kihi paksus oleneb protsessi kestusest, mis on 4–18 tundi. Tooted on pindkarastatavad.

Nitreerimine

Nitreerimine on legeerterasest toodete pinnakihi rikastamine lämmastikuga. See annab toodetele suure pinnakõvaduse, hea kulumiskindluse ja kõrge väsimustugevuse. Neid omadusi on vaja eelkõige hammasratastel ja nukkidel. Nitreerimine toimub šahtahjudes umbes +500 °C juures gaaside läbipuhumisega. Nitreeritava kihi 0,1 mm-se paksuse saavutamiseks kestab 15 tundi.

Kroomimine

Erinevalt galvaanilisest kroompindest ulatub difuusse kroomimise mõju sügavamale toote pinna sisse (kroomimise kiirus 0,02–0,04 mm/h). Kroomitakse terastooteid kõvaduse, kuuma-, kulumis- ja korrosioonikindluse tõstmiseks. Ud detaili kõvadus ulatub 1 200 HV. Kroomimine toimub ahjudes temperatuuril 950–1 100 °C kestusega 6 kuni 12 tundi.

Boorimine

Boorimisel rikastatakse toote pinnakihti booriga. Viimane suurendab kõvadust, kuuma-, happe- ja kulumiskindlust. Aluskihi kõvaduse suurendamiseks booritud tooted karastatakse. Boorimine suurendab kiirlõiketerasest lõikeriistade, pressvormide, stantside, transportööride osade jms püsivust 2–10 korda. Boorimine toimub ahjudes teraskonteinerites temperatuuril 900–1 000 °C elektrolüüdis (booritav detail on katoodiks) 4 tunni jooksul. Toote pinnale saadakse monoliitne 20–100 µm paksune Fe₂B pinne metallile.

11.6. Pihustatud pinded

Kaarpihustamine

Pinded tekitatakse sulatatud materjali pealepuhumisega tootele. Pinde materjal sulatatakse kaarleegis, mis tekitatakse kahe traadist elektroodi vahele. Kuumenenud traadiotstelt puhutakse suruõhuga sulametaili osakesed kaetava toote pinnale. Protsess on lihtne ja suure tootlikkusega (kuni 30 kg tunnis). Kasutatakse põhiliselt toodete (näiteks torude, tsisternide, metallkonstruktsioonide) korrosioonivastaseks töötlemiseks alumiiniumi või tsingi pealepihustamise teel. Pinnete paksus ulatub 3,5 mm-ni.

Kõrgsageduskeevitus

Toote pinnale kantakse pealesulatatavast materjalist pulbri kiht ja seejärel pannakse toode kuumutamiseks kõrgsagedus-elektromagnetvälja. Toote pealispinnas põõrisvoolud, mis sulatavad üles nii pulbri kui ka toote pealiskihi. Protsessi eelisteks põhimaterjali kiire ja ulatuselt piiratud ülessulamine ning automatiseeritavus. Nii näiteks kantakse adraateradele 2,5 minutiga 2 mm paksune kulumiskindel kiht.

Leekpihustamine

Pindematerjali (tsink, plastid, niklisulamid, Al₂O₃ jt) pulber juhitakse gaasileeki, mis kannab sulad piisad toote pinnale. Põlevgaasina kasutatakse atsetüleeni ja hapniku segu, propaani või propaan-butaani. Gaasileegi temperatuur ulatub kuni paarituhande kraadini. Protsessi eeliseks on see, et tootes ei teki deformatsioone ega põhimetalli struktuurimuutusi. Saadud pinnete kõvadus on märksa suurem kui pealepihustatud pinnatel.

Plasmapihustamine

Protsess sarnaneb leekpihustamisega, kuid töögaas (argoon, lämmastik, vesinik või heelium) viiakse plasmatronis plasmaolekusse, mis tähendab mitmetuhande kraadist temperatuuri (argooni puhul kuni 15 000 °K). Pihustatav pulber (oksiidid jm) juhitakse plasmajoasse transportgaasiga, milleks on tavaliselt lämmastik. Plasmajoas on võimalik peale kanda ka kõrge sulamistäpiga materjale, mis tekitavad väga kõvasid ja kulumiskindlaid katteid.

Detonatsioonipihustamine

Pindematerjali (kõvasulamid, karbiidid, oksiidid jt) pulbriosakeste kiirendamiseks ja kuumutamiseks kasutatakse lööklaine energiat. Detonatsiooniseadmes pannakse plahvatama gaasisegu, millesse viidud pulbri kannab lööklaine kiirusega kuni 1 200 m/s toote pinnale. Pulbriosakeste väga suure kiiruse tõttu on saadav pinne suure tihedusega ja hea nakketugevusega. Selliste pinnete ekspluatatsiooninäitajad ületavad kõiki varemkäsitletuid. Seejuures ei avalda pindamine mõju toote põhimetallile, kuna ta praktiliselt ei kuumene.

Protsessi laialdast kasutamist piirab seadmete ja tehnoloogia keerukus ja kõrge maksumus. Suure müra tõttu (kuni 140 dB) tõttu on vaja seade paigutada heli isoleerivasse kambris.

11.7. Sadestatud pinded

Sadestatud pindeid kasutatakse lõikeriistade, stantside, pressvormide, väntvõllide, pumpade ja mootorite detailide kõvaduse suurendamiseks, kulumis- ja korrosioonikindluse tõstmiseks. Pinne saadakse pinde materjali sadestamisega toote pinnale. Protsess toimub vaakumis, kus sadestatav materjal muudetakse järjestikku gaasiks, auruks, ioniseeritud auruks ja plasmaks. Pinnale kandmine toimub aurustumise, plasma pihustamise või pinna pommitamise teel sadestatava aine ioonidega. Kõige levinumateks pinde materjalideks on titaankariidid (TiC), titaannitriid (TiN) ja alumiiniumoksiid (Al_2O_3).

TiN pinde kõvadus on kuni 2 000 HV, kahekihilisel pindel Tin + TiC ulatub kõvadus kuni 3 000 HV (võrdluseks kroomi kõvadus on 1 200 HV). Ioonpommitamisega võib saada ka rasksulavatest metallidest (Ti, Mo, Cr, W, V jt) kulumiskindlaid pindeid kõvadusega kuni 3 600 HV.

11.8. Lakk- ja värvpinded

Lakk- ja värvpinnetega katmine on lihtne ja efektiivne korrosioonikaitse, dekoratiivsete ja elektroisolatsiooniliste omaduste tõstmise viise. Käesoleval ajal kaetakse nende pinnetega üle 80% kõikidest metalldetailidest.

Pinne peab hästi nakkuma aluspinnaga, olema tugev ja vastupidav. Ta peab olema kõva, et ei tekiks kriimustusi, ja sitke, et ei praguneks löögi mõjul. Algul peab ta olema vedel, et teda saaks pinnale kanda, hiljem peab aga kõvenema. Vedel värv valgub pinnal ühtlase kihina laiali. Voolavus ei tohi olla liiga suur, et vertikaalsetel pindadel ei hakkaks värv enne kuivamist allapoole valguma ja ei tekiks ülalt alla kulgevaid värviniresid. Pinde nakkumine aluspinnaga sõltub viimase karedusest, poorsusest, hüdrofoobsusest jne.

Lakk- ja värvpinnete peamisteks koostisosadeks on kelmemoodusti ja pigment.

Värvi, mis ei sisalda pigmenti või milles värvaine on lahustunud, nii et värvikiht on läbipaistev, nimetatakse *lakiks*.

Email on värv, mis sisaldab lahustumatut pigmenti ja on läbipaistmatu.

Nii lakkide kui ka emailide pind võib pärast kuivamist olla läikiv, poolmatt või matt olenevalt värvi koostisest.

Pinde kuivamisel moodustub aluspinnal õhuke kelme, mis adhesioonijõudude toimeel seotakse alusega. Kelme isoleerib aluse ümbritsevast keskkonnast, kaitstes sellega aluspinda agressiivsete mõjude eest.

Kelmemoodustiks on peaaegu alati mingi polümeer – *looduslik-, tehis- või sünteetiline polümeer*. Et kelmemoodusti ei ole sageli värvimiseks küllalt vedel, siis sisaldab värv ka *lahustit*, milles kelmemoodusti on lahustatud. Kelmemoodusti võib anda lahustiga emulsiooni, siis saadakse *emulsioonvärv*.

Lahustiteks on enamasti kergestilenduvad, väga tuleohtlikud kuid suhteliselt vähemürgised lakibensiin ja tärpentiin. Neid aineid kasutatakse ka vedelditena, et anda värvile pinnale kandmiseks sobiv konsistents.

Loodusliku kelmemoodustiga värvid

Tähtsaimateks neist on õlivärvid, milles kelmemoodustiteks on küllastumata taimeõlid, mis õhu käes polümeriseeruvad. Neid nimetatakse kuivavateks õlideks – linaõli, pähkliõli, oliivõli jt. Neist õlidest valmistatakse naturaalvärnitsaid kõvenemise kiirendajate (näiteks MnO_2) lisamisega.

Mõnikord lisatakse värnitsatele lahusteid, eriti tärpentiini, ja naftasaadustest valmistatud sünteetilisi kelmemoodusteid. Selliseid segavärnitsaid nimetatakse *oksoolideks*. Naturaalvärnitsaid peetakse siiski paremateks.

Ka piirituslakid ja polituurid kuuluvad loodusliku kelmemoodustiga värvide hulka. Nad kujutavad endast šellaki, kampoli, mervaigu jt looduslike vaikude lahuseid etanoolis. Nad kuivavad väga ruttu, kuid on õrnad.

Bituumenlakk on bituumeni, mis saadakse nafta destilleerimisel, lahus lakibensiinis. Et tal on tetud korrosioonivastane toime ja ta nakkub hästi metalliga. Kasutatakse vähem nähtavate metalldetailide värvimiseks.

Tehiskelmemoodustiga värvid

Olulisimad neist on nitraattselluloosvärvid ehk *nitrovärvid*. Nende lahustiteks on alküületanaadid – *nitrolahustid*. Nitrovärvid on odavad ja kiirestikuiuvad, kuid ei nakku eriti hästi metallpindadega. Seepärast on vaja värvitavad pinnad eelnevalt kruntida.

Süntheetilise kelmemoodustiga värvid

Selle grupi olulised esindajad on *alküüdvärvid*, mille kelmemoodustiks on *glüftaal- või pentaftaalvaigud*. Nad on odavad, nakkuvad hästi igasuguste pindadega ja annavad mehaaniliselt tugeva pinde. Glüftaalvärve võib seetõttu kasutada metalli kruntvärvidena.

Omaette grupi moodustavad värvid, kus kelmemoodustiteks on *polüester-, epoksiid-, poliüretaan- ja formaldehüüdvaigud*. Need on vedelad termoplastsed vaigud, millele vahetult enne värvimist lisatakse *kõvendi*. Selle ja vahel ka kõrge temperatuuri toimel muutub vedel vaik tahkeks ruumilise struktuuriga kelmeks. Neid värve kasutatakse laialt auto- ja mööblitööstuses, ehituses parketilakkidena ja mujal. Oluliseks eeliseks on võimalus korruga peale kanda suhteliselt paks värvikiht, kuna kõvenedes ei pea sealt midagi lenduma. Õli-, nitro- või alküüdvärvide puhul tuleb paksema värvikihi saamiseks kanda mitu õhukest värvikihti üksteise peale, iga kord ära oodates eelmise kihi täieliku kuivamise.

Vesiemulsioonvärvides on kelmemoodusti emulgeeritud lahustis, milleks on vesi. Kelmemoodustiteks on mitmesugused kautšuki tüüpi polümeerid., näiteks butadieenstüroolkautšuk. Et nad on sarnased heveapuude piimahlaga, mida hüütakse *lateksiks*, siis on see nimi ka värvidel. Need värvid on odavad ja lihtsad käsitseda. Pärast kuivamist ei karda nad niiskust. Pigmentideks on peamiselt valged TiO_2 ja ZnO . Nende värvidega värvitakse ainult heledaid pindu, kuna nende katvus on väike. Ka ei ole nad mehaaniliselt eriti tugevad, mistõttu sobivad lagede ja seinte värvimiseks.

Liimvärvide kelmemoodustiteks on *kaseiin-, dekstriin-, sünteetilised- või kondiliimid*. Nad on samuti odavad, kuid suure poorsuse ja väikese katvusega. Kasutatakse peamiselt krohvi, betooni ja puitpindade katmiseks.

Pigmendid

Pigmentideks nimetatakse värvi muudes komponentides – kelmemoodustis, lahustis, vedeldis – lahustu-matuid värvaineid. Lisades lakile pulbrilist pigmenti, saame emaili. Pigmendid peavad olema väga peened pulbrid, osakeste läbimõõt alla $10\ \mu m$. Nad ei tohi reageerida värvi komponentidega, õhuhapniku, vee ega teiste õhus leiduvate ainetega. Nad ei tohi reageerida ka omavahel, kui neid sobiva värvitooni saamiseks segatakse.

Keemilise koostise poolest jagunevad pigmendid orgaanilisteks ja anorgaanilisteks. Anorgaanilised pigmendid on põhiliselt mitmete metallide, näiteks Fe, Zn, Pb, Cu, Cr, As, värvilised oksiidid või soolad ja mõnede metallide (Zn, Al, Cu) pulbrid. Mitmed neist on mürgised.

Orgaanilised pigmendid on looduslikud või sünteetilised ained. Levinumad on näiteks, indigo (nn "teksasinine"), aniliinpigmendid (aminobenseen) jm. Orgaanilistel pigmentidel on väga lai värvustegamma, kuid nad on väliskeskkonna mõjudele vähem vastupidavad kui anorgaanilised pigmendid.

Tugevate värvivate omaduste tõttu lahjendatakse pigmente täiteainetega. Täiteained on põhiliselt mineraalsed: talk, kaoliin, dolomiit, vilgukivi jm. Nende oskusliku valikuga võib parandada värvkatte omadusi – ilmastikukindlust, adhesiooni aluspinnaga, kattedõlvadust jt.

Krundid ja pahtlid

Pärast aluspinna puhastamist ja enne värvimist vajavad toodete pinnad kruntimist ning sageli ka pahteldamist. *Krundi* ülesandeks on luua tugev side pinna ja värvikihi vahel. Seega peavad nad omama nii pinna kui ka värvikihiga head adhesiooni, täitma kõik pinna poorid ja andma metallpinnale hea korrosioonikindluse. Krundikihid peavad olema õhukesed $15\text{--}20\ \mu m$ ja ühtlased.

Krunt valitakse vastavalt aluspinnale ja värvile või lakile. Kruntidel on samad kelmemoodustid, mis värvidel. Enamlevinumad on glüftaal-, fenool-, nitrotselluloos-, epoksü-, perkloorvinüül- jt vaigud. Kruntides on vähem pigmente ja täiteaineid kui värvides, nad on vedelamad ja odavamad. Lisaks võivad nad sisaldada taimseid õlisid, mis tagavad suurema püsivuse metallpindadel ja parema pooride täituvuse puitpindadel.

Värvitavate pindade ebatasasuste täitmiseks kasutatakse pahtleid. *Pahtlid* on suure konsistentsiga segud, mis valmistatakse samadest kelmemoodustitest kui värvidki, kuid nad sisaldavad enamtäiteaineid ja plastifikaatoreid. Pahtel kantakse krunditud pinnale õhukeste kihtidena (mitte üle $0,5\ mm$). Pahteldatud pind

on pärast kuivamist konarlik. Enne värvimist tuleb need konarused liivapaberiga või lihv- ja poleerpastadega maha lihvida. Kuna pahteldamine nõrgendab pinde mehaanilist tugevust jakaitsevõimet, siis ilmastiku- ja õlikindlaid pindeid üldjuhul ei pahteldata.

Värvimine

Värvitakse põhiliselt kolmel viisil:

- pintsliga või rulliga;
- sissekastmise või pealevalamisega;
- pihustamisega.

Värvimisviisi valik sõltub värvist, värvitava toote materjalist ja kujust, värvimistööde mahust ja kelme nõutavast kvaliteedist.

Pintsliga värvitakse väiksemaid pinde. Värv kantakse peale võimalikult õhukeste kihtidena kahes ristisuunas. Iga järgmise värvikihi pealekandmise eel olgu eelmine täiesti kuiv., vastasel juhul võib pealmine kiht kuivades kortsuda. Pintsliga värvimiseks sobivad aeglaselt kuivavad värvid. Nitro- ja mitmed sünteetilised värvid jätavad pintsliljäljed nähtavaks.

Suuremate tasapinnaliste esemete värvimiseks kasutatakse värvirulle. Tööjõudlus on suurem, kuid värvi nakkumine aluspinnaga halvem ja värvitud pind vähemläikiv kui pintsliga värvides.

Pihustamisel kanduvad värviosakesed värvitavale pinnale õhujoas või elektriväljas.

Kui ühendada värvitav ese miinus- ja värvipihusti plussklemmiga ning juhtida süsteemi kõrgepingeline 10–15 kV elektrivool, siis liiguvad laetud värviosakesed elektrivälja jõujooni mööda esemele, kattes selle ühtlase kihiga. Võrreldes pneumopihustusega on elektriväljas pihustusega värvi kokkuhoid 30–70%.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

1. Kulu Priit, Kübarsepp Jakob, Valdma Leo. 1998. Metalliopeetus ja metallide tehnoloogia I. Metalliopeetus ja metallurgia. Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn.
2. Kulu Priit, Kübarsepp Jakob, Laansoo Andres, Pirso Jüri, Valdma Leo. 2001. Metalliopeetus ja metallide tehnoloogia II. Metallide tehnoloogia 1 ja 2. Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn.
3. Arensburger Daniil, Kulu Priit, Kübarsepp Jakob, Pirso Jüri. 1999. Metalliopeetus ja metallide tehnoloogia III. Materjali ja tehnoloogia valik. Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn.
4. Guljajev A.P. 1962. Metallograafia. Eesti Riiklik Kirjastus, Tallinn.
5. Kulu Priit, Mens Endel. 2000. Metalliopeetuse laboratoorsete tööde juhendid. Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn.
6. Kulu Priit. 2001. Eurometallid. Terased. Malmid. Alumiiniumisulamid. Vasesulamid. Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn.
7. Laaneots Rein, Velling Ants, Kulu Priit. 1991. Masinaehitusmaterjalid III. Pinded. Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn.
8. Talimets E., Kallast V. 1988. Metallide korrosioon ja korrosioonitõrje. Tallinna Polütehniline Instituut.
9. Kleis Ilmar. 1977. Kulumiskindlad pinnakatted ja nende efektiivsus. Kirjastus "Valgus". Tallinn.
10. Timotheus Heiki. 1999. Praktiline keemia. Kirjastus "Avita". Tallinn.
11. Velling Ants, Roosimõlder Lembit. 1982. Materjal ja konstruktsioon. Tallinna Polütehniline Instituut.
12. Gladilin A.N. jt. 1955. Metallide tehnoloogia. Eesti Riiklik Kirjastus, Tallinn.
13. Aršinov V.A., Aleksejev G.A. 1962. Metallide lõikamine. Eesti Riiklik Kirjastus, Tallinn.
14. Lindström Kauko. 2001. Veevarustus ja kanalisatsioonitehnika. "Ehitame" kirjastus, Tallinn