

Autorid:

Priit Kulu
Jakob Kübarsepp
Enn Hendre
Tiit Metusala
Olev Tapupere

Materjalid

Tallinn
2001

SISUKORD

SISSEJUHATUS	4
1. MATERJALIÕPETUS	5
1.1. Materjalide struktuur ja omadused	5
1.1.1. Materjalide aatomstruktuur	5
1.1.2. Materjalide omadused	6
1.2. Metalsed materjalid	14
1.2.1. Rauasüsinikusulamid	14
1.2.2. Alumiinium ja alumiiniumisulamid	30
1.2.3. Vask ja vasesulamid	33
1.2.4. Nikkel ja niklisulamid	35
1.2.5. Titaan ja titaanisulamid	36
1.2.6. Magneesium ja magneesiumisulamid	36
1.2.7. Tsink, plii, tina ja nende sulamid	37
1.2.8. Metallide markeerimine	38
1.3. Mittemetalsed materjalid	40
1.3.1. Tehnoplastid	40
1.3.2. Tehnokraamika	43
1.4. Komposiitmaterjalid	46
1.4.1. Komposiitmaterjalide struktuur ja liigitus	46
1.4.2. Metallkomposiitmaterjalid	47
1.4.3. Plastkomposiitmaterjalid	47
1.4.4. Keraamilised komposiitmaterjalid	48
1.4.5. Süsinikkomposiitmaterjalid	48
2. METALLIDE TEHNOLOOGIA	49
2.1. Metallurgia	49
2.2. Valutehnoloogia	49
2.2.1. Liigitus	49
2.2.2. Metallide valuomadused	50
2.2.3. Valu kordkasutusega vormidesse	51
2.2.4. Valu korduvkasutusega vormidesse	53
2.3. Survetöötlus	54
2.3.1. Liigitus	54
2.3.2. Metallide survetöödeldavus	54
2.3.3. Survetöötlemise mahtvormimisprotsessid	55
2.3.4. Survetöötlemise lehtvormimisprotsessid	57
2.4. Keevitamine, jootmine, termolõikamine ja -pindamine	59
2.4.1. Keevitusprotsesside liigitamine	59
2.4.2. Metallide keevitavus	59
2.4.3. Tähtsamad keevitusmeetodid	60
2.4.4. Jootmine	64
2.4.5. Termolõikamine ja -pindamine	64
2.5. Lõiketöötlemine	65
2.5.1. Lõikeprotsessi üldpõhimõtted	65
2.5.2. Lõikamise põhiprotsessid	66
2.5.3. Mittetraditsioonilised töötlusmeetodid	71
2.6. Pulbermetallurgia	72
2.6.1. Pulbertoodete valmistamine	72
2.6.2. Pulbermaterjalid	73
3. ELEKTRIMATERJALID	74
3.1. Sissejuhatus	74
3.2. Dielektrikud	74
3.2.1. Dielektrikute põhiomadused	74
3.2.2. Isoleermaterjalid ja nende kasutusala	78
3.3. Pooljuhid	83
3.4. Elektrijuhid	84
3.5. Magnetmaterjalid	85

SISSEJUHATUS

Kõik, mis meid ümbritseb, koosneb ainetest. Eestikeelne sõna *materjal* tuleneb ladinakeelsest sõnast *materia*, mis tähendabki ainet.

Materjalid, mis on pärit loodusest endast, on looduslikud materjalid. Inimene kasutab neid, kui vaja, oma huvides, ent ta on loonud väga palju materjale ka ise – selliste omadustega, nagu ühe või teise asja jaoks on tarvis. Tehnikas kasutatavad materjalid – *tehnomaterjalid* – ongi enamikus niisugused materjalid.

Masinate ja aparaatides, mistahes tehno-seadmetes ja -riistades on peamised materjalid metallid, plastid, keraamilised ja komposiitmaterjalid. Nendre liike ja sorte on väga palju. Enam levinumalt kasutatakse näiteks vähemalt 400 sorti terast ja malmi, samapalju värvilismetallide sulameid, üle 200 liigi plaste, 50 keraamilise materjali liiki jne. Elektriliste seadete puhul on tegu elektrimaterjalide, joodiste, pooluhtidega, optikariistade puhul optilise klaasiga jms.

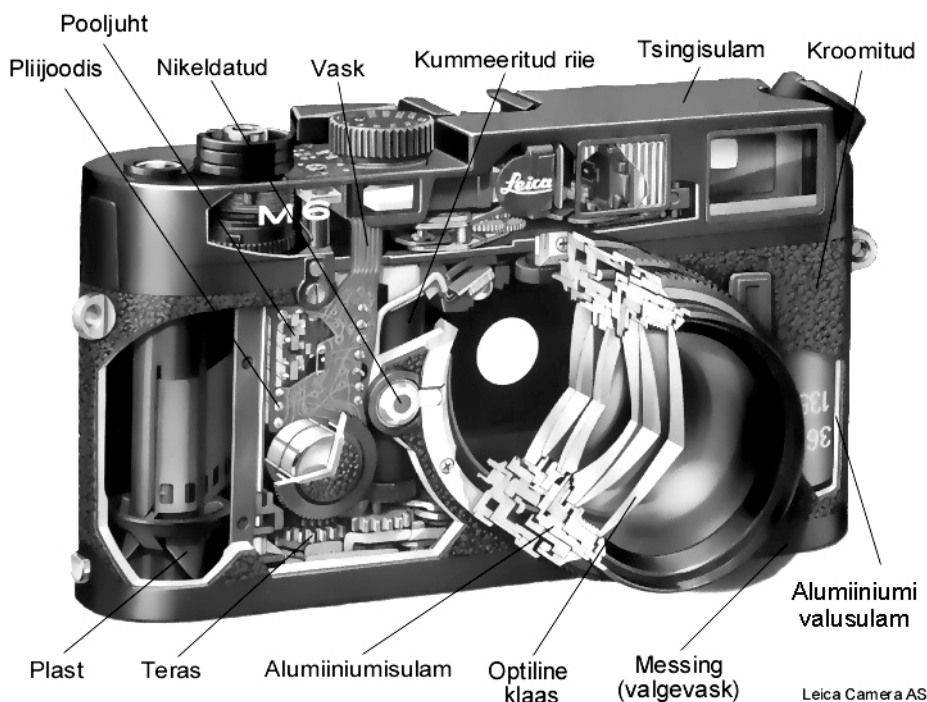
Et tehnikaasjust aru saada, tuleb materjale tunda.

Miks ühe saega saab saagida isegi metalli, aga teine nürineb juba kõva tammepuu saagimisel? Milline terasemark võtta, kui jalgratta esirattale oleks vaja treida uus võll? Kui kõrget temperatuuri kannatab elektrimootori mähise isolatsioon? Mille poolest erineb malm terasest?

Mistahes materjali omadused olenevad kõigepealt tema koostisest, struktuurist ja saamisviisist.

Materjaliõpetus, mis moodustab käesoleva õpperaamatu esimese osa, käsitleb peamiselt seda, missugune on eri materjalide liigitus, nende koostis ja struktuur, kuidas sellest oleneb materjali tugevus ja teised omadused. Teine osa on **metallide tehnoloogia**, milles vaadeldakse metallide ja nende sulamite tootmist, töötlemisviise ja otstarbekat rakendamist. Kolmandas osas on vaatluse all **elektrimaterjalid**.

Raamat "Materjalid" on mõeldud nii õppurile, praktikule kui ka õpetajale, sisaldab rohkesti illustratsioone (seesid) ja ka asjaomast käsiraamatulikku andmestikku, mida eestikeelses kirjanduses pole või on vähe leida.



Tänapäeva automaatfotoaparaat.

See on mehhatrooniline seade, milles on ühitatud mehaanika, elektroonika, optika ja infotehnoloogia ning mis sisaldab palju erisuguseid tehnomaterjale

1. MATERJALIÕPETUS

1.1. Materjalide struktuur ja omadused

1.1.1. Materjalide aatomstruktuur

Kõikide tehnomaterjalide põhiliseks struktuuri-ühikuks on *aatom*, mis koosneb positiivselt laetud tuumast ja seda ümbritsevast elektronkattest. *Aatomituum* koosneb prootonitest ja neutronitest, mille arv võrdub aatomnumbriga (järjenumbriga). *Aatommass* määrab tahke aine e. tahkise tiheduse, elektrijuhtivuse, soojusmahtuvuse, mõjub aga vähe selle tugevusomadustele.

Aatomkristallilise või lihtsalt *kristallilise struktuuri* all mõeldakse aatomite (ioonide) omavahelist paigutust realselt esinevas kristallis. Metallis paiknevad aatomid kindla seaduspärasuse järgi, moodustades korrapärase kristallivõre. Selline aatomite paigutus vastab aatomite omavahelise mõju minimaalsele energiale (aatomite ideaalsele paigutusele).

Kristalliline struktuur

Aatomite paigutust kristallis võib kujutada ruumiliste skeemide abil, nn. võreelementide näol. Võreelementi all tuleb mõista vähimat aatomite kompleksi, mille paljukordne kordumine ruumis jäljendab ruumilist kristallivõret. Võreelementi servade pikkusest ja servadevaheliste nurkadest olenevalt eristatakse mitmeid kristallivõre tüüpe.

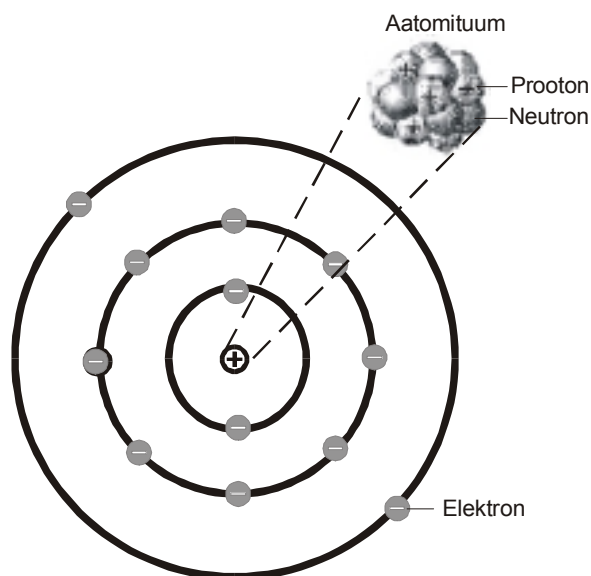
Kristallivõre tüübid

Kristallivõred (võreelementid) võivad olla

- primitiivsed* e. *lihtsad* – aatomid paiknevad ainult võreelementi sõlmpunktides (tippudes);
- ruumkesendatud* – lisaks võreelementi tippudes olevaile aatomeile paikneb üks aatom võreelementi sees;
- tahkkesendatud* – lisaks võreelementi tippudes olevaile aatomeile paiknevad aatomid iga tahu keskel;
- põhitahkkesendatud* – lisaks võreelementi tippudes olevaile aatomeile paiknevad aatomid põhitahkude keskel.

Eri kristallivõre tüüpides võib paikneda enam aatomeid kui neid mahub kristallivõre sõlmpunkti-desse. Enamikul kasutatavatel metallidel on kuubi-line või heksagonaalne kristallivõre:

- ruumkesendatud kuupvõre: Cr_α , Fe_α , Mn_α , Mo , V , W_β ;
- tahkkesendatud kuupvõre: Ag , Al , Cu , Co_β , Cu , Fe_γ , Ni , Pb , Pt , Sn_α ;
- kompaktne heksagonaalvõre: Be_α , Cd , Co_α , Cr_β , Mg , Ti_α , Zn .



Sele 1.1. Aatomi ehitus

Kristallivõret iseloomustavad suurused

- võre periood* – teljesihiline aatomite vaheline kaugus (on vahemikus 0,1...0,7 nm);
- võrebaas* – võreelementi kohta tulevate aatomite arv;
- võre koordinaatsiooni-arv* – võreelementi mis-tahes aatomile lähimal ja võrdsel kaugusel ole-vate aatomite arv (on aluseks ka kristallivõrede tähistamisel: kuupvõre koordinaatsiooni-arvuga 8 - K8, koordinaatsiooni-arvuga 12 - K12 jne.);
- aatomiraadius* (on vahemikus 0,05...3 nm);
- võre kompaktsusaste* – võreelementi kohta tulevate aatomite ruumala suhe võreelementi ruumalasse.

Polümorfism

Mõnedel metallidel on sõltuvalt temperatuurist enam kui üks kristallivõre tüüp. Seda erinevate kristalli-võrede esinemist ühe metalli korral nimetatakse *polümorfismiks*. Tuntumaks näiteks võib tuua raua ja titaani. Raua kristallivõre muutub temperatuuril 911 °C ruumkesendatud kuupvõrest tahkkesen-datuks ja temperatuuril 1392 °C tagasi ruumkesen-datuks.

Metall – mittemetall

Metallid on ained, millel on tahkes olekus iseloomulik läige, hea elektri- ja soojusjuhtivus ning tavaliselt ka hea mehaaniline töödeldavus, suur plastsus ja elastsus. Metallide omadused on seletatavad aatomi tuumaga nõrgalt seotud vabade elektronide (valentsielektronide) olemasoluga nende kristallivõre aatomite välises elektronkihis. Metallid loovutavad kergesti väliskihi elektrone, mis on omakorda mõjutatavad välise elektriväljaga, andes korrapärase elektronide voolu ja hea elektri-juhtivuse. Metallide hulka kuulub keemilistest elementidest 80%, kusjuures kõik metallid peale

elavhõbeda on tavalisel temperatuuril tahked ained (tahkised).

Metallid ja sulamid liigitatakse koostise kahte suurde gruppi - *raud ja rauasulamid* (nende arvele tuleb u. 95% kogu maailma metallitoodangust) ning *mitteraudmetallid ja mitterauasulamid* (tuntud värvilismetallide ja -sulamitena) – need on kõik ülejäänud metallid ja nende sulamid. Teisteks liigituse alusteks on *tihedus* (kerg- ja raskmetallid ning sulamid), *sulamistemperatuur* (kerg- ja rasksulavad metallid ja sulamid), *keemiline aktiivsus* (väärismetallid). Tehakse vahet ka leelis- metallide, leelismuldmetallide, haruldaste ja hajusate, radioaktiivsete jt. metallide vahel.

1.1.2. Materjalide omadused

Materjalide valikul ja nende kasutusalaade määramisel pakuvad eelkõige huvi materjalide omadused, mis on ühelt poolt määratud nende struktuuriga, teiselt poolt nende saamise ja neist detailide valmistamise tehnoloogiaga. Materjalide omadused võib grupeerida füüsikalisteks, mehaanilisteks ja tehnoloogilisteks. Materjali kasutusomadusi iseloomustavad talitlusomadused.

Materjalide füüsikalised omadused

Materjalide olulisemateks füüsikalisteks omadusteks on tihedus ja sulamistemperatuur, mis on ka materjalide, eelkõige metallide liigitamise aluseks.

Tihedus

Erinevad materjaligrupid (metallid, plastid, keraamika) erinevad eelkõige oma tiheduse poolest. Tiheduse ühikuks on mahuühiku mass, kg/m^3 . Plastidel on tihedus $1000 \dots 2000 \text{ kg/m}^3$, keraamikal $1500 \dots 2500 \text{ kg/m}^3$, enamkasutatavatel metallidel piires $1700 \dots 22\,000 \text{ kg/m}^3$. Viimaste puhul eristatakse tihedusest lähtuvalt *kergetalale ja -sulameid*, mille tihedus on üle 5000 kg/m^3 (liitium, berüllium, magneesium, alumiinium, titaan jt.), *rasketalale ja -sulameid*, mille tihedus ületab $10\,000 \text{ kg/m}^3$ (plaatina, volfram, molübdeen, plii, tina jt.) ning *kesketalale ja -sulameid* (tihedus üle 5000 kuid alla $10\,000 \text{ kg/m}^3$). Tehnikas kasutatavaist metallidest kergeimaks on magneesium, raskeimaks aga plaatina.

Tabel 1.1. Elementide keemilised sümbolid ja aatomnumber

Keemiline element	Keemilise elemendi tähis	Aatomnumber e. järjenumber
Metallid (tahked)		
Alumiinium	Al	13
Hõbe	Ag	47
Kaltsium	Ca	20
Koobalt	Co	27
Kroom	Cr	24
Kuld	Au	79
Magneesium	Mg	12
Mangaan	Mn	25
Molübdeen	Mo	42
Nikkel	Ni	28
Plaatina	Pt	78
Plii	Pb	82
Raud	Fe	26
Tina	Sn	50
Titaan	Ti	22
Tsink	Zn	30
Vanaadium	V	23
Vask	Cu	29
Volfram	W	74
Metall (vedel)		
Elavhõbe	Hg	80
Poolmetallid		
Antimon	Sb	51
Arseen	As	53
Mittemetallid (tahked)		
Boor	B	5
Fosfor	P	15
Räni	Si	14
Süsinik	C	6
Väävel	S	10
Mittemetallid (gaasid)		
Argoon	Ar	18
Hapnik	O	8
Heelium	He	2
Kloor	Cl	17
Lämmastik	N	7
Vesinik	H	1

Füüsikalised omadused	Mehaanilised omadused	Tehnoloogilised omadused	Talitlusomadused
Tihedus	Tugevus	Valatavus	Korrosioonikindlus
Sulamistemperatuur	Kõvadus	Survetöödeldavus	Kulumiskindlus
Soojuspaisumine	Sitkus	Lõiketöödeldavus	Pinnaomadused
Soojusjuhtivus	Plastsus	Termotöödeldavus	Tulekindlus
Elektrijuhtivus		Keevitatavus	Soojuspüsivus
Magnetism		Joodetavus	Ohutus
			Keskkonnasõbralikkus

Sulamistemperatuur

Temperatuuri, mil materjal läheb üle tardolekust vedelasse, nimetatakse sulamistemperatuuriks (T_s), vastupidiselt vedelast olekust tardolekusse ülemineku temperatuuri aga tardumis- või kristallisatsioonitemperatuuriks (T_k). Metallid liigitatakse sulamistemperatuuri järgi *kerksulavaiks metallideks ja sulameiks*, mille sulamistemperatuur ei ületa plii oma, s.o. 327 °C (tina, plii, antimon, elavhõbe jt.), *rasksulavaiks metallideks ja sulameiks*, mille sulamistemperatuur ületab raua oma, s.o. 1539 °C (volfram, tantaal, molübdeen, nioobium, kroom, vanaadium, titaan jt.) ja *kesksulavateks metallideks ja sulamiteks* (sulamistemperatuur üle plii, kuid alla raua sulamistemperatuuri).

Plastid jäävad sulamistemperatuuri poolest alla metallidele, mistõttu enamike plastide lubatav töötemperatuur piirdub 100 °C. Keraamika seevastu on aga kõrge sulamistemperatuuriga, mistõttu seda kasutatakse sageli ka kuumuskindlate detailide valmistamiseks.

Soojuspaisumine

Soojendamisel keha mõõtmed muutuvad. Harilikult iseloomustatakse soojuspaisumist *ruumpaisumisteguriga* (vedelikud, gaasid) või *joonpaisumisteguriga* (tahkised). Soojuspaisumist tuleb arvestada vedelike ja gaaside mahutite ja torustike, sildade, raudtee jm. metallkonstruktsioonide korral, temperatuurimuutustest tingitud mõõtmete muutust ka masinaosade korral. Metallide ja sulamite joonpaisumistegur varieerub väga suures vahemikus ja on sulamite korral määratud eelkõige keemilise koostisega.

Soojusjuhtivus

Soojusjuhtivus iseloomustab soojuse kandumist ühest osast teise paigalseisvas aines. Gaaside ja vedelike soojusjuhtivust saab seletada molekulide korrapärase kokkupõrgetega, mille tagajärjel soojusliikumise energia kandub kõrgema temperatuuriga piirkonnast madalama temperatuuriga piirkonda. Tahkistes levib soojusliikumise energia nii omavahel seostatud võresõlmede võnkumise kui ka vabade elektronide vahendusel.

Elektrijuhtivus

Elektrijuhtivus on aine võime juhtida elektrivoolu. See on ainetel, mis sisaldavad vabu laetud osakesi (elektrone või ioone). Elektrivälja mõjul hakkavad need osakesed korrapäraselt liikuma, tekitades elektrivoolu. Metallide hea elektrijuhtivus seletubki peamiselt vabade elektronide olemasoluga. Aine elektrijuhtivuse mõõduks on eritakistuse pöördväärtus ($1/\rho$, mõõtühik $(\Omega \cdot m)^{-1}$, mida nimetatakse *erijuhtivuseks*). Erijuhtivuse järgi liigitatakse kõik ained elektrijuhtideks, pooljuhtideks või dielektrikuteks.

Tabel 1.2. Materjalide tihedus

Metall	ρ , kg/m ³
Plastid	
Polüetüleen	950
Akrüülplast	1100
Bakeliit	1300
Fluorplast	2200
Keraamika	
Tellis	1800
Betoon	2300
Portselan	2400
Klaas	2500
Metallid	
Kergmetallid	
Magneesium	1750
Alumiinium	2700
Titaan	4540
Keskmetailid	
Vanaadium	6100
Kroom	7200
Tsink	7140
Tina	7290
Raud	7870
Nioobium	8600
Nikkel	8880
Vask	8930
Raskmetallid	
Molübdeen	10 200
Hõbe	10 500
Plii	11 340
Elavhõbe	13 550
Kuld	19 320
Volfram	19 400
Plaatina	21 400

Tabel 1.3. Metallide sulamistemperatuur

Metall	T_s , °C
Elavhõbe	-39
Kerksulavad	
Tina	232
Plii	327
Kesksulavad	
Tsink	419
Antimon	631
Magneesium	649
Alumiinium	660
Hõbe	960
Kuld	1064
Vask	1083
Nikkel	1455
Raud	1539
Rasksulavad	
Titaan	1660
Plaatina	1773
Kroom	1875
Vanaadium	1900
Molübdeen	2610
Volfram	3410

Korrosioonikindlus

Korrosiooniks nimetatakse materjali ja keskkonna (õhk, gaasid, vesi, kemikaalid) vahelist reaktsiooni, milles materjal hävib. Metallide korral eristatakse *keemilist korrosiooni*, mida põhjustavad keemilised reaktsioonid metallide ja agressiivsete gaaside või vedelike vahel, ja *elektrokeemilist korrosiooni*, mida põhjustavad elektrokeemilised reaktsioonid (anoodi- ja katoodiprotsessid) metalli ja elektrolüüdi kokkupuutepinnal. Metallide korrosioonist tingitud kahjude korvamiseks kulub umbes 10% metalli aastatoodangust. Korrosioonikindlamad on keraamilised materjalid ja plastid.

Kulumiskindlus

Kulumine on protsess, mis toimub pindade hõõrdumisel, mille tagajärjel pinnalt eraldub materjali ja/või suureneb keha jääkdeformatsioon. Seega muutuvad kulumisel pidevalt detailide mõõtmed, suureneb detailide viskumine ja müra, tekib klappimine ning masinat pole võimalik edasi kasutada. Kasutamise seisukohalt on kulumine kahjulik nähtus, mida püütakse vähendada kulumiskindlate materjalide, pinnete või sobivate määrdeainete kasutamisega või muul viisil.

Materjalide mehaanilised omadused

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

Tugevus on materjali võime purunemata taluda koormust, ebaühtlast temperatuuri vm. Metallide tugevusnäitajateks on voolavuspiir, tugevuspiir jt. Eristatakse konstruktsioonitugevust, staatilist, dünaamilist ja kestustugevust.

Kõvadus on materjali võime vastu panna kohalikule plastsele deformatsioonile. Tuntumad kõvadusteimid (Brinelli, Rockwelli ja Vickersi meetod) põhinevad kõvast materjalist otsaku (indentori) surumisel uuritava materjali pinda.

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

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

Sõltuvalt tööolukorrast (koormamise viisist) eristatakse staatilisel, dünaamilisel ja tsüklilisel koormamisel määratavaid mehaanilisi omadusi.

Põhilisteks staatilise katsetamise moodusteks on tõmbeteim, surveteim, paindeteim, väändeteim ja kõvadusteim. Metallide puhul on painde- ja väändeteim harva kasutatavad, mistõttu eelkõige tõmbeteimil (malmi korral ka surveteimil) määratavad mehaanilised omadused on metallide valiku ja tugevusarvutuse aluseks.

Lähtudes sellest, kas katsetatavast materjalist katsekeha (teimik) või sellest valmistatud detail purustatakse või katsetamise käigus materjali või

sellest detaili oluliselt ei kahjustata, eristatakse purustavaid ja mittepurustavaid katseid (teime).

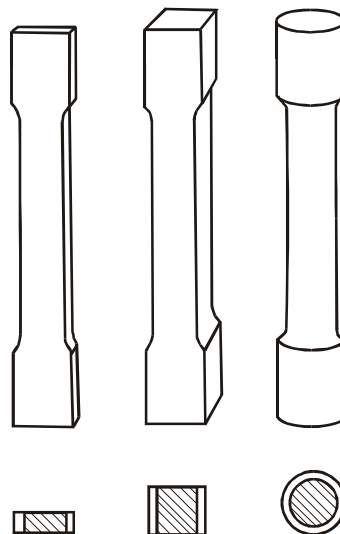
Purustavad katsed (teimid)

Materjalide purustava katse tagajärjel purustatakse detail või selle materjalist valmistatud (valatud, pressitud, lõiketöödeldud) spetsiaalsed katsekehad – *teimikud*. Metalsete materjalide korral on põhilisteks katsetusviisideks tõmbeteim (teras jt. plastsed metallid), surve- ja paindeteim (malm, kõvasulam jt. haprad metallid) löökpaindeteim, vahel ka väändeteim. Plastide korral kasutatakse tõmbeteimi, läbipaindetemperatuuri teimi, surveteimi, roometeimi ja löökpaindeteimi. Siinjuures erinevad teimitingimused metallide ja plastide korral.

Käsiraamatuis esitatavad andmed materjalide mehaaniliste omaduste kohta on põhiliselt määratud tõmbeteimi tulemuste põhjal.

Tõmbeteim

Vastavalt standardile EVS-EN 10002-1 (Metallmaterjalid. Tõmbeteim) määratakse tõmbeteimiga materjali tugevus- ja plastsusnäitajad.



Sele 1.2. Tõmbeteimikute kuju

Katsetamisel tõmbele määratakse *tugevusnäitajatest*:

a) *tõmbetugevus* R_m , see on maksimaaljõule F_m vastav mehaaniline pinge (sele 1.3)

$$R_m = F_m / S_0,$$

kus F_m - maksimaaljõud,

S_0 - teimiku algristlõikepindala.

b) *voolavuspiir* R_{eH} (ülemine) ja R_{eL} (alumine) – sele 1.3:

R_{eH} - pinge väärtus, mille saavutamisel

esmakordselt täheldatakse jõu vähenemist,

R_{eL} - pinge madalaim väärtus plastsel voolamisel.

c) tinglik voolavuspiir R_p – pinge, mille juures jääkpikenemine saavutab etteantud väärtuse protsentides, näiteks 0,2% – tähis $R_{p0,2}$.

Tugevusnäitajate põhidimensioon on N/m^2 , tavaliselt kasutatakse N/mm^2 (MPa).

Plastsusnäitajatest määratakse katsetamisel tõmbele (sele 1.4):

a) katkevenivus A%

$$A = \left(\frac{L - L_0}{L_0} \right) 100,$$

kus L_0 – teimiku algmõõtepikkus,

L – teimiku lõppmõõtepikkus pärast purunemist;

b) katkeahenemine Z%

$$Z = \left(\frac{S_0 - S}{S_0} \right) 100,$$

kus S_0 – teimiku algriistlõikepindala,

S – teimiku minimaalne ristlõikepindala katkemiskohas.

Kuna tõmbeteimil koormamise käigus teimiku ristlõige väheneb, siis sel teel saadud voolavuspiiri R_p , eriti aga tugevuspiiri R_m väärtused ei kajasta tegelikke pingeid. Tegelikud pinged erinevad seda enam, mida plastsem on materjal. Kui habraste materjalide korral võib R_m väärtusi vaadelda materjali tugevuse näitajana (katkeahenemine Z on väike), siis plastsete materjalide korral võib tugevuspiiri R_m käsitleda kui vastupanu märgatavale plastsele deformatsioonile.

Löökpaindeteim

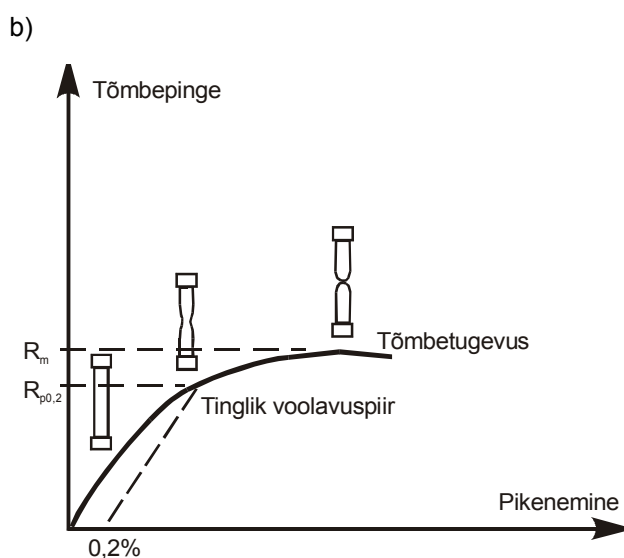
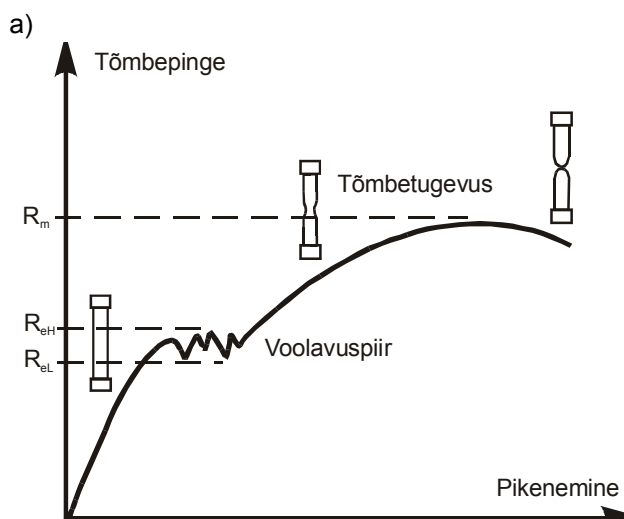
Katsetamine löökpaindele on materjali sitkusnäitajate määramise põhiline meetod.

Katsetamine löökpaindele võimaldab otsustada selle üle, kas materjalil on kalduvus haprale purunemisele. Katsetamine löökpaindele seisneb keskest soonitud ja mõlemast otsast toetatud teimiku purustamises löökpendliga, määrates töö, mis kulub teimiku purustamiseks. Löögitugevuse (löögisitkuse) näitajaks on purustamiseks kulunud töö džaulides (J).

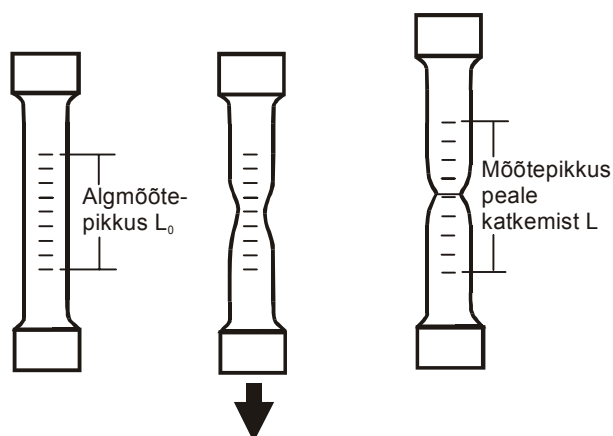
Vastavalt standardile EVS 10045-1 (Metallmaterjalid. Löökpaindeteim Charpy meetodil) kasutatakse löökpaindeteimil kahe soonekujuga teimikuid:

- V-kujuline soon profiilinurgaga 45°, sügavus 2 mm, soone ümardusraadius 0,25 mm,
- U-kujuline soon, sügavus 5 mm, soone põhja ümardusraadius 1 mm.

Katsetamine löökpaindele toimub löökpendliga. Pendli teele asetatakse teimik. Katsetamisel tõstetakse pendel ülemisse asendisse. Kui pendel vabastatakse, langeb ta alla ja purustab teimiku. Selleks kulutab osa pendli energiast.



Sele 1.3. Tõmbediagrammid. a – plastne materjal, b - habras materjal



Sele 1.4. Katkevenivuse määramine

Kulutatud energiat (teimiku purustamiseks kulutatud töö – *purustustööd*) tähistatakse järgmiselt:

- KU on kulutatud töö U-soonega teimiku,
- KV on sama V-soonega teimiku puhul.

Nii näiteks KV = 27 J tähendab standardse V-soonega teimiku purustustööd löökpendli löögienergia 300 J korral. Teistsuguse löögienergiaga löökpendli korral lisatakse tähisele KU või KV pendli löögienergiat näitav arv, standardsest erineva (kitsama) V-soonega teimiku korral ka selle laius.

Plastsete materjalide puhul on eriti ohtlik habras purunemine. Üldjuhul algab see märkamatu pingetel, mis on tunduvalt madalamad mitte ainult tugevuspiirist, vaid ka voolavuspiirist ja kulgeb suure kiirusega, olles paljude avariide põhjuseks. Materjali vastupanu haprale purunemisele on üks põhilisi konstruktsiooni töökindluse näitajaid. Materjali üleminek plastsest olekust haprale sõltub paljudest mõjuritest: ühelt poolt sulamist endast (kristallivõre tüüp, keemiline koostis, tera suurus, lisandid jt.); teiselt poolt konstruktsiooni iseärasustest ja töötingimustest (pingekontsentratsioonide olemasolu, töötemperatuur jt.).

Katsetamine löökpaindele on üks tundlikumaid katsetamise viise. Kui materjal peab töötama madalatel temperatuuridel, siis katsetatakse ka madalatel temperatuuridel. Seda tingib asjaolu, et mõningate materjalide sitkus väheneb temperatuuri langes järele. Materjali hapruse suurenemist (sitkuse vähenemist) madalatel temperatuuridel nimetatakse *külmahapruseks*.

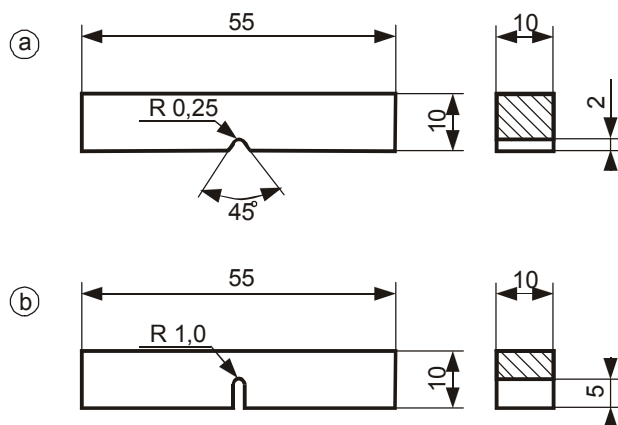
Enamik konstruktsioonimaterjale (teraseid) kalduvad hapralt purunemisele temperatuuri langes. Hapra purunemise temperatuur *külmahaprusläävi* T_{KHL} on materjali üheks olulisemaks tugevuse kriteeriumiks. Enamiku hapralt purunemisele kalduvate teraste korral toimub üleminek sitkelt purunemiselt hapralt temperatuurivahemikus $+20...-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (sele 1.7).

Väsimusteim

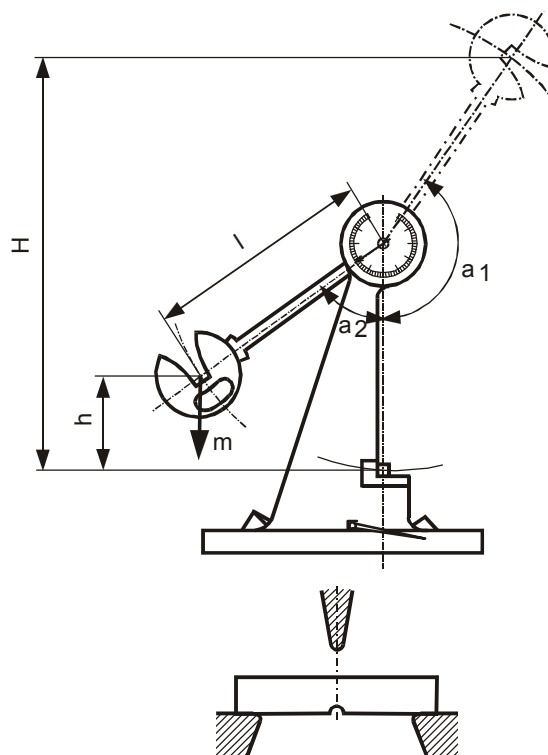
Tegelikkuses esinevad sagedamini vahelduvkorduvad (tsüklilised) koormused, mille tagajärjel tekivad märki muutvad pinged (surve-tõmbepinged), mis põhjustab pragude teket.

Tabel 1.4. Metalli tõmbeteimiga määratavad omadused

	Tähis	Ühik
Tugevusnäitajad		
Voolavuspiir		
- alumine	R_{eL}	N/mm^2
- ülemine	R_{eH}	N/mm^2
- tinglik	$R_{p0.2}$	N/mm^2
Tugevuspiir	R_m	N/mm^2
Plastsusnäitajad		
- katkevenivus	A	%
- katkeahenemine	Z	%



Sele 1.5. Löökpaindeteimikute kuju



Sele 1.6. Löökpendli skeem

Tsüklilisel koormusel tekib ja areneb pragu ka pingetel, mis on allpool materjali tugevuspiiri, sageli isegi allpool voolavuspiiri. Seda protsessi, mis lõpeb purunemisega, nimetatakse *väsimuseks*.

Väsimustugevust iseloomustab *väsimuspiir* σ_R (sümmeetrilise koormuse korral σ_{-1}). Väsimuspiir σ_{-1} on suurim pinge, mida metall purunemata talub N korda (terasel võetakse selleks arvaks 10^7 , mitte-ruusulamil 10^6).

Väsimusteimi tehakse erimasinaga, kus pöörlevat teimikut koormatakse paindekoormusega. Nii tekib pöörlev paine ja sellest muutlik-korduvad pinged (sele 1.8; teimik kinnitatakse masinasse ühest või mõlemast otsast). Koormata võib ka tõmbe-survekoormusega või korduva väände-koormusega.

Metalli väsimuse põhjuseks on pingete kogunemine kohtades, kus detailis on astmed, sooned, keerved jms. või defektid (gaasitühikud, mikropraod). Sellised kohad on *pingekontsentratsioonid*.

Väsimuspurunemise murdepinnal on iseloomulik reljeef – kaks teravalt piiritletud ala: üks on väsimusala, mille pind on plastselt deformeerunud ja sile, ning teine staatilise purunemise ala, mis harilikult on kiuline või kare.

Mittepurustavad katsed

Metalltoodete mittepurustava kontrolli (MPK) meetodite ülesanneteks on

- 1) defektide avastamine toodete pinnal või nende sisemuses (poorid, praod, räbulisandid jms.);
- 2) materjalide keemilise koostise ja struktuuri määramine;
- 3) füüsikaliste ja mehaaniliste omaduste mõõtmine (soojus- ja elektrijuhtivus, kõvadus jt.);
- 4) tehnoloogiliste protsesside pidev kontroll (toote pikkus, paksus, pinnakvaliteet jt.)

Mittepurustavad kontrollimeetodid võib jagada mitmesse rühma, millest põhilised on

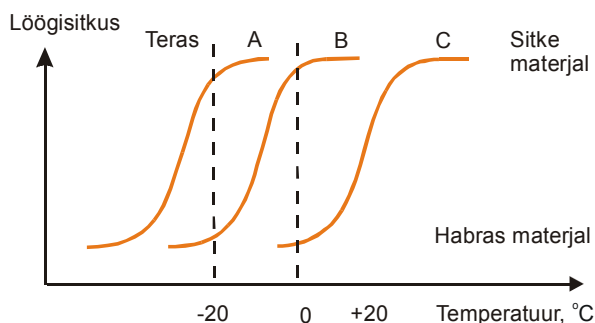
- kõvaduse määramise meetodid,
- radiograafiameetodid,
- ultrahelimeetodid,
- magnetmeetodid,
- kapillaarmedetodid,
- elektrilised meetodid.

Nendele lisanduvad meetodite kombinatsioonid või võtted purustavate meetodite hulgast, näiteks reservuaaride hermeetilisuse kontrollimine suruvedeliku või -gaasiga.

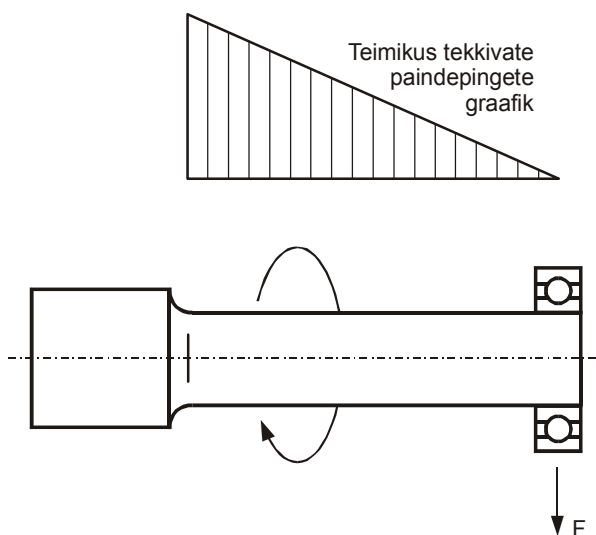
Mittepurustavate meetodite hulka kuulub ka visuaalne vaatlus ja mikroanalüüs.

Kõvaduskatsed

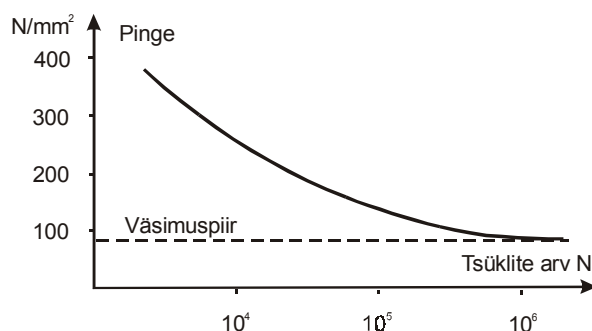
Enamlevinud mooduseks on kõvaduse mõõtmine otsaku sissusurumise teel. Otsaku küllalt suure jõuga sissesurumise tagajärjel deformeeritakse materjali pinnakihti plastselt. Peale koormuse kõrvaldamist jääb materjali pinnale jälg. Mida väiksem on kõvadus, seda sügavamale tungib otsak ja seda suurem on jälg.



Sele 1.7. Löögisitkuse sõltuvus temperatuurist



Sele 1.8. Väsimusteimi skeem pöörleva painde korral



Sele 1.9. Väsimuskõver

Kõvaduse määramine Brinelli meetodil

Kõvaduse määramisel Brinelli meetodil surutakse katsetavas materjali karastatud teraskuul läbimõõduga (D) kuni 10 mm ja jõuga (F) kuni 29400 N (e. 3000 jõukilogrammi – kgf). Brinelli kõvadusarv määratakse kuulile toimiva jõu ja sfäärilise jälje pindala suhtena.

Brinelli kõvadust tähistatakse tähtedega HB: katsetingimuste D = 10 mm, F = 3000 kgf, t = 10...15 s korral näiteks 185HB. Ühik on kgf/mm², mida ei märgita.

Teiste katsetingimuste korral tuuakse tähise HB järel katsetamise tingimused järgmiselt: kuuli läbimõõt, koormus ja koormamise kestus, näiteks 185HB 5/750/20, mis tähendab, et Brinelli kõvadus on 185 kgf/mm², määratud kuuliga D = 5 mm koormusel 750 kgf ja kestusel 20 s.

Kõvaduse määramine Rockwelli meetodil

Kõvadus Rockwelli meetodil määratakse sissesurumise jälje sügavuse järgi: teraskuul läbimõõduga 1,6 mm ja jõud 980 N (100 kgf) – skaala B; teemantkoonus tipunurgaga 120° ja jõuga 580 N (60 kgf) või kõvasulamkoonus jõuga 1470 N (150

kgf) – vastavalt skaalad A ja C. Kõvadust iseloomustab kuuli või koonuse materjalis sisestungimise sügavus.

Kõvadusarvu, mis on ühikuta suurus, näitab osuti näituri skaalal katse lõpul. Koonuse kasutamisel loetakse kõvadusarv näituri mustalt skaalalt (A- ja C-skaala), kuuli puhul punaselt skaalalt (B-skaala).

Kõvaduse määramine Vickersi meetodil

Vickersi meetod põhineb teemantpüramiidi sisse surumisel materjali. See meetod võimaldab määrata igasuguse kõvadusega metallide ja sulamite kõvadust ning sobib õhukese metalli kõvaduse määramiseks. Materjali sisse surutakse neljatahuline püramiid tahkudevahelise nurgaga 136° , jõuga 9,8...980 N (1...100 kgf). Vickersi kõvadusarv määratakse püramiidile toimiva jõu ja jälje pindala suhtena.

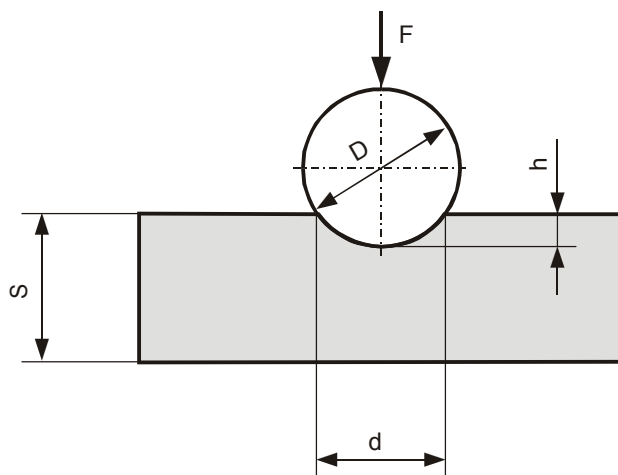
Vickersi kõvadust tähistatakse katsetingimuste $F = 30$ kgf, koormamise kestuse 10...15 s korral näiteks: 500HV. Teistel koormustel ja kestustel tuuakse peale tähist HV katsetingimused: koormus ja koormamise kestus; näiteks 220HV 10/40, s.o. Vickersi kõvadusarv 220, mis on määratud koormusel $F = 10$ kgf ja kestusel 40 s. Ühikuks on kgf/mm^2 , mida ei märgita.

Sõltuvalt materjali paksusest ja kõvadusest kasutatakse erinevaid koormusi:

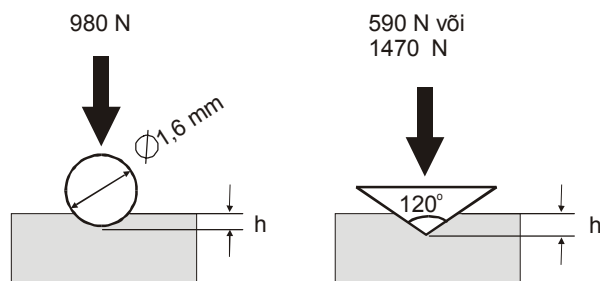
- terase ja malmi korral
 $F = 49...980$ N (5...100 kgf),
- vase ja vasesulamite korral
 $F = 24,5...49$ N (2,5...50 kgf),
- alumiiniumi ja alumiiniumisulamite korral
 $F = 9,8...980$ N (1...100 kgf).

Tabel 1.5. Metallide kõvaduse määramise meetodid

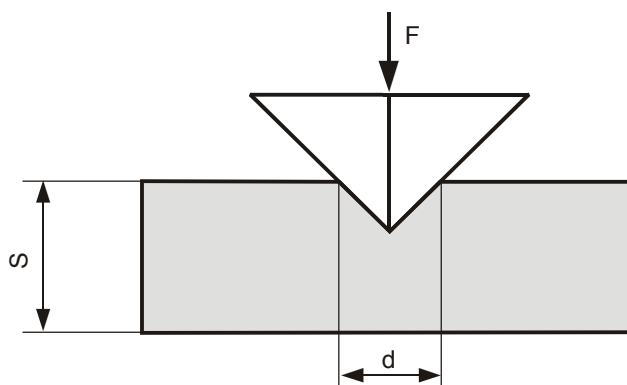
Kõvadus	Tähistus	Otsaku kuju	Jõud, N	Mõõdetava materjali grupp
Brinell	HB	Kuul	29400	Pehme materjal (süsinikteras, pulbermaterjal)
Rockwell A	HRA	Koonus	590	Kõva materjal (kõvasulam)
Rockwell B	HRB	Kuul	980	Pehme materjal (süsinikteras)
Rockwell C	HRC	Koonus	1470	Kõva materjal (karastatud teras)
Vickers	HV	Püramiid	290	Pehme ja kõva materjal (alumiinium, vask, teras, kõvasulam)



Sele 1.10. Brinelli kõvaduse määramise skeem



Sele 1.11. Rockwelli kõvaduse määramise skeem



Sele 1.12. Vickersi kõvaduse määramise skeem

Mittepurustav kontroll (MPK)

Radiograafiakatse

Radiograafiameetod seisneb kontrollitava eseme kiiritamisel röntgeni- (lainepikkus alla 10 nm), või gammakiirtega (lainepikkus ~0,1 nm). Materjalis või tootes defektide määramine põhineb kiirguse neeldumise erinevusel kontrollitavas kehas ja see fikseeritakse röntgenfilmil. Radiograafiameetodeid kasutatakse peamiselt keevisõmbluste kontrollimisel.

Ultrahelikatse

Ultrahelimeetod põhineb 2...4 MHz sagedusega ultraheli kasutusel (ultraheliks loetakse akustilisi mitteelektromagnetilisi laineid sagedusega üle 20 kHz). Erinevalt röntgeni- ja gammakiirgusest, mis neeldub metallis paksusega juba mõni detsimeeter, levib ultraheli hästi ka mitme meetri paksuses metallis.

Ultraheli nõrgendavad aga poorid, praod, mittemetalsed lisandid jms. Seetõttu on ultraheli- ja radiograafiakatse skeem sama. Ultraheliallikas ja vastuvõtja paigutatakse kontrollitavale pinnale, et vältida õhupilude nõrgendavat mõju. Ultraheliga kontrollitakse peamiselt pakse elektriräbukevis-õmblusi.

Magnetpulberkatse

Magnetmeetod põhineb magnetvälja hajumisel metallis asuvate tühikute või mittemetallsete lisandite toimel. Meetodiga saab kontrollida ainult ferromagnetilisi materjale (näiteks ei saa kontrollida roostevaba kroomnikkelterast). Meetod võimaldab avastada defekte, mis asuvad kuni 6 mm sügavusel ja on magnetvälja suunaga risti.

Kasutatakse magnetmeetodi kahte varianti: kuiva ja märga. Esimesel juhul puistatakse kontrollitavale pinnale defektide avastamiseks ühtlaselt peent raudoksiidi, teisel juhul kasutatakse kuiva magnetpulbri asemel suspensiooni e. heljumit (vedelikuks sobib trafoõli või petrooleum). Suspensioon tõstab meetodi tundlikkust, kuna on välditud pulbri ja pinna vaheline hõõrdumine.

Kapillaarkatse

Kapillaarmetod põhineb vedeliku võimel imbuda kapillaarjõudude toimel materjali defektidesse. See on vanemaid ja lihtsamaid MPK meetodeid, mis lubab leida kuni 1 µm läbimõõduga poore või pragusid. Selleks kaetakse metalli üks pool kriitvärvi; peale värvi kuivamist niisutatakse teist poolt petrooleumiga. Kui metallis on läbivaid poore, siis tekib värvitud küljele rasvapekk. Sisemisi isoleeritud defekte selle meetodiga avastada ei saa. Samas on meetod väga tundlik.

Pöörisvoolukatse

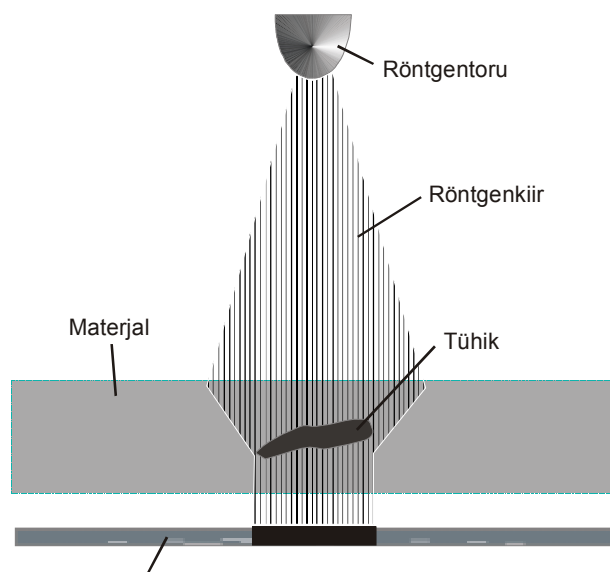
Pöörisvoolumeetod põhineb eset läbiva elektrivoolu toimel tekkiva pöörisvoolu mõõtmisel. Elektrilised parameetrid sõltuvad metallist. Näiteks elektritakistus on metalli koostisest, metalli temperatuur pöörisvoolu suurusest, tühikutest jne. Kõik elektrilised kontrollimeetodid on suhteliselt kergesti teostatavad, neid saab hõlpsalt korrata ja automatiseerida, kuid samal ajal on raske elektrilisi suurusi (vool, pinget, takistus jm.) üle viia defekte iseloomustavatesse mõõtühikutesse. Seetõttu on elektriliste kontrollimeetodite puhul peamiseks raskuseks elektrimõõteriistade gradueerimine.

Mittepurustava kontrolli edukus sõltub esma-joones sellest, kas meetod vastab kontrollitavale

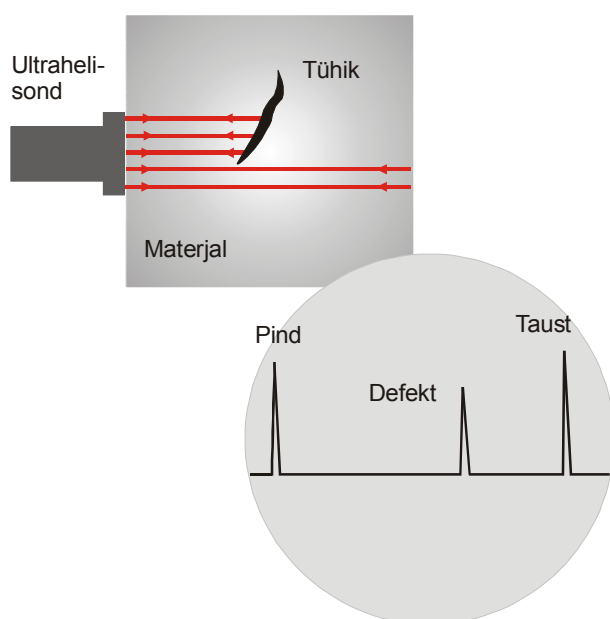
defektile (tabel 1.7). Peale õige kontrollimeetodi valikut tuleb tema kvantitatiivseks hindamiseks leida seos mõõteriista näidu ja toote kvaliteedi ning töökindluse vahel.

Tabel 1.6. Mittepurustavate kontrollimeetodite tundlikkus

Kontrollimeetod	Prao minimaalne mõõt mm		
	Laius	Sügavus	Pikkus
Röntgenkatse	-	2	-
Gammakatse	-	5	-
Ultrahelikatse	0,002	0,1	-
Magnetpulberkatse	0,02	0,02	0,3
Kapillaarkatse	0,001	0,02	0,1



Sele 1.13. Radiograafiakatse

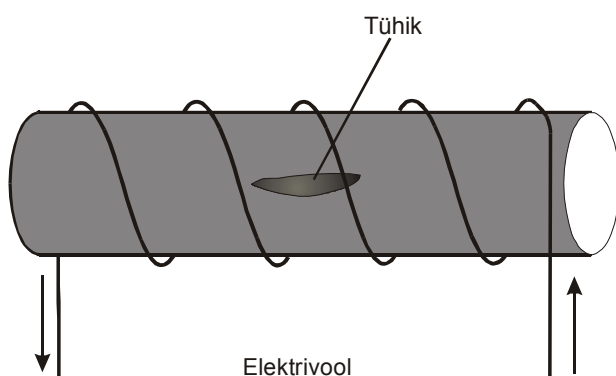


Sele 1.14. Ultrahelikatse

Tabel 1.7. Soovitused mittepurustavate kontrollimeetodite kasutamiseks

Defekt	Kontrollimeetod			
	Röntgen- katse	Ultraheli- katse	Magnet- katse	Kapillaar- katse
Keevitamisel ja jootmisel: - läbi- keevitamatus	+-	++	-	-
- praod	++	++	++	++
Termo- töötlemisel: - karastus- praod	+-	++	++	++
- struktuuri- defektid	-	-	-	-
Valamisel: - pinnapraod	++	++	++	-
- likvatsioon	++	++	-	-
Lõikamisel: - lihvimispraod	-	+-	++	++
- sisselõiked	++	-	-	-

+ võimalik, - võimatu, ++ väga efektiivne



Sele 1.15. Magnetpulberkatse

1.2. Metallsed materjalid

1.2.1. Rauasüsinikusulamid

Teras

Lisandid terases

Raud on metallidest tähtsaim, kuid puhtal kujul kasutatakse teda vähe. Põhilised tehnomaterjalid valmistatakse rauasulamitest. Nende kasutusala on umbes kümme korda laiem kui teistel metallidel ja nende sulamitel. Suurem osa rauasulamitest on süsinikku sisaldavad sulamid – *rauasüsinikusulamid*, mis jagunevad järgmiselt:

- terased, mille süsinikusisaldus on kuni 2,14%;
- malmid, mille süsinikusisaldus on üle 2,14% (tavaliselt kuni 4%).

Peale süsiniku on terastes ja malmides alati teisi lisandeid, mis on jäänud sulameisse nende

saamise käigus – need on *tavalisandid*, ja spetsiaalselt lisatud – need on *legeerivad elemendid*. Nii sisaldab süsinikteras tavalisandina mangaani, räni, fosforit, väävli. Nende mõju võib olla märkimisväärne, kuigi süsinikteraste omadused on määratud eelkõige nende süsinikusisaldusega.

Omaette lisandite rühma moodustavad sellised elemendid nagu hapnik, vesinik ja lämmastik, mis satuvad teraste koostisse vähesel määral teraste tootmisel sõltuvalt kasutatud toormest ja valmistamismeetodist – need on *juhulisandid*. Nende lisandite üsnagi suurt mõju võetakse terase tootmisel arvesse.

Teraste ja malmide kõrval on leidnud tehnikas kasutust mitmed sellised rauasulamid, mis ei sisalda süsinikku. Ühtkokku valmistatakse tööstusele tohtul hulgal erinevaid rauasulameid - üle 10 000 eri sordi. Raua ja rauasulamite tähtsus ei põhine mitte ainult nende rohkelt kasutusel ja nende omaduste mitmekesisusel, vaid ka nende suhteliselt madalal hinnal. Sulatamise ja erinevate töötlemismeetodite abil saavutatakse üha erinevamaid omaduste kombinatsioone. Selle teeb võimalikuks eelkõige raua polümorfism.

Süsinik

C-sisalduse suurenedes kasvab terase kõvadus, tõmbetugevus ja voolavuspiir ning vastupanu väsimuspurunemisele; vähenevad aga plastsus- ning sitkuse näitajad.

Süsinik avaldab mõju ka terase külmahaprusläävele, soodustades terase haprumist madalatel temperatuuridel.

C-sisalduse suurenemisega kaasneb terase tiheduse vähenemine (puhta raua korral on see 7840 kg/m³, 1,5% C-sisaldusega terase korral 7640 kg/m³), kasvab eritakistus, vähenevad soojusjuhtivus ja mõned magnetiliste omaduste näitajad.

Tavalisandid

Räni ja mangaan. Tavalisandina räni sisaldus süsinikterases ei ületa 0,5%, mangaani sisaldus 1,0%. Lisandid viiakse terasesse selle desoksüdeerimise käigus; ühinedes terases oleva hapnikuga lähevad nad räbasse. Lahustudes rauas parandavad nad terase omadusi.

Räni lahustununa rauas tõstab terase voolavuspiiri, mis aga halvendab terase külmdeformeeritavust (stantsimisel, tõmbamisel). Seetõttu kasutatakse deformeermise teel valmistatavate detailide puhul väikese ränisisaldusega teraseid.

Mangaan tõstab märgatavalt terase tugevust, alandamata seejuures plastsust, ning samal ajal vähendab väävlisisaldusest tingitud kahjulikku mõju.

Malmidele on peale suurema süsinikusisalduse omane ka suur ränisisaldus (1...3%). Räni peamine mõju on selles, et koos süsinikuga soodustab ta grafiidi eraldumist.

Väävel ja fosfor. Väävel ja fosfor on terases kahjulikeks lisandiks. Rauaga moodustab väävel keemilise ühendi – raudsulfidi FeS, mis tardolekus praktiliselt rauas ei lahustu, kuid lahustub vedelmetallis. Keemiline ühend FeS moodustab rauaga

kerksulava eutektikumi, mis terase kuumtötluse temperatuuril (1000...1200 °C) sulab, muutes terase hapraks teradevaheliste sidemete nõrgenemise tõttu. Seda nähtust nimetatakse *punahapruseks* e. *kuumhapruseks*.

Mangaani olemasolu terases soodustab väävliga rasksulava ühendi MnS teket, millega on peaaegu välistatud punahaprumise võimalus.

Väävel vähendab terase löögisitkust, plastisust ja ka väsimustugevust.

Fosfor tõstab terase tugevus- ja voolavuspiiri, kuid vähendab plastisust ja sitkust ning halvendab keevitavust ja korrosioonikindlust. Sitkuse vähenemine on seda märgatavam, mida suurem on terase C-sisaldus. Fosfori eraldumine põhjustab terase haprumist toatemperatuuril. Seda nähtust nimetatakse *külmahapruseks*.

Väävli- ja fosforisisaldus terases on rangelt piiratud – sõltuvalt terase kvaliteedist ei ületa see 0,06%. Malmid sisaldavad võrreldes terastega rohkem fosforit (0,1...0,2%), mis parandab malmide valuomadusi, eelkõige vedelvoolavust.

Tabel 1.8. Tavalisandid terastes

Lisand	Sisaldus %, kuni	Mõju terases
Si	0,5	Viiakse terasesse valmistusprotsessis desoksüdeerijana
Mn	1,65	Viiakse terasesse valmistusprotsessis desoksüdeerijana
P	0,05	Kahjulik lisand. Põhjustab terase külmahaprust
S	0,05	Kahjulik lisand. Põhjustab terase punahaprust

Lämmastik, hapnik ja vesinik. Need lisandid esinevad terases mittemetalsete ühenditena (näiteks oksiididena FeO, Fe₂O, MnO, SiO₂, Al₂O₃ jt.), tardlahustena või vabas olekus (kahanemistühikutes, pragudes jm.). Mittemetalsed lisandid määravad terase nn. metallurgilise kvaliteedi, tõstavad terase mehaaniliste omaduste (plastsus ja sitkus) anisotroopsust, kuid olles pingekontsentraatoreiks, alandavad nad väsimustugevust ja purunemissitkust.

Eriti kahjulikuks lisandiks on terases lahustunud vesinik. See muudab terase hapraks. Lisaks haprusele soodustab vesinik terase valtsimisel ja sepiistamisel mikropragude teket. Keevitamisel mõjub vesinik kaasa pragude tekkimisele põhi- ja keevismetallis. Pinnakihi rikastamine vesinikuga (näiteks galvaan-pindamisel) soodustab samuti terase haprumist; eriti ohtlik on see terase töötamisel kontaktis vesinikuga kõrgetel rõhkudel. Sellist nähtust tuntakse *vesinikhapruse*na.

Legeerivad elemendid

Peale süsiniku viiakse terastes vajalike omaduste saamiseks mitmesuguseid spetsiaalseid lisandeid – *legeerivaid elemente* - Cr, Ni, W, V, Mo, Co jt., sealhulgas ka Mn ja Si, kui nende sisaldus ületab

tavalisandina terasesse viidu oma (s.o. Mn korral 1,65% ja Si korral üle 0,5%).

Legeerivate elementide mõju terastes avaldub eelkõige järgmises:

- nad mõjutavad raua polümorfsete muutuste ning eutektoidmuutuse temperatuure ja eutektoidi süsinikusisaldust terastes,
- nad tõstavad ferriidi ja sellega terase tugevust,
- nad avaldavad mõju muutustele terase termotötlusel (austeniiditera kasvule, austeniidi lagunemisele ja läbikarastuvusele).

Teraste liigitus

Kooskõlas eurostandardiga EN 10020 liigitatakse terased kahte suurde gruppi:

- 1) *mittelegeerterased* (tuntud ka süsinik-terastena),
- 2) *legeerterased*.

Terase legeerituse määrab lisandite sisaldus. Kui see on tabelis 1.9 toodud piirnormidest allpool, siis on tegemist mittelegeerterasega, kui kõrgem, siis legeerterasega.

Mittelegeerterased jagunevad alagruppidesse eelkõige kahjulike lisandite (P, S) sisalduse järgi:

- a) *tavakvaliteetterased* e. *tavaterased*,
- b) *mittelegeerkvaliteetterased*,
- c) *mittelegeervääristerased*

Legeerterased jagunevad samade tunnuste järgi kahte gruppi:

- a) *legeerkvaliteetterased*,
- b) *legeervääristerased*.

Legeerteraste kasutusala on samad mis mittelegeerterastel, kuid legeerterased erinevad valmistusviisi ja elementide sisalduse poolest. Legeerkvaliteetteraste hulka kuuluvad keevitavad konstruktsiooniterased, surveotstarbelised terased, eriterased (magnetterased) jt. Legeervääristeraste gruppi kuuluvad roostevabad, kuumuspüsivad ja -kindlad terased, kuullaagri-, tööriista- ning eriomadustega terased.

Kasutusotstarbe järgi liigitatakse nii mittelegeer- kui ka legeerterased kolme suurde gruppi: *konstruktsiooniterased*, *tööriistaterased* ja *eriomadustega terased* (roostevabad jt.).

Konstruktsiooniterased

Konstruktsiooniteraste all mõeldakse eelkõige masina- ja aparaadiosade ning metalltarindite valmistamiseks kasutatavaid teraseid. Keemiliselt koostiselt jagunevad konstruktsiooniterased nagu terased üldiselt mittelegeer- ja legeerterasteks. Süsinikkonstruktsiooniterased sisaldavad harilikult kuni 0,6% süsinikku ja need liigitatakse omakorda tava- ja kvaliteetsüsinikkonstruktsiooniterasteks. Esimesi kasutatakse profiilmetallina eelkõige metallkonstruktsioonide korral, millelt ei nõuta suurt tugevust (tõmbetugevus kuni 600 N/mm²) ega eriomadusi. Kvaliteetsüsinikkonstruktsiooniteraseid kasutatakse peamiselt masina- ja aparaadiehituses, kui on täpsemalt piiritletud nõuded keemilise koostise ja paremate mehaaniliste omaduste suhtes. Sellised terased tavaliselt termotöödeldakse.

Legeerkonstruktsiooniteraseid kasutatakse vastutusriskaste ja raskkoormatud detailide korral. Nende teraste tõmbetugevus termotöödeldult ulatub kuni 2000 N/mm².

Tabel 1.9. Legeerivad elemendid terastes

Element	Sisaldus %, üle	Mõju terastes
Si	0,5	Tõstab voolavuspiiri, halvendades plastust. Trafoterastes kuni 4%
Mn	1,8	Tõstab terase tugevust ja kõvadust, suurendab läbikarastuvust ning soodustab austeniitstruktuuri teket. Kulumiskindlates terastes ca 13%
Cr	0,5	Tõstab terase tugevust ja kõvadust (moodustuvad karbiidid), suurendab läbikarastuvust, soodustab ferriitstruktuuri teket, tagab korrosioonikindluse (>12%Cr). Konstruktsiooniterastes 1...2%, tööriistaterastes ca 12%
Ni	0,5	Tõstab terase sitkust, kasut. koos kroomiga; soodustab austeniitstruktuuri teket. Konstruktsiooniterastes kuni 5%, roostevabades terastes 8...10%
Mo	0,1	Alandab terase külmahapruslääve, vähendab noolutusrabe-dust, tõstab roometugevust
W	0,1	Tõstab terase kõvadust ja kulumiskindlust. Põhilisand kiirlõiketerastes
Co	0,1	Tugevdab terast; parandab selle magnetomadusi. Side-aine kõvasulameis
V	0,12	Tõstab terase kõvadust. Kasutatakse tera peenendajana

Ehitusterased

Ehitusterastena kasutatakse suhteliselt väikese süsiniku (kuni 0,2%) ja legeerivate elementide sisaldusega (Si ja Mn 1...2%) teraseid. Reeglina kasutatakse ehitusteraseid mitmesuguse ristlõikega profiilmetallina (nurkteras, talad, latid, armatuur jt.) ning valmistaja väljastatud olekus. Seetõttu ehitusterased ei kuulu täiendavale termotöötlusele. Hea keevitavus on peamine tehnoloogiline omadus: keevisõmbluses ei tohi tekkida külm- ega kuumpragusid ja selle mehaanilised omadused peavad olema lähedased põhimetalli omadustele.

Kuna paljud ehituskonstruktsioonid töötavad tihti madalatel temperatuuridel ja dünaamilistel koormustel, siis üheks tähtsamaks omaduste näitajaks on külmahaprusläävi.

Ehitusterastena kasutatakse:

- tavasüsinikteraseid,
- mangaanteraseid,
- peenteraseid,
- parendatud teraseid,
- boorteraseid.

Külmvormitavad kõrgvoolavad terased

Kuna paljude konstruktsioonelementide valmistamisel kasutatakse survetöötlust, peavad need terased olema hästi deformeeritavad.

Teraste hea deformeeritavuse (stantsitavuse) tagamiseks peab olema suhe $R_{p0.2}/R_m$ piires 0,5...0,65 ja plastsus vähemalt 40%. Stantsitavus on seda halvem, mida suurem on terase C-sisaldus. Rõni tõstab voolavuspiiri, halvendades terase stantsitavust. Seetõttu kasutatakse C-terastest eelkõige väiksema Si-sisaldusega keevteraseid. Külmdeformatsioonist tingitud kalestumise efekti suurendamiseks lisatakse mikrolegeerivaid elemente (Al, V), mis sidudes lämmastikku ja moodustades nitriide (AlN, VN) soodustavad tugevnemist.

Terased	
Konstruktsiooniterased	
• Ehitusterased • Masinaehitusterased	
Tööriistaterased	
• Lõike- ja mõõteriistaterased • Stantsiterased (külm- ja kuumstantsiterased) • Kiirlõiketerased	
Eriterved	
• Roostevabad terased • Kuumuskindlad terased • Kulumiskindlad terased	

Tabel 1.10. Tavaehitusterased (EN10025)

Margi-tähis	Koostis %, max			Omadused, min	
	C ¹⁾	Si		R _{eH} N/mm ²	KU T, °C/J
S185	-	-	-	175	- -
S235JR S235J2	0,2	-	1,4	235...175	+20 27 -20 27..23
S275JR S275J2	0,2	-	1,4	275...205	+20 27..23 27..23
S355JR S355J2	0,22	-	1,6	355...275	+20 27..23 -20 27..23

¹⁾ keskmine

Tabel 1.11. Kuumvaltsteras (leht) (EN 10137)

Margitähis	TT ¹⁾	Koostis %, max	Omadused, min	
		Muu	R _{eH} N/mm ²	KU 27J t°-I
S235J2	N	1,4 Mn	235	-20
S275J2	N	1,4 Mn	275	-20
S500 QL1	P	2 Ni	500	-40
S690 QL1	P	1,5 Cr 0,7 Mo 0,5 Cu 0,12 V	690	-60

¹⁾ N – normaliseeritud, P – parendatult

²⁾ C-sisaldus 0,2%

Tabel 1.12. Külvmormitav külvaltsteras (leht, riba) (EN 10130)

Margi- tähis	Koostis %, max			Omadused, min		
	C ¹⁾	Mn	Muu	R _{eH} N/mm ²	R _m N/mm ²	A %
DC01	0,12	-		280	410	28
DC04	0,08	-		210	350	38
DC06	0,02	-		180	350	38
S355MC	0,12	1,5	Al, V	355	430	19
S500MC	0,12	1,7	Nb	500	550	12
S700MC	0,12	2,1	Ti	700	750	10

¹⁾ keskmine

Masinaehitusterased

Tsementiitidavad terased

Tsementiitidavate terastena kasutatakse madal-süsinikteraseid (0,1...0,25%C), mille kõvadus peale tavakarastust on väike. Peale tsementiitumist (pinnakihi rikastamist süsinikuga, C-sisaldus viiakse ca 1%-ni), karastamist ja madalnoolutamist on nende pinnakõvadus 58...62 HRC, südamik kõvadus aga 30...42HRC.

Tsementiitidavate teraste südamik peab olema heade mehaaniliste omadustega, eriti tähtis on kõrge voolavuspiir, mille tagab eelkõige peeneteraline struktuur. Ka pinnakihi on oluline peeneteraline struktuur – jämeteraline tsementiititud kihi struktuur toob pärast termotöötlust pinnakihi kaasa väsimus-tugevuse languse.

Tsementiititud kihi paksus on tavaliselt 0,5...2 mm, mille struktuur sügavuti muutub sujuvalt südamiku struktuuriks. Tsementiititavaist terastest valmistatakse selliseid masinaosi nagu hammas-rattad, ketirattad, nukid jm.

Parendatavad terased

Masinaosade valmistamiseks kasutatavad terased peavad olema töökindlad, see tähendab, et nendel peavad olema kõrge tugevusnäitajad R_m ja R_{p0,2}, vastuvõetav külmahapruslavi ja löögisiskus KU.

Parendatavad terased on kesksüsinikterased (0,3...0,5%C), milles on 3...5% legerivaid elemente. Nende termotöötlust seisneb karastamises (reeglina õlisse, mõnikord sulasoolas või õhus) ja kõrgnoolutamises temperatuuril 550...600 °C. Peale

sellist termotöötlust omandab teras struktuuri, mis talub hästi löökoormusi.

Parendatavaist terastest valmistatakse enamik masinaosi: vöölid, hoovad, teljed jms.

Termotöötlemine võimaldab oluliselt parandada mittelegeerkonstruktsiooniteraste mehaanilisi omadusi. Võrreldes ühekordse töötlemise – normaliseerimisega, mil moodustub perliitstruktuur, on kahekordse töötlemise – parendamise (karastamine + kõrgnoolutamine) tulemusena tekkiv struktuur paremate omadustega.

Vedru terased

Keerd-, spiraal- ja lehtvedrusid ning teisi elastseid detaile iseloomustab see, et neis kasutatakse ainult terase elastsust; plastne deformatsioon on lubamatu. Seega on vedrumaterjalile peamine nõue kõrge voolavuspiir ja elastsusmoodul. Kuna vedrud töötavad vahelduvtsükliilistel koormustel, siis on tähtis ka vedru teraste väsimuspiir; sitkus- ja ka plastsusnäitajad olulist rolli ei mängi.

Vedrud tehakse 0,5...0,7% süsinikusisaldusega terasest, mis on legeritud räni ja mangaaniga. Vastutusrikaste vedrude korral kasutatakse teraseid, millele on lisatud kroomi ja vanaadiumi.

Tabel 1.13. Surveotstarbelised terased (EN10028)

Margi- tähis	Ots- tarve	Koostis %, max		Omadused, min	
		C ⁴⁾	Mn jt.	R _{eH} N/mm ²	A %
P235GH	TK ¹⁾	0,16	1,2	235	25
P355GH	TK	0,22	1,7	355	21
P275N	KNP ²⁾	0,18	1,4	275	24
P460N	KNP	0,20	1,7	460	17
P460Q	KPP ³⁾	0,18	1,7	-	-
P690Q	KPP	0,20	2,0 Ni 1,5 Cr 0,7 Mo	-	-

¹⁾ TK – tööks kõrgendatud t°-l

²⁾ KNP – keevitatavad normaliseeritud peenteraterased

³⁾ KPP – keevitatavad parendatud peenteraterased

⁴⁾ keskmine

Tabel 1.14. Masinaehitusterased

Margitähis	Omadused, min		
	R _{eH} , N/mm ²	R _m , N/mm ²	A%
E295	295	490	20
E335	335	590	16
E360	360	670	11

Vedrude termotöötlemine seisneb karastamises ja kesknoolutamises temperatuuril 300...400 °C.

Vedrude töökindlus sõltub oluliselt nende pinna kvaliteedist: praod, tagi, kriimud vähendavad tunduvalt väsimustugevust. Seetõttu leiab laia kasutamist vedrude pinnakihi kalestamine kuulidega,

rullidega jm. Selle tulemusena tekivad pinnakihiisurvepinged, mispuhul tõuseb väsimustugevus.

Tabel 1.15. Parendatavad terased (EN10083)

Margitähis	Koostis %, max		Omadused, min		
	C ¹⁾	Cr jt.	R _{p0.2} N/mm ²	R _m N/mm ²	KU +20°CJ
C30E	0,3	-	300	500	40
C45E	0,45	-	370	630	25
28Mn6	0,28	1,6 Mn	440	650	40
34Cr4	0,34	1,2 Cr	460	700	40
34CrMo4	0,34	1,2 Cr	550	800	45
34CrNiMo6	0,34	0,3 Mo	800	1000	45
		1,7 Cr			
		1,7 Ni			
		0,3 Mo			

¹⁾ keskmine

Tabel 1.16. Tsementiitidavad terased (EN10084)

Margitähis	Koostis %, max		Omadused ²⁾ , min	
	C ¹⁾	Cr jt.	R _{eL} N/mm ²	R _m N/mm ²
C10E	0,1	-	295	490
C15E	0,15	-	355	590
15Cr3	0,15	0,7 Cr	440	690
20MnCr5	0,2	1,3 Cr	540	780
14NiCr14	0,14	1,4 Mn	685	880
		0,95 Cr		
		2,75 Ni		

¹⁾ keskmine

²⁾ tsementiitidult ja karastatult (pinna kõvadus 62 HRC)

Kuullaagriterased

Rull- ja kuullaagrite töötingimuste iseärasus on kõrge survest tingitud materjali lokaalne deformatsioon ja kuuli või rulli kontakt tsüklilisel koormusel.

Sellest tulenevalt peab kuullaagriteras olema suure kõvadusega (62HRC) ja väga ühtlase mikrostruktuuriga. Selleks kasutatakse suure süsinikusisaldusega, eelkõige kroomiga legeeritud teraseid. Tuntumad sisaldavad ca 1% C ja 1,5% Cr. Nende teraste termotöötlus seisneb karastamises õlisse temperatuurilt 830...840 °C ja madalas noolutamises 150...160 °C 1...2 tunni jooksul. Saadakse peeneteraline struktuur, mis on kõva ja kulumiskindel ning hea vastupanuga väsimusele. Tavaliselt tehakse kuulid ja rullid veidi pehmemad kui veerevõrud.

Suur kõvadus ja kulumiskindlus lubab kasutada kuullaagriteraseid ka tööriistaterastena külmlõike- ja survetöötlusstantside, pressvormide jms. valmistamiseks.

Automaaditerased

Automaaditeraseks nimetatakse automaatpinkidel töödeldavate detailide materjalina kasutatavat

terast, mis sisaldab kuni 0,4% C ja tavalisest rohkem väävlit ja fosforit (kuni 0,2%). Tänu väävlile on teras hästi lõiketöödeldav (annab lõikamisel lühikese murduva laastu, mida lõiketsoonist on kerge eemaldada). Ent väävel viib alla terase mehhaanilised omadused, eelkõige sitkuse.

Tabel 1.17. Vedruterased

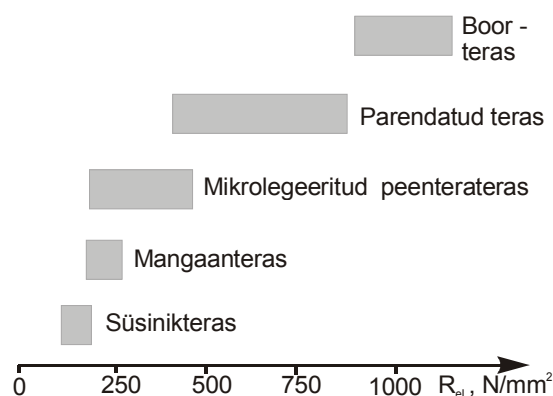
Margitähis	Koostis %, max		Omadused ²⁾ , min	
	C ¹⁾	Muu	R _{p0.2} N/mm ²	R _m N/mm ²
60SiMn5	0,6	1,3 Si 1,1 Mn	1130	1320
55Si7	0,55	1,8 Si	1130	1320
55Cr3	0,55	0,9 Cr	1175	1320
50CrV4	0,5	1,2 Cr 0,2 V	1175	1370

¹⁾ keskmine, ²⁾ karastatult ja kesknoolutatult

Tabel 1.18. Automaaditerased

Margitähis	Koostis %, max			Omadused ²⁾ , min
	C ¹⁾	S	Muu	R _m N/mm ²
10S20	0,1	0,25	-	350
10SPb20	0,1	0,25	0,3 Pb	350
9SMn28	0,1	0,32	1,3 Mn	370

¹⁾ keskmine, ²⁾ normaliseeritult



Sele 1.16. Konstruksiooniteraste tugevus

Tööriistaterased

Tööriistaterased moodustavad teraste suure grupi, mida iseloomustavad suur kõvadus, tugevus ja kulumiskindlus, s.o. omadused, mis on vajalikud metallide lõike- ja survetöötlemisel, ja võime neid omadusi kuumenemisel säilitada – soojuskindlus. Eelkõige kõvaduse nõudest tulenevalt on tööriistateraste süsinikusisaldus võrreldes konstruktsiooniterastega suurem (reeglina 1...2%).

Tabel 1.19. Tööriistaterased

Margitähis	Koostis %, max							Kõvadus
	C	Mn	Cr	Mo	W	V	Muu	HRC
C-terased								
C70W2	0,7	-	-	-	-	-	-	63 MN ²⁾
C105W2	1,05	-	-	-	-	-	-	65 MN ²⁾
Külmstantsiterased								
100MnCrW4	1,0	1,2	0,7	-	0,7	-	-	63 MN ²⁾
X210Cr12	2,1	-	12,0	-	-	-	-	62 MN ²⁾
X165CrMoV12	1,65	-	12,0	0,7	0,6	0,5	-	61 MN ²⁾
Kuumstantsiterased								
X40CrMoV5-1	0,4	-	5,5	1,5	-	1,1	1,2 Si	42...46 KÖN ³⁾
Kiirlõiketerased								
HS18-1-2-10	0,8	-	4,5	0,8	18,5	1,7	10 Co	64 KÖN ³⁾
HS6-5-2-5	0,94	-	4,5	5,2	6,7	2,0	5 Co	64 KÖN ³⁾
HS2-9-2-8	0,92	-	4,2	9,2	9,2	2,2	8,75 Co	64 KÖN ³⁾

¹⁾ keskmine, ²⁾ madalnoolutus (~200 °C), ³⁾ kõrgnoolutus (~600 °C)

Soojuskindluse järgi liigitatakse tööriistaterased järgnevalt: mittesoojuskindlad (süsiniktööriistaterased), poolsoojuskindlad (peam. stantsiterased) ja soojuskindlad (kiirlõiketerased).

Süsiniktööriistaterased

Süsiniktööriistateraste C-sisaldus on piires 0,7...1,3%. Peale karastamist vees on teraste kõvadus 62...64HRC. Nende teraste pinna suur kõvadus karastatult ja suur plastsus lõõmutatult võimaldavad valmistada tööriistu survetöötlemise teel, näit. keermepuure rullimise teel, viile täkkimise teel jne.

Stantsiterased

Lähtudes tööriistade töötingimustest ja kasutatavatele terastele esitatavatest nõuetest liigitatakse stantsiterased külmstantsi- ja kuumstantsiterasteks.

Külmstantsiterased on eelkõige kroomiga kõrglegeeritud terased, mis sisaldavad 12% Cr ja 1...2% C. Teraste kõvadus peale karastamist ja madalnoolutust on 60 HRC ja neid kasutatakse keeruka kujuga survetöötlustööriistade (tõmbesilmad, pressvormid jne.) valmistamiseks.

Kuumstantsiterased peavad, erinevalt külmstantsiterastest, säilitama omadused (kõvadus, tugevus) ja mõõtmised kokkupuutes kuuma metalliga. Nimetatud omaduste tagamiseks sisaldavad kuumstantsiterased tavaliselt 0,5...0,6% C – see annab hea sitkuse – ja 1...2% Ni või Mo, mis tagab hea läbikarastuvuse. Kasutatakse kuumstantside, valuvormide jms. valmistamiseks.

Kiirlõiketerased

Kiirlõiketerased on enimkasutatavaid tööriistateraste gruppe. Kiirlõiketerased sisaldavad üle 0,6% C ja reeglina volframit (kuni 18%), molübdeeni, vanaadiumit jt. lisandeid. Kiirlõiketeraste kõrge karastustemperatuuri (üle 1000 °C) ja sellele järgneva mitmekordse noolutamise (temperatuuril 550...600 °C) tulemusena saadakse terase kõvaduseks 64...65HRC, mis säilib nende kasutamisel tempe-

ratuurideni 600...700 °C, jäädes alla ainult pulberkõvasulameile. Kiirlõiketerastest valmistatakse rauasaelehti, keermelõikureid, freese, stantse jpm.

Tööriistaterased

Mittesoojuskindlad

Tööks temperatuuridel kuni 200 °C

- Süsiniktööriistaterased

Soojuskindlad terased

Tööks temperatuuridel kuni 300...500 °C

- Kõrglegeeritud külmstantsiterased
- Madallegeeritud kuumstantsiterased

Soojuskindlad terased

Tööks temperatuuridel kuni 500...600 °C

- Kõrglegeeritud kiirlõiketerased
- Karbiidterased

Eriterased

Konstruktiooniterastest, mis töötavad spetsiifilistes tingimustes (kõrgetel ja madalatel temperatuuridel, abrasiivsetes või korrodeerivates keskkondades), moodustavad suure grupi eriterased. Nende talitlusomadused tagatakse spetsiaalse legeerimisega.

Eriomadustega legeerkonstruktiooniterased on näit. korrosiooni-, kulumis- ja kuumuskindlad terased.

Roostevabad (korrosioonikindlad) terased

Korrosioonikindlatest terastest on enam levinud kroomi (vähemalt 12%), niklit jt. legeerivaid elemente sisaldavad terased.

Roostevabade terastena on tuntumad:

- *kroomterased* (sisaldavad 13...27% Cr, kusjuures Cr-sisalduse kasvuga suureneb ka terase korrosioonikindlus),
- *kroomnikkelterased* (legeeritud lisaks kroomile nikliga ning võivad sisaldada titaani, nioobiumi, lämmastikku; viimaseid lisatakse terastele teradevahelise korrosiooni vältimiseks).

Roostevabast terasest valmistatakse korrodeerivas keskkonnas töötavaid masinaosi, ehitusdetalle, arsti- ja kõõgiriistu jne.

Kulumiskindlad terased

Vastupanu kulumisele on otseselt seotud materjali pinnakõvadusega, millest tulenevalt kulumiskindluse tõstmiseks kasutatakse selliseid tugevdamise meetodeid nagu legeerimist, pindkarastamist, termokeemilist töötlemist ja pindamist.

Vähem tõhus on läbilegeerimine (sisseviidavatest legeerivatest elementidest on detaili läbimõõdu 100 mm korral toimetõhusad ainult 2...3%), eriti efektiivne on aga kõvade pinnete pealekandmine eri pindamismoodustega: leek-, plasma- ja detonatsioonpihustamise, pealesulatamise, -keevitamise, sadestamise jm. teel.

Legeerterastest kasutatakse kulumiskindlate terastena tsementiitud ja suurema C-sisaldusega kroomi, mangaani, volframi jt. elementidega legeeritud teraseid. Tuntumad on mangaanterased Mn-sisaldusega ca 12%.

Kuumuskindlad terased

Terase kuumuskindluse (kuumuspüsivus+ kuumustugevus) tagab eelkõige kroomiga legeerimine. Kroom jt. legeerivad elemendid moodustavad tihedad oksiidid nagu Cr_2O_3 , Al_2O_3 või SiO_2 . Mida suurem on Cr-, Al- või Si-sisaldus rauas, seda kõrgem on selle kuumuspüsivus. Kuumuspüsivuse temperatuuril 900 °C annab ca 10% Cr, 1000 °C juures aga on vajalik Cr-sisaldus juba 25%.

Kuumustugevuse tagamiseks legeeritakse teraseid lisaks kroomile räni, molübdeeni, nikli jt. elementidega. Terastest, mis on mõeldud tööks kõrgetel temperatuuridel (350...500 °C), moodustavad suure grupi katla- ja klapiterased. Esimesed on väikese C-sisaldusega (see tagab hea keevitavuse) ja eelkõige Cr-ga legeeritud (1...6%) terased. Klapiterastena kasutatakse suurema C-sisaldusega (0,5...0,6%) kroomi (5...15%) ja räniga (1...3%) legeeritud teraseid.

Veel kõrgematel temperatuuridel kasutatakse suurema Cr ja Ni-sisaldusega teraseid või hoopiski nende baasil sulameid. Viimastest tuntumad on

nikroomid, mis põhikomponendina sisaldavad niklit (60...80%) ja lisandina kroomi (40...20%) (vt. ka p. 1.2.4. Niklisulamid).

Tabel 1.20. Roostevabade teraste struktuur

Struktuur	Koostis %, max	Omadused		
		Karas- tatavus	Magne- tiline	Korrosiooni- kindlus
Martensiit (M)	12...13 Cr	ja	ja	Hea
Ferriit (F)	>13 Cr	ei	ja	Parem kui martensiit- terastel
Austeniit (A)	18 Cr 8...10 Ni	ei	ei	Eriti kõrge korrosiooni- kindlus

Tabel 1.21. Valuterased

Margitähis	Koostis %, max		Omadused, min	
	C ¹⁾	Muu	R _m N/mm ²	A %
Mittelegeer- terased				
G-C25	0,25	0,9 Mn	440	22
G-28Mn6	0,28	1,65 Mn	480	17
Madallegeer- terased				
G-25CrMo4	0,25	1,2 Cr 0,3 Mo	700	12
Kõrglegeer- terased				
G-X6CrNiTi18-10	0,06	19,0 Cr 12,0 Ni 0,8 Ti	450	25
G-X120Mn12	1,2	12,0 Mn	750	20

¹⁾ keskmine

Tabel 1.22. Roostevabad terased

Margitähis	Grupp	Koostis %, max				Omadused ³⁾ , min		
		C ¹⁾	Cr	Ni	Muu	R _{p0,2} N/mm ²	R _m N/mm ²	A %
X12Cr13	M	0,12	14,0	-	-	250 410 ⁴⁾	400 590	20 16
X6Cr13	F	0,06	14,0	-	-	250	400	20
X3CrNiMoN27-5-2	FA	0,03	28,0	6,5	2 Mo 2 Mn	450	600	20
X4CrNi18-10	A	0,04	19,0	11,6	2 Mn	195	500	45
X4CrNi18-10	A	0,04	19,0	11,0	2 Mn	270	550	40
X4CrNiMo17-13-3	A	0,04	18,5	14,0	3 Mo 2 Mn	220	490	45

¹⁾ keskmine, ²⁾ lõõmututult, ³⁾ karastatult, ⁴⁾ parendatult

Terase struktuur

Terase puhul paigutuvad raua kristallivõresse süsiniku või legeerivate elementide aatomid. Seejuures tekkivad süsiniku tardlahused α -rauas (Fe_α) ja γ -rauas (Fe_γ); raua ja süsiniku omavahelise reageerimise tulemusena aga keemiline ühend – raudkarbiid. Fe aatomid rauas ja Fe ja C aatomid terases paiknevad kindla korra järgi, mida iseloomustab kristallivõre. Väga paljude kristallivõrede kogum moodustab kristalli (tera). Teras struktuuri moodustavad terad, mille ulatuses kristallivõre on orienteeritud üheselt. Tera suurus sõltub väga paljudest mõjuritest (kuumutustemperatuur ja kestus, jahutuskiiirus, koostis jpt.) ja on piires 0,01...0,1 mm. Tera struktuuri mõjutab ka terase survetöötlus – terad venitatakse ühes suunas välja, mille tulemusena tekib kihtstruktuur (tekstuur) ja omaduste anisotroopsus.

Süsiniku ja raua kristallivõred

Teras erinevate struktuuride tekke eri termotötlusviiside korral teeb võimalikuks eelkõige raua polümorfism – erinevate kristallivõrede esinemine erisugustel temperatuuridel. Raua on kaks polümorfset kuju: α -raud (Fe_α) ruumkesendatud kuupvõrega (tähistatakse K8) ja γ -raud (Fe_γ) tahkesendatud kuupvõrega (K12). Temperatuurid 911 °C (tähistatakse A_3 -ga) ja 1392 °C (A_4) on raua polümorfse muutuse temperatuurid – toimub üleminek ühelt kristallivõrelt teisele. Raua polümorfismi mõju ulatub ka tema sulamitesse.

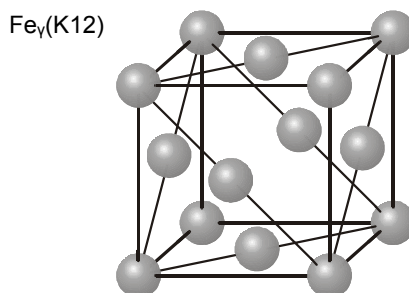
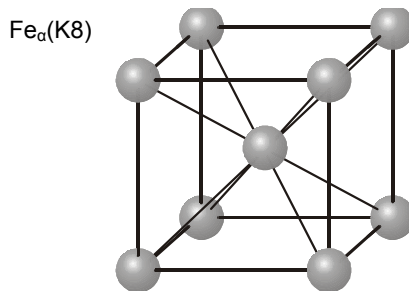
Süsinik võib esineda mitmel kujul, sh. teemandina ja grafiidina. Rauasüsinikusulamites on vabas olekus süsinik grafiidi kujul, mille kristallivõre on heksagonaalne ja seetõttu on grafiidi tugevus ja platsus väga väikesed.

Terastes esinevad järgmised faasid ja struktuurivormid.

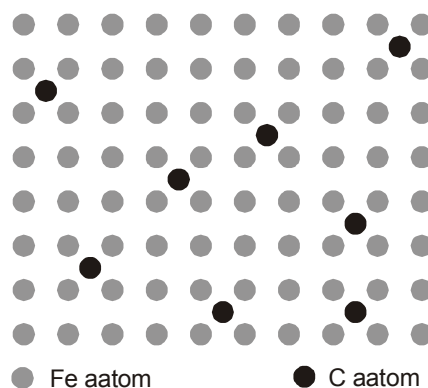
- Ferriit (F)** – süsiniku tardlahus α -rauas. Temperatuuril 727 °C lahustub α -rauas kuni 0,02% C (massi %), toatemperatuuril aga kuni 0,01%. Ferriidil on ruumkesendatud kuupvõre, väike tugevus ja kõvadus, kuid suur platsus.
- Austeniit (A)** on süsiniku tardlahus γ -rauas. Süsiniku maksimaalne lahustuvus γ -rauas on 2,14% temperatuuril 1147 °C, temperatuuril 727 °C – 0,8%. Toatemperatuuril austeniiti süsinikterastes ei esine, sest ta laguneb 727 °C juures ferriidiks ja tsementiidiks e. perliidiks.
- Perliit (P)** on ferriidi ja tsementiidi eutektoidsegu süsinikusisaldusega 0,8%; esineb neis rauasüsinikusulamites, milles $C > 0,02\%$. Perliit tekib austeniidi (süsinikusisaldusega 0,8%) lagunemisel temperatuuril 727 °C:



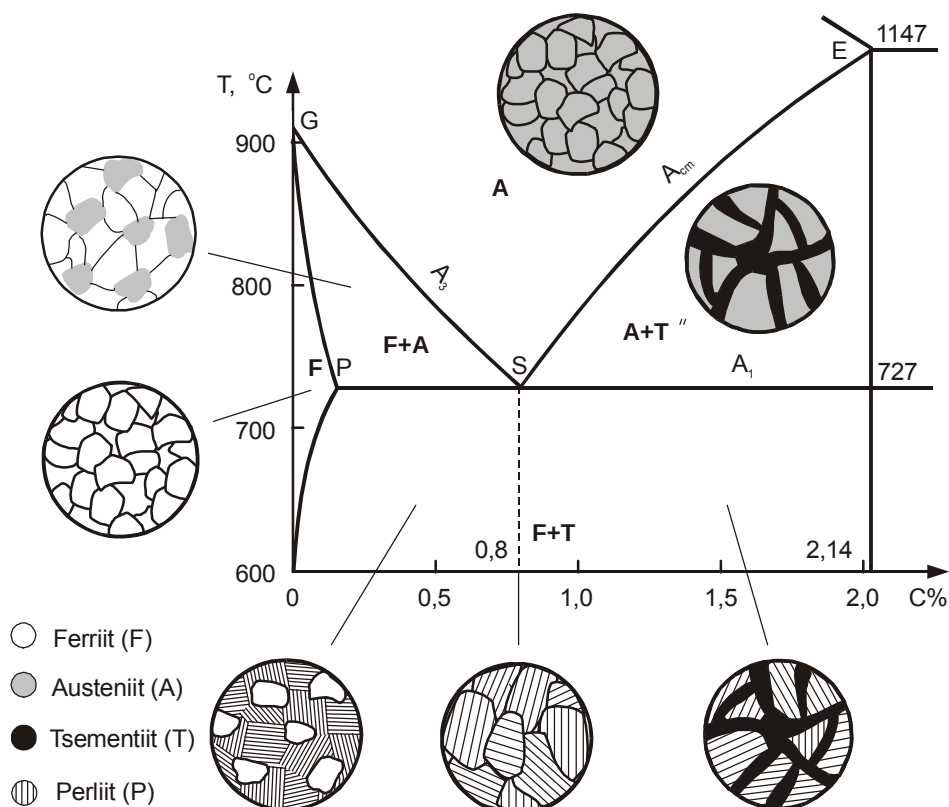
Fe	
Tihedus ρ	7800 kg/m ³
Sulamistemperatuur T_s	1539 °C
Kristallivõre	0...911 °C K8 911...1392 °C K12 ^o 1392...1539 °C K8
Tõmbetugevus R_m	Puhas Fe 250N/mm ² sulamid 3000 N/mm ²
Joonpaisumistegur	10,5·10 ⁻⁶ 1/K
Elektrijuhtivus 1/ ρ	15% IACS
Korrosioonikindlus	Hea



Sele 1.17. α -raua ja γ -raua kristallivõred



Sele 1.18. Aatomite paigutus raua-süsiniku tardlahuses



Sele 1.19. Fe-Fe₃C faasidiagramm

d) Tsementiit (T) on raua ja süsiniku keemiline ühend raudkarbiid – Fe₃C. Tema süsinikusisaldus on 6,67% ja ta on rauasüsinikusulamite struktuuriosadest kõige kõvem ja hapram. Austeniidist selle C-sisalduse vähenemisel tekkinud sekundaarne tsementiit on üleeutektoidse terases tavaliselt heleda võrguna või terakeste ahelana perliiditerade vahel või nõeltena nende sees.

Terase struktuur toatemperatuuril

Sulam on tasakaaluolekus siis, kui kõik faasimuutused temas on toimunud täielikult faasidiagrammi kohaselt. Selline olek saavutatakse ainult väga aeglasel jahtumisel. Rauasüsinikusulamite taskaaluliste struktuuride leidmise aluseks on Fe-Fe₃C faasidiagramm (sele 1.19). Faasidiagrammi komponentideks on puhas raud (Fe) ja raudkarbiid (Fe₃C) e. tsementiit.

Kooskõlas faasidiagrammiga koosneb terase struktuur normaaltemperatuuril ferriidist ja tsementiidist, kusjuures tsementiidi kogus terase struktuuris kasvab võrdeliselt selle C-sisaldusega. C-sisaldusest ja Fe-Fe₃C faasidiagrammist lähtudes liigitatakse terased:

- alaeutektoidseiks, C<0,8%, struktuur F+P;
- eutektoidseiks, C=0,8%, struktuur P;
- üleeutektoidseiks, C>0,8%, struktuur P+T".

Kõvad ja haprad tsementiidiosakesed üleeutektoidterase struktuuris suurendavad selle vastupanu deformeerimisele, vähendades samal ajal terase plastisust ja sitkust.

Faasid ja struktuurivormid rauasüsinikusulameis		
	Tähis	Määratlus
Faasid		
Vedelfaas	L	C tardlahus rauas
Ferriit	F	C tardlahus α-rauas C-lahustuvus t°-l 727 °C on 0,02%, toat°-l 0,01%
Austeniit	A	C tardlahus γ-rauas C-lahustuvus t°-l 1147 °C on 2,14%, t°-l 727 °C 0,8%
Tsementiit	T	Fe ja C keemiline ühend – raudkarbiid (Fe ₃ C). C-sisaldus 6,67%
Struktuuri vormid		
Ledeburiit	Le	Eutektsegu C-sisaldusega 4,3%. Tekib vedelfaasi kristalliseerumisel t°-l 1147 °C. Kuni t°-ni 727 °C koosneb A ja T-st, alla selle F ja T.
Perliit	P	F ja T eutektoidsegu C-sisaldusega 0,8%. Tekib austeniidi lagunemisel t°-l 727 °C

Terase struktuur kõrgel temperatuuril

Kui puhta raua korral muutub kuumutamisel ainult selle kristallivõre, siis teraste kuumutamisel tekivad temperatuuridel üle 727 °C (jooned A₁ ja A₃ seel 1.19) erinevad struktuurid:

- eutektoidterased on 100% austeniitstruktuuriga
- alaeutektoidterased kas ferriitausteniit- või austeniitstruktuuriga
- üleeutektoidterased kas austeniit- või austeniitstruktuuriga.

Terase kiire jahutamise (karastamise) tulemusena struktuuris olev austeniit ei lagune, vaid muutub *martensiidiks*, mis on süsiniku üleküllastatud tardlahus α -rauas ja on terases väga kõva, kuid habras faas.

Terase termotöötlus

Terase termotöötlus seisneb kuumutamises üle faasipiiri(de) ning järgnevas jahutamises kiirusel, mil faasimuutused kas toimuvad täielikult, osaliselt või üldse ei leia aset. Selle põhjal eristatakse kahte peamist terase termotöötluse moodust:

- *lõõmutamine* (kuumutamine aeglase jahutamisega – faasimuutused toimuvad täielikult),
- *karastamine* (kuumutamine kiire jahutamisega – faasimuutused ei leia aset või toimuvad osaliselt).

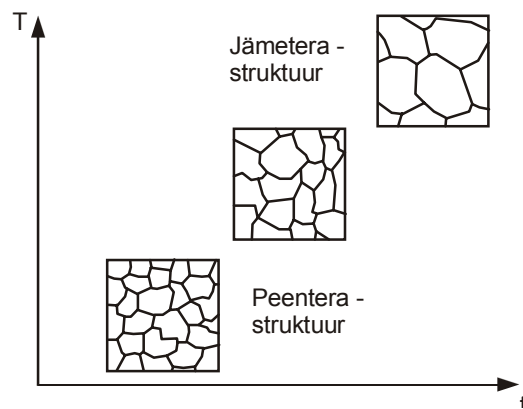
Lõõmutamine	Karastamine
Plastsus suureneb	Kõvadus tõuseb
Sisepinged vähenevad	Tugevus suureneb
Survetöödeldavus paraneb	Sitkus väheneb
Struktuur peeneneb	Kulumiskindlus suureneb
Lõiketöödeldavus paraneb	

Terase lõõmutus

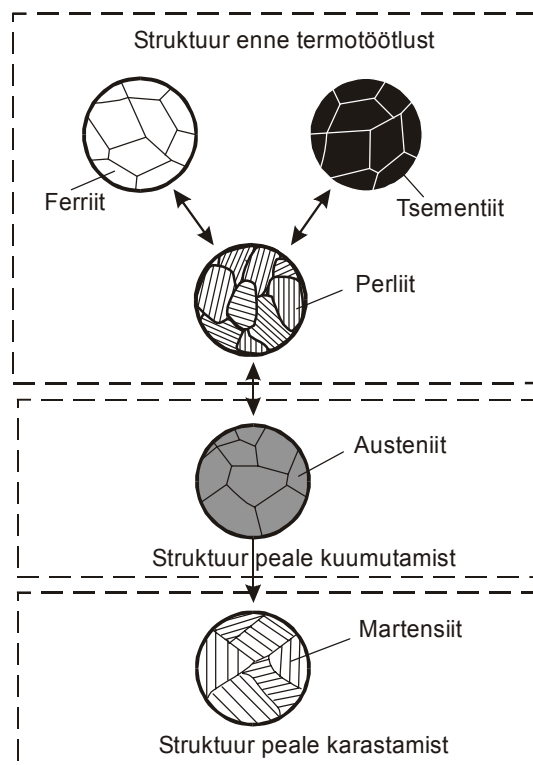
Lõõmutus on niisugune termotöötlemise viis, kus terast kuumutatakse üle faasimuutuse temperatuuri järgneva aeglase jahutamisega, tavaliselt koos ahjuga. Aeglane jahutamine peab kindlustama austeniidi lagunemise perliidiks. Lõõmutamine on tavaliselt esmane termotöötlemisviis, mille eesmärgiks on kas kõrvaldada kuumtöötlemise eelmiste operatsioonide (valamise, sepiamise jne.) defekte või valmistada struktuuri ette järgnevatel operatsioonideks (näiteks lõiketöötlemiseks või karastamiseks). Üsna sageli on aga lõõmutamine lõplikuks termotöötlemise viisiks ja seda siis, kui lõõmutatud terase mehaanilised omadused rahuldavad, s.t. pole vaja edaspidist parendamist (karastamist ja noolutamist).

Lõõmutuse peamine eesmärk on vajalike omaduste tagamine terase ümberkristalliseerimise ja sisepingete kaotamise tagajärjel. Selleks kasutatakse difusioon-, täis-, pool- ja madallõõmutust.

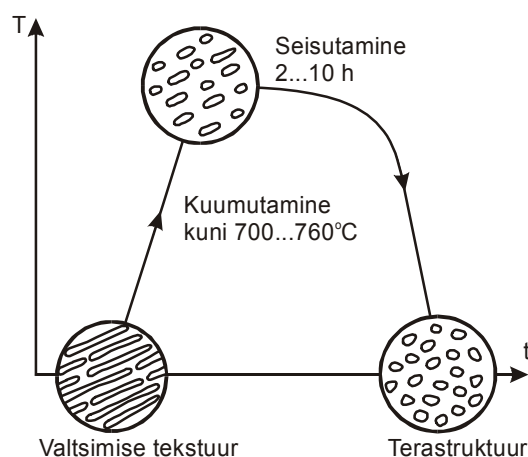
Difusioonlõõmutust e. *homogeniseerimist* kasutatakse eelkõige legeerterastest valuplokkide ja valandite keemilise koostise ühtlustamiseks – likvatsiooni kõrvaldamiseks. Keemilise koostise ühtlustamiseks kuumutatakse valuplokke või valandeid kõrge temperatuurini, misjuures valuploki või valandi keemiline koostis ühtlustub. Terasid lõõmutatakse



Sele 1.20. Tera kasv kuumutamisel



Sele 1.21. Struktuurimuutused terase termotöötlusel



Sele 1.22. Pehmelõõmutamine

temperatuuril kuni 1100 °C, seisutusaeg 10...20 tundi. Kuumutus temperatuurini 1000...1100 °C ja pikaajaline seisutus sellel põhjustavad austeniiditera tunduvalt kasvamist – struktuur muutub jämedateraliseks. Seetõttu on nõutav täiendav termotöötlemine operatsiooni struktuuri parandamiseks (täis- või poollõõmutus).

Täislõõmutuse e. täieliku lõõmutuse eesmärgiks on eelkõige sepi- ja valandite struktuuri peenendamine ja sisepingete kaotamine. Täislõõmutusel kuumutatakse terast üle faasipiiri A_{c3} . Terase ferriitperliitstruktuur muutub kuumutamisel austeniidiks ning jahutamisel tekib ümberkristalliseerumisel austeniidist uuesti ferriit ja perliit. Sellise termotöötlemise abil saadakse valamisel ja sepi- ja valandite tekkinud jämedateralisest ferriitperliitstruktuurist peeneteraline ferriitperliitstruktuur.

Poollõõmutust e. mittetäielikku lõõmutust kasutatakse muutmaks suurema süsinikusisaldusega (0,5% ja enam) terase struktuuri, mis on liiga kõva nii külmi- kui ka lõiketöötlemiseks. Kuna sellise madalama temperatuuriga lõõmutamise peamärg on terase kõvaduse vähendamine ja plastisuse suurendamine, siis nimetatakse seda ka *pehmelõõmutuseks*.

Poollõõmutust tehakse kõrgsüsinikteraste sisepingete kaotamiseks, kõvaduse vähendamiseks, plastisuse suurendamiseks ja lõiketööeldavuse parandamiseks. Poollõõmutusel kuumutatakse terast tavaliselt üle faasipiiri A_{c1} , millele järgneb aeglane jahutus.

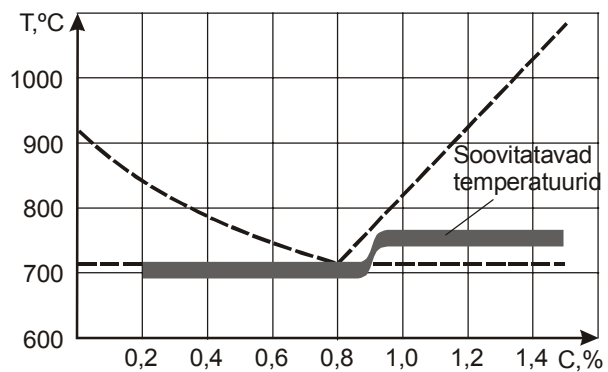
Rekristallisatsioonilõõmutus e. rekristalliseeriv lõõmutus on madalatemperatuurilise lõõmutuse üheks liigiks, mida kasutatakse eelneva plastse külmdformatsiooni tagajärjel tekkinud kalestumise kõrvaldamiseks. Rekristallisatsioonilõõmutamisel kuumutatakse terast faasipiirist A_{c1} veidi madalamate temperatuurideni (kuni 650...700 °C), seisutatakse ja jahutatakse seejärel aeglaselt. Selle tulemusena toimub metalli sekundaarne kristalliseerumine – *rekristalliseerumine*, misjuures vanade deformeerunud terade asemele tekkivad uued ja deformeerunud struktuur kaob.

Terase normaliseerimine

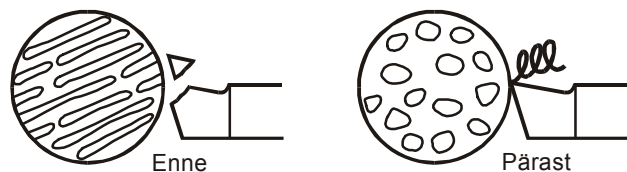
Aeglase jahutamise tõttu on valandis austeniiditera ja selle lagunemisel tekkinud perliiditera tavaliselt suur. Jämedateralist austeniitstruktuuri (ka perliitstruktuuri) saab parandada termotöötlemise teel, mida nimetatakse *normaliseerimiseks*.

Normaliseerimine on selline termotöötlemine viis, mille korral terast kuumutatakse 30...50 °C üle faasipiiri A_{c3} (A_{cm}), seisutatakse sellel temperatuuril ja jahutatakse siis õhus. Normaliseerimise tulemusel vähenevad sisepinged ja toimub terase faasilise ümberkristalliseerumine, mis muudab valandite, sepi- ja keevisõmbeluste jämedateralise struktuuri peeneteraliseks.

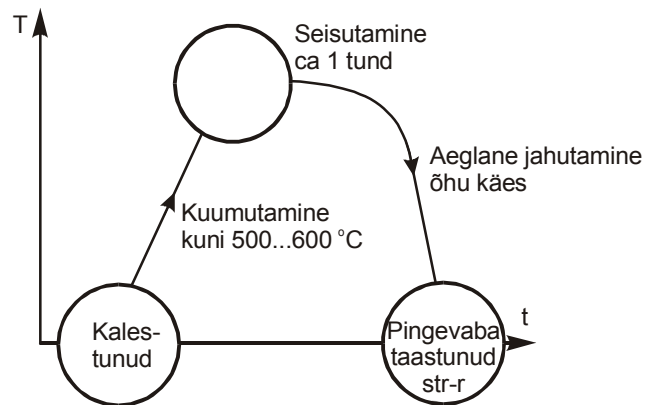
Normaliseerimine on lõõmutusega võrreldes odavam, sest ahju kasutatakse ainult kuumutamiseks ja seisutamiseks antud temperatuuril,



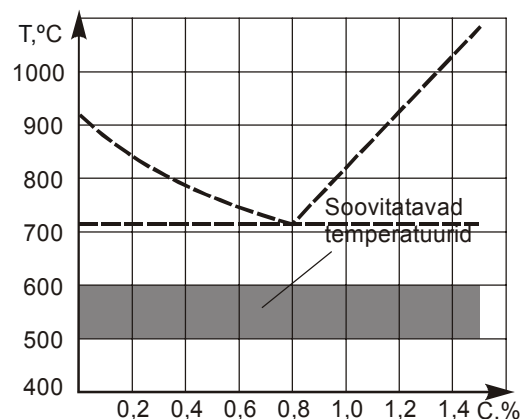
Sele 1.23. Pehmelõõmutustemperatuuri valik



Sele 1.24. Pehmelõõmutamise mõju terase struktuurile ja lõiketööeldavusele



Sele 1.25. Pingetuslõõmutamine



Sele 1.26. Pingetuslõõmutustemperatuuri valik

jahutamine toimub juba õhus.

Normaliseerimise tulemusena muutub teras peeneteralisemaks, tugevus ja kõvadus on suurem kui lõõmutatud terasel. Normaliseerimist kasutatakse terase lõiketöödeldavuse parandamiseks ning sageli karastamise eeloperatsioonina.

Terase karastus

Karastuseks nimetatakse termotötluse viisi, mille tulemusel saadakse ebastabiilne (mittetasakaaluline) martensiitstruktuur, mille kõvadus on suur (kuni 65HRC).

Terase tavakarastamine eeldab järgmisi etappe:

- 1) terase kuumutamine üle faasipiiride A_{c1} (poolkarastus) või A_{c3} (täiskarastus), et tagada lähtestruktuuris vajaliku austeniidi teke;
- 2) seistamine sellel temperatuuril, et tagada kogu detaili ulatuses antud temperatuurile vastava homogeense struktuuri teke;
- 3) jahutamine kiirusega, mis on karastatava terase kriitilisest jahtumiskiirusest suurem, et vältida austeniidi lagunemist (ferriidi ja tsementiidi) teket.

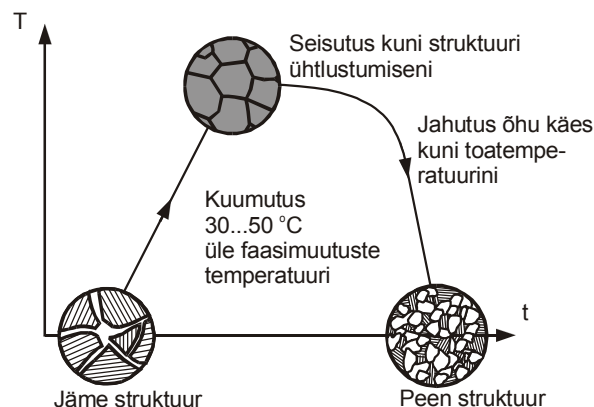
Karastustemperatuur. Süsinikteraste karastustemperatuuri valikul on aluseks Fe-Fe₃C faasidiagrammi teraste osa (sele 1.30). Selle järgi võetakse alaeutektoidteraste (0,2...0,8% C) karastustemperatuur 30...50 °C üle faasipiiri A_{c3} (s.o. täiskarastus), üleutektoidterastel (C > 0,8%) 30...50 °C üle A_{c1} (s.o. poolkarastus).

Alaeutektoidteraste karastustemperatuuri valikul on lähtutud asjaolust, et karastamisel teisiti – üle faasipiiri A_{c1} (s.o. poolkarastus) säilib struktuuris kõrvuti martensiidiga ka ferriit, mis vähendab terase kõvadust pärast karastust.

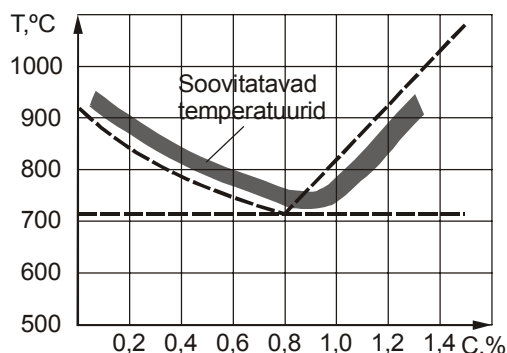
Üleutektoidterastel on seevastu optimaalne karastustemperatuur faasipiiride A_{c1} ja A_{cm} vahel (s.o. poolkarastus), mistõttu säilib struktuuris martensiidi kõrval sekundaarne tsementiit, mis suurendab terase kõvadust; teisiti karastades – üle faasipiiri A_{cm} (s.o. täiskarastus), on oht jämedateralise struktuuri tekke oht; see teeb karastatud terase hapraks.

Jahutuskeskkond. Levinum jahutuskeskkond on vesi. Vee jahutusvõimele avaldavad mõju selles leiduvad lisandid. Nii näiteks destilleeritud vesi või vihmavesi, mis ei sisalda sooli, jahutavad kaks korda aeglasemalt kui kraanivesi. Vees lahustunud gaasid halvendavad vee jahutusvõimet, seetõttu keedetud vesi (või korduvalt kasutatud vesi) võrreldes toorega jahutab intensiivsemalt.

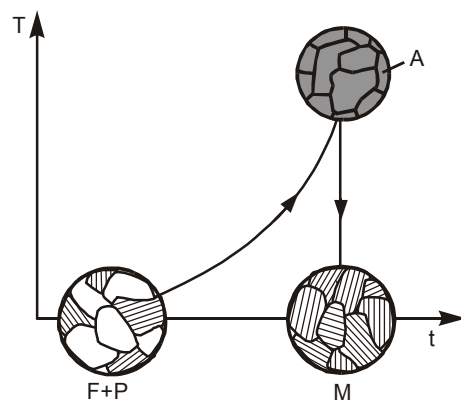
Õli jahutusvõime võrreldes veega on 3...4 korda väiksem. Õli kui karastuskeskkonna eeliseks on tema mittetundlikkus temperatuurile – õli jahutab ühesuguse intensiivsusega nii temperatuuril 20 °C kui ka 150...200 °C. Õli puuduseks on tema tuleohtlikkus (süttimistemperatuur sõltuvalt õli margist on 150...320 °C piires) ja karastusvõime kadumine aja jooksul (õli pakseneb). Peale selle õli põleb ja detaili pinnale moodustub oksiidikile.



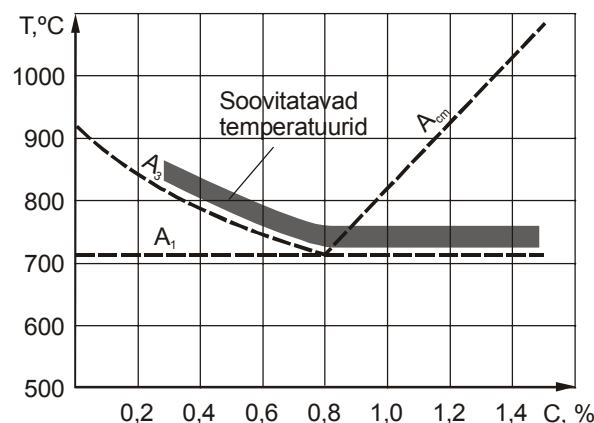
Sele 1.27. Normaliseerimine



Sele 1.28. Normalisatsioonitemperatuuri valik



Sele 1.29. Terasse karastamine



Sele 1.30. Terasse karastustemperatuuri valik

Karastusviisid. Olenevalt terase koostisest, detaili mõõtmetest ja kujust ning termotöödeldud detaililt nõutavaist omadustest tuleb valida optimaalne karastusviis, mis on kõige lihtsamini läbi viidav kuid kindlustab ühtlasi ka vajalikud omadused.

Mida keerukama kujuga on termotöödeldav detail, seda hoolikamalt tuleb valida jahutamistingimused, sest keerukamal detailil on tavaliselt suurem ristlõigete erinevus ning seda suuremad sisepinged tekivad tema jahutamisel.

Mida rohkem sisaldab teras süsinikku, seda suuremad on karastamisel mahumuutused, ning mida madalamal temperatuuril muutub austeniit martensiidiks, seda suurem on oht deformatsioonide, pragude, pingete ja teiste karastusdefektide tekkeks ning seda hoolikamalt peab valima terase jahutamisrežiimi.

Lähtudes jahutuskiirusest ja jahutuskeskkonnast (vesi, õli või kombineeritud moodus – läbi vee õlisse) eristatakse mitmeid karastusviise: tavakarastus, katkendkarastus, astekarastus, isothermkarastus jt.

Tavakarastus e. ühes keskkonnas (vannis) karastus (vees või õlis) on lihtsamaid karastusviise. Vajaliku temperatuurini kuumutatud detail jahutatakse karastusvedelikus kuni täieliku mahajahtumiseni. Seda viisi kasutatakse süsinik- ja legerterastest lihtsate detailide karastamisel.

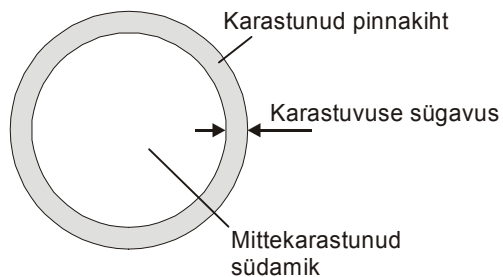
Katkendkarastuse e. kahes keskkonnas karastuse korral jahutatakse detaili alguses kiirelt, seejärel aeglaselt jahutavas keskkonnas. Tavaliselt jahutatakse esmalt vees, et vältida austeniidi lagunemist, seejärel aga õlis või õhus, mis tagab detaili aeglase jahtumise martensiidi tekke piirkonnas. Sellist karastusviisi kasutatakse süsinikterastest tööriistade valmistamisel.

Astekarastuse korral jahutatakse detaili keskkonnas, mille temperatuur on antud terase martensiitmuutuse algtemperatuurist kõrgem.

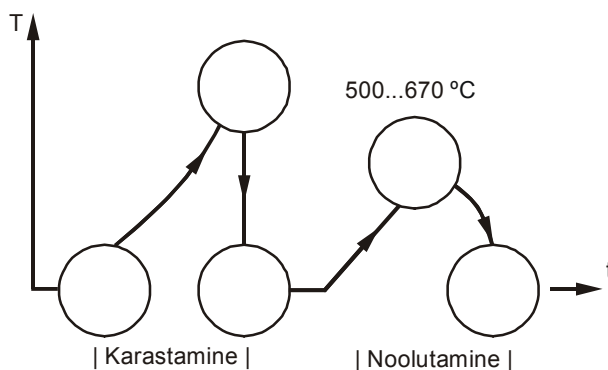
Selles keskkonnas jahutamisel ja seisutamisel peab karastatav detail kogu ristlõike ulatuses omandama karastuskeskkonna temperatuuri. Sellele järgneb lõplik, tavaliselt aeglane jahutamine, mille jooksul tegelikult toimubki karastamine, s.t. austeniidi muutumine martensiidiks.

Isothermkarastuse e. beiniitkarastuse korral jahutatakse terast martensiitmuutuse algtemperatuurist kõrgemal temperatuuril (250...350 °C) seistusega kuni austeniidi lagunemiseni ferriidi ja tsementiidi seguks – beiniidiks.

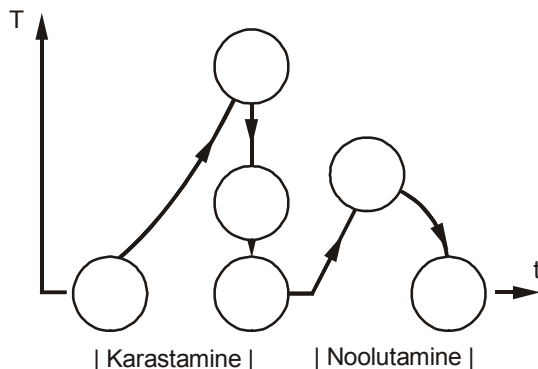
Pindkarastamist kasutatakse selleks, et anda detaili pinnakihi suure kõvaduse, mis annab suure kulumiskindluse; samal ajal säilib sitke südamik, mis ühtlasi tagab detaili vastupanu dünaamilisele koormusele. Sel eesmärgil kasutatakse ka termokeemilist töötlust (tsementiitumist, nitritumist jt.), kuid viimasega võrreldes on pindkarastus märksa kiirem.



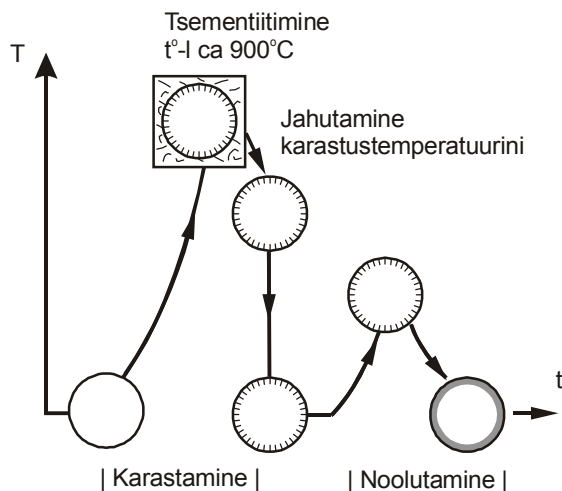
Sele 1.31. Mitteläbikarastunud terasdetaili ristlõige



Sele 1.32. Terasse parendamine



Sele 1.33. Terasse astekarastus



Sele 1.34. Pindkõvendamine tsementiitumisega

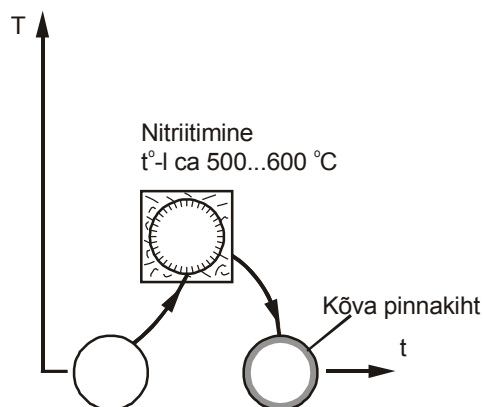
- Pinnakihi kuumutamine võib toimuda
- a) atsetüleenihapnikuleegiga,
 - b) induktsioon- e. kõrgsagedusvooluga,
 - c) elektrolüüdis,
 - d) sulametallis või -soolas,
 - e) laser- või elektronkiirega.

Terase noolutus

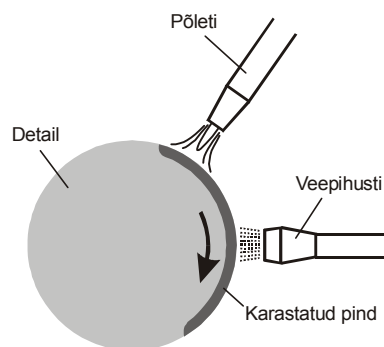
Terase karastamisel, mil austeniit muutub martensiidiks, saavutatakse suur kõvadus – see on ka karastuse põhieesmärk. Ühelt poolt jahtumisel tekkivad termopinged, teiselt poolt martensiidi suur kõvadus tingivad karastatud terase vähese vastupanu löökkoormustele ja deformatsioonidele. Neid omadusi aga on võimalik karastatud terase järgneva töötlemisega – *noolutamisega* – parandada.

Noolutus seisneb terase kuumutamises temperatuurini alates 200 °C, seisutamises sellel (vähemalt tunni) ja jahutamises (tavaliselt õhus). Selline noolutus sobib eriti tööriistaterastele, millelt nõutakse suurt kõvadust. Noolutus tõstab märgatavalt terase sitkust.

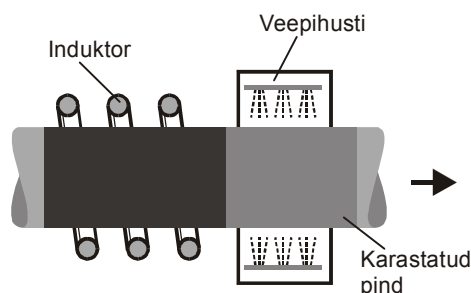
Erinevalt tööriistaterastest (eesmärgiks on maksimaalne kõvadus) püüeldakse konstruktsiooniteraste korral suure sitkuse ja tugevuse poole. See saavutatakse noolutusega suhteliselt kõrgel temperatuuril (450...650 °C, jahutus õhus). Sellist karastust järgneva kõrgnoolutusega nimetatakse *paren-damiseks* (sele 1.32). Saadakse ferriidipõhjal teraline tsementiidi-sakestega struktuur – sorbiitstruktuur. Vedruteraste korral kasutatakse kesknoolutust (300...400 °C), saades elastse troostiitstruktuuri.



Sele 1.35. Pindkõvendamine nitriitimisega



Sele 1.36. Leekkarastamine



Sele 1.37 Induktsioonkarastamine

Malm

Malmideks nimetatakse terastega võrreldes suurema süsinikusisaldusega (üle 2,14%) rauasüsinikusulameid. Malmid liigitatakse süsiniku oleku järgi kahte gruppi:

- 1) malmid, kus kogu süsinik on seotud olekus tsementiidis (Fe_3C). Need on seotud süsinikuga malmid e. *valgemalmid*;
- 2) malmid, kus kogu süsinik või suurem osa sellest on vabas olekus grafiidina. Need malmid on tuntud *grafiitmalmidena* (tuntumad neist on *hallmalmid*).

Suure süsinikusisalduse tõttu on malmi struktuuris kõva ja habras eutektikum – ledeburiit (valgemalmis) või süsinik grafiidina (libleja, keraja või pesajana). Nii ledeburiit kui ka grafiit teevad malmi hapraks, mistõttu ei saa ühtki malmiliiki surve-töödelda – se pistada, valtsida jne. Seepärast kasutatakse malmi valusulamina. Kõige rohkem kasutatakse selleks otstarbeks alaeutektoidse koostisega hallmalmi. Sellisel malmil on suure süsinikusisalduse tõttu terasega võrreldes madalam sulamistemperatuur ja väiksem kristalliseerumise vahemik (seda väiksem, mida lähem on malmi koostis eutektoid). See soodustab valuomadusi: malmil on hea vedeloolavus, väike kahanemine, vähene külgepeõlemine.

Sulamalm võib paljude mõjurite (jahtumiskiirus, keemiline koostis jt.) tõttu kristalliseeruda nii ebastabiilse ($\text{Fe-Fe}_3\text{C}$) kui ka stabiilse (Fe-C) faasidiagrammi kohaselt. Esimesel juhul (lisandite puudumisel ning aeglasel jahtumisel) saame kristal-

liseerumisel valgemalmi struktuuri. Nii saadud valgemalmi kasutatakse enamasti tempermalmi tootmiseks. Teisel juhul (Fe-C faasidiagrammi kohaselt) kristalliseerub grafiit rüni olemasolul vahetult vedelfaasist ja nii saame vaba grafiidiga malmid.

Rohkem kasutatavate malmiliikide (libleja ja keraja grafiidiga malmid, tempermalm) struktuuris on grafiit. Grafiidi tekkimist soodustavad malmi aeg jahtumine (valamine liivsavivormi) ja malmi suur ränisisaldus. Mida rohkem on malmis süsinikku ja rüni, seda rohkem tekib ka struktuuri grafiiti. Malmvalandi jahtumiskiiruse suurenemine aga takistab grafiidi eraldumist mõjutab soodsalt tsementiidi (Fe_3C) tekkimist.

Rüni on malmi tähtsamaid lisandeid, mille toime avaldub nii sulamalmi kristalliseerumisel kui ka faasimuutustel tardolekus. Rüni on põhiliseks elemendiks, mille abil on võimalik saada vajaliku struktuuriga malmi, kuna süsinikusisaldust on võimalik muuta vaid väga vähestes piirides. Kõrgetel temperatuuridel soodustab rüni tsementiidi lagunemist, mille tulemusena tekib grafiit. Sel juhul osutub rüni elemendiks, mis nõrgestab raua ja süsiniku aatomite vahelist sidet nende ühendis – tsementiidis.

Kristalliseerumise käiku on võimalik ka muuta, lisades sulamalmile lisandeid, mis ei lahustu või moodustavad lahustumatuid osi ning osutuvad grafiidi eraldumisel kristalliseerumiskeskmeteks. Selle tulemusena on võimalik saada peenemate grafiidiosakestega tugevamat malmi. Sellist protsessi nimetatakse modifitseerimiseks, lisandeid modifikaatoriteks ja vastavaid malme *modifitseeritud malmideks*.

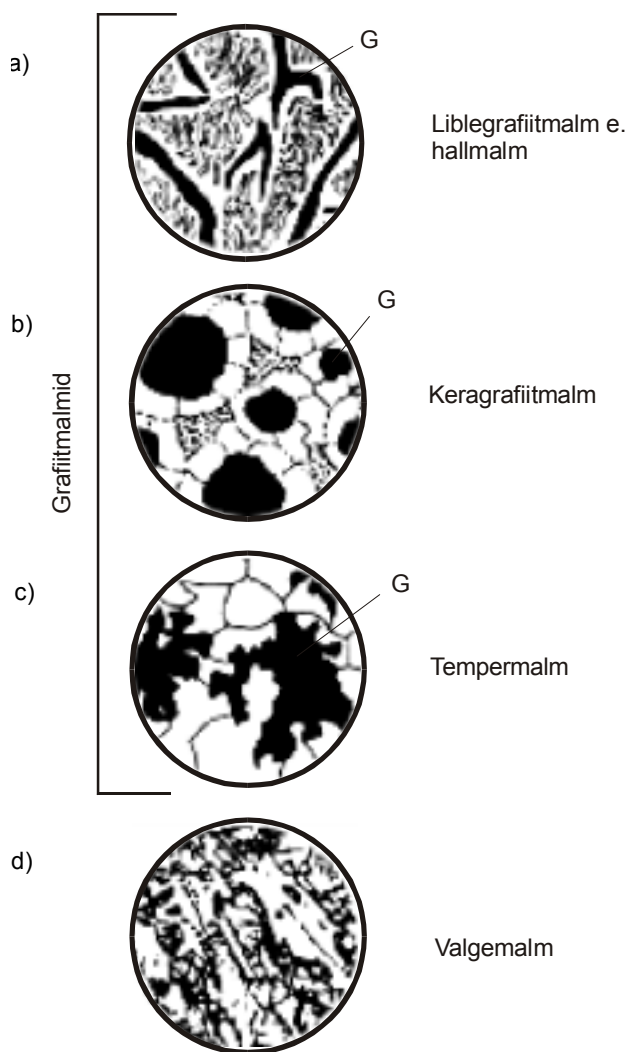
Malmi mehaanilised omadused olenevad suurel määral grafiidiosakeste kujust ja mõõtmetest – mida väiksemad on grafiidiosake-sed, seda paremad on mehaanilised omadused. Teiselt poolt mõjutab omadusi metalise põhimassi struktuur.

Jahtumisel laguneb temperatuuril $727\text{ }^{\circ}\text{C}$ malmi struktuuris olev austeniit ja tekib ferriiditsementiidi segu – perliit. Sõltuvalt malmi keemilisest koostisest, (eelkõige ränisisaldusest) ja jahtumise kiirusest võib malmi metalne põhimass koosneda kas ferriidist, ferriidist ja perliidist või perliidist.

Hallmalm

Tavaliselt on kristalliseerumisel tekkinud grafiit liblejas. Niisuguse grafiidiga malmi tema murdepinna hallist värvusest tulenevalt nimetatakse *hallmalmiks*. Grafiidiosakeste kuju, vaadelduna mikroskoobi all, on esitatud selel 1.38a. Liblegrafiit vähendab malmi tõmbetugevust ning eriti plastsust (katkevenivus A on peaaegu null, sõltumata metalise põhimassi struktuurist). See-eest sõltuvad surve-tugevus ja kõvadus peamiselt metalise põhimassi struktuurist.

Kuna hallmalmi struktuur kujuneb malmi kristalliseerumisel ja valandi jahtumisel vormis, siis on hallmalm kõige odavam ja seda kasutatakse tööstuses laialdaselt.



Sele 1.38. Grafiitmalmide ja valgemalmi struktuur

Grafiidiosakeste kuju mõju malmi tugevusele ja plastsusele

	$R_m, \text{N/mm}^2$	A, %
Liblegrafiit	350	0
Keragrafiit	1000	2...20
Pesagrafiit	800	2...12

Hallmalmi metalne põhimassi struktuur võib olla perliit, perliit+ferriit või ferriit. Vastavalt sellele nimetatakse malmi perliit-, ferriitperliit- või ferriithallmalmiks.

Suurima tugevusega on perliithallmalm (nimetatakse ka kvaliteetmalmiks). Kõigi libleja grafiidiga hallmalmide plastsus (sitkus) on aga väga väike – katkevenivus ei ületa 0,5%.

Keragrafiitmalm

Keraja grafiidiga malmid saadakse sulamalmi modifitseerimisel magneesiumi või tseeriumiga, mida lisatakse 0,1...0,2 massiprotsenti.

Selel 1.38b on näha grafiidiosakeste tüüpiline kuju keragrafiidiga malmis. Metalse põhimassi struktuur võib olla keraja grafiidiga malmil analoogselt liblegrafiidiga malmiga kas ferriit, ferriit+perliit või perliit.

Keragrafiit nõrgestab metalset põhimassi tunduvalt vähem kui pesaline või libeline ja seetõttu on keragrafiidiga malmid heade mehaaniliste omadustega.

Keragrafiidiga malmide plastsus (katkevenivus A 15...20% ferriitsetel, 2...3% perliitsetel malmidel) on tunduvalt suurem kui liblegrafiidiga malmil.

Valgemalm

Kui malmis on grafitiseerivaid lisandeid (näiteks Si) vähe või on jahtumiskiirus suur, siis kulgeb kristalliseerumine ebastabiilse Fe-Fe₃C faasidiagrammi järgi ja grafiiti üldse ei eraldu. Niisugust malmi nimetatakse tema heleda murdepinna pärast *valgemalmiks*. Valgemalmi struktuuris (eelkõige pinnakihi) on palju tsementiiti (peamiselt ledeburiidis) ja seetõttu on valgemalmist valandid suure kõvaduse tõttu raskesti lõiketöödeldavad. Valgemalmi struktuuriga valandeid (sele 1.38d) kasutatakse tehnikas harval vajadusel, näiteks valtsirullide tarvis. Mõnikord peavad detaili teatud kohad olema kõvemad (kulumiskindlamad). Siis jahutatakse metallvormi neid kohti valamisel, et valand seal kiiresti jahtuks ja pinnakihi tekiks valgemalmi struktuur. Sellist malmi nimetatakse *valgendatud malmiks*. Näiteks võivad automootori nukkvõlli nukid olla valgendatud malmist.

Struktuurilt (faasidiagrammi järgi) jagunevad valgemalmid kolme rühma:

- 1) eutektoidsed, C=4,3%, struktuur Le;
- 2) alaeutektoidsed, C<4,5%, struktuur Le+P+T⁺;
- 3) üleeutektoidsed, C>4,3%, struktuur Le+T.

Tabel 1.23. Malmid

Malmi liik ja margitähis	Omadused, min		Kasutusomadused
	R _m N/mm ²	A %	
Liblegrafiitmalm (EN1561)			Head antifrikt-sioonomadused, hea vibratsioonisummutavus ja vastupanu väsimusele
GJL-100	100	-	
GJL-200	200	-	
GJL-350	350	-	
Keragrafiitmalm (EN1563)			Suur tugevus ja sitkus
GJS-350-22	350	22	
GJS-600-3	600	3	
GJS-900-2	900	2	
Tempermalm (EN1562)			Vastupanu dünaamilistele koormustele, kulumiskindlad, keevitavad
GJMB-300-6	300	6	
GJMB-700-2	700	2	
GJMW-350-4	350	4	
GJMW-550-4	550	4	

Tempermalm

Valgemalmide struktuuri kujunemine on jälgitav Fe-Fe₃C faasidiagrammil. Valgemalmi süsinikusisaldusega 2,2...3,0% ja ränisisaldusega 0,7...1,5% kasutatakse *tempermalmist* valandite tootmiseks. Vastav tehnoloogiline protsess seisneb selles, et valgemalmi struktuuriga valandeid lõõmutatakse pikka aega temperatuuril 950...1050 °C. Nendel temperatuuridel koosneb malmi struktuur austeniidist ja tsementiidist. Viimane laguneb pikaajalisel seisutamisel ja tekib vaba süsinik – grafiit. Kuna siin on iseärasuseks grafiidi tekkimine tardolekus, siis on tal ka iseloomulik kuju – pesajas (sele 1.38c). Sellist grafiiti nimetatakse ka lõõmutussüsinikuks ja ta on temperalmi struktuuri iseloomulikumaks tunnuseks.

Kui jahutada malmi mõõduka kiirusega alla 727 °C, laguneb austeniit perliidiks ning saame perliitmalmi; aeglasel jahutamisel temperatuurivahemikus 740...710 °C või seisutamisel temperatuuril 700...710 °C laguneb tekkinud perliidi koostises olev tsementiit. Vastavalt sellele tekib ferriitstruktuuriga metalne põhimass ja saadud malmi nimetatakse ferriitempermalmiks. Toodetakse ja kasutatakse nii perliit- kui ka ferriitempermalmi.

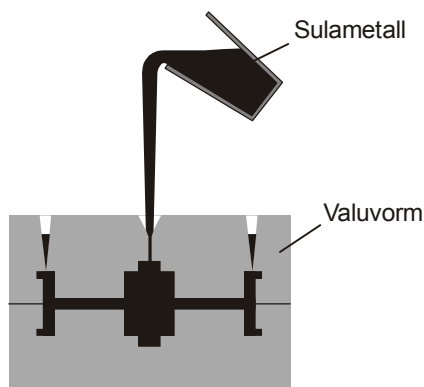
Tempermalmi tugevusomadused on võrreldavad keraja grafiidiga malmi omadustega. Nii tempermalm kui ka keragrafiidiga malm on suhteliselt sitked (vastupidavad löökoormustele), mistõttu neid kasutatakse selliste valandite valmistamiseks, mis töötavad dünaamilisel koormusel.

Kõige paremate plastsusnäitajatega (katkevenivus A on kuni 10...12%) on ferriitempermalm, mis küllaldase tugevuse juures on perliitset tunduvalt sitkem.

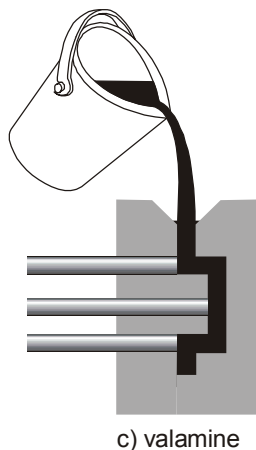
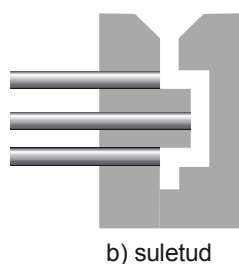
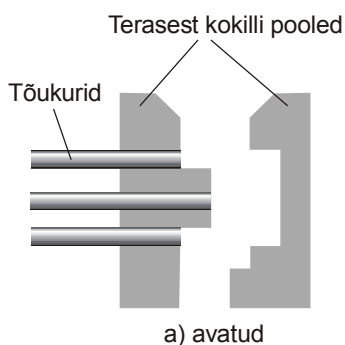
Tempermalmidel on head mehaanilised omadused, kuid vajadus valandeid pikka aega lõõmutada (30...40 tundi ja isegi rohkem) teeb tehnoloogilise protsessi keerukaks ja malmi kalliks. See on tempermalmide suurim puudus. Tavaliselt valmistatakse tempermalmist valandeid seinapaksusega kuni 30...40 mm. Tänapäeval leiavad tempermalmide asemel kasutamist üha enam sulametalli otsemodifitseerimise teel saadud keragrafiidiga malmid.

Malmi valu

Malmi toodetakse kõrgahjudes. Saadakse *toormalm*, mida kasutatakse terase tootmiseks. Malmvalandite valmistamiseks kasutatakse masinaehituses peamiselt hallmalmi, vastutusrikkamate masinaosade korral (vánt- ja jaotusvõllid, hammasrattad, kepsud jms.) kasutatakse aga keragrafiitmalmi ning dünaamilisel koormusel töötavate põllumasinate ja autode osade tarvis ka tempermalmi. Valuvälistest kasutatakse peamiselt liivsavivormi ja metallvormi (kokilli) valu (sele 1.39 ja 1.40)



Sele 1.39. Malmi liivsavivormi valu



Sele 1.40. Malmi kokillivalu

1.2.2. Alumiinium ja alumiiniumisulamid

Alumiinium

Alumiinium on enamlevinumaid elemente maa-koos, kuid olles väga aktiivne hapniku suhtes, esineb ta looduses ühendina. Põhiliselt saadakse alumiiniumi mineraalset – boksiidist. Tootmisprotsess seisneb sellest alumiiniumoksiidi saamises ja järgnevas sulas krüoliidis lahustatud alumiiniumoksiidi elektrolüüsis. Sel menetlusel saadud alumiiniumi puhtus on 99,5...99,8% ja põhilisteks lisanditeks raud, räni ja mangaan. Suurema puhtusega alumiiniumi (kuni 99,9%) saadakse sulaalumiiniumi rafineerimise teel.

Alumiiniumil on rida niisuguseid omadusi (näit. hea korrosioonikindlus, väike tihedus), mis teevad ta äärmiselt kasulikuks tehnomaterjaliks. Puhas alumiinium on küll väga madala tõmbetugevusega, kuid seda saab tõsta külmdelormeerimise (kalestamise) teel või teiste elementidega legerimise teel; tugevus tõuseb märgatavalt (kuni 500 N/mm²-ni). Alumiinium on väga plastne ja vormitav paljude moodustega. Alumiiniumi hea elektrijuhtivus (60% puhta vase elektrijuhtivusest) soosib tema kasutamist paljudes elektrotehnika valdkondades.

Al	
Tihedus ρ	2700 kg/m ³
Sulamistemperatuur T_s	660 °C
Kristallivõre	K12
Tõmbetugevus R_m	Puhas Al 80...135 N/mm ² , sulamid 600 N/mm ²
Joonpaisumistegur	$24 \cdot 10^{-6}$ 1/K
Elektrijuhtivus $1/\rho$	60% IACS ¹⁾
Korrosioonikindlus	Väga hea

¹⁾IACS – rahvusvaheline lõõmutatud vase etalon; näitab elektrijuhtivust vase suhtes (%)

Alumiinium on väga aktiivne hapniku suhtes ja metalli värske pind oksüdeerub kiiresti. Moodustub ainult mõne aatomkihi paksune tihe oksiidikiht, mis kaitseb pinda edaspidise korrosiooni eest. Alumiiniumi hea korrosioonikindlus ongi tingitud sellest oksiidpindest. Alumiiniumi korrosioonikindlust saab tõsta anodeerimisega, mille eesmärgiks on paksema oksiidikihi aga ka kõva pinde saamine.

Kõrge puhtusastmega alumiinium (99,5% Al ja enam) on väikese tugevusega ja teda kasutatakse peamiselt keemia- ja toiduainetetööstuses mahutite ja torustike valmistamiseks. Elektrijuhtmeina kasutatav tehniline alumiinium sisaldab kuni 0,5% rauda, olles tegelikult alumiiniumirauasulam.

Tabel 1.24. Alumiiniumi deformeeritavad sulamid (leht, riba, profiilid)

EN tunnusnr.	Margitähis	Al %	Olek ¹⁾	R _{p0.2} N/mm ²	R _m N/mm ²	A %	HV	Kasutus
Puhas alumiinium								
AW-1050	Al99.5	99,5	L	35	80	42	20	Toiduainetetööstus
			Kal.	105	125	10	36	Pakendimaterjal
AW-1200	Al99.0	99,0	Kal.	115	125	9	38	
Alumiiniumisulamid – mittevanandatavad								
AW-5052	AlMg2.5	97,2	Kal.	200	250	14	75	Plekk keeviskonstruktsioonide tarvis
AW-5083	AlMg4.5Mn	94,6	Kal.	275	360	16	105	
Alumiiniumisulamid – vanandatavad								
AW-2024	AlCu4Mg1	93,4	K+LV	275	430	18	120	Kõrgtugevad lennuki-konstruktsioonid
			K+KV	425	485	12	150	
AW-6082	AlSi1MgMn	97,4	K+LV	170	260	24	75	Kõrgtugevad transpordivahendite konstruktsiooniosad
			K+KV	310	340	11	100	
AW-7020	AlZn4.5Mg1	93,6	K+KV	335	380	13	125	Lennukikonstruktsioonid

¹⁾L – lõõmutatult, Kal. – kalestatult, K+LV – karastatud ja loomulikult vanandatult, K+KV – karastatud ja kunstlikult vanandatult

Tabel 1.25. Alumiiniumi valusulamid

EN tunnusnr.	Margitähis	Al %	Valuviis	Olek ¹⁾	R _{p0.2} N/mm ²	R _m N/mm ²	A %	HB	Kasutus ja omadused
Alumiiniumisulamid – mittevanandatavad									
AC-44100	AlSi12	88	LiV, Ko	VO	90	180	5	55...75	Mitmesugused valandid
AC-51400	AlMg5Si1	94	V	VO	100	170	2	55...75	Hea korrosioonikindlus
			LV, KV						
Alumiiniumisulamid – vanandatavad									
AC-21100	AlCu4Ti	95	LiV	K+KV	260	280	5	90...115	Kõrgtugevad, kuumuskindlad
AC-42100	AlSi7Mg	93	LiV, KoV	K+LV	120	200	8	60...85	Väga head valusulamid
				K+KV	200	250	4	80...110	
AC-71000	AlZn5Mg	93	LiV, KoV	K+LV	180	230	4	70...100	Lennukikonstruktsioonid

¹⁾LiV – liivsavivormivalu, KoV – kokillivalu, VO – valmistamisolekus,

K+KV – karastatud ja kunstlikult vanandatult, K+LV – karastatud ja loomulikult vanandatult

Alumiiniumisulamid võivad olla legeeritud paljude elementidega. Nii saadakse paljusid kasulikke konstruktsioonimaterjale. Alumiiniumisulameid liigitatakse tavaliselt toodete saamise (töödeldavuse) ja termotöötluse alusel.

Toodete saamise (valmistamise) mooduse järgi liigitatakse alumiiniumisulamid kahte gruppi:

- deformeeritavad (survetöödeldavad) sulamid,
- valusulamid.

Lähtudes termotöödeldavusest liigitatakse sulamid samuti kahte gruppi:

- vanandatavad sulamid,
- mittevanandatavad sulamid.

Enamik deformeeritavaid alumiiniumisulameid on vanandatavad, mis läbi saab suurendada nende tugevust ja kõvadust. Deformeeritavatel vanandamise teel tugevdatud alumiiniumisulamitel on väikese tiheduse juures küllaltki suur tugevus, mistõttu sellised sulamid on masina- ja aparaadiehituses teraste järel üks põhilisemaid konstruktsioonimaterjale. Tugevuse tõstmise eesmärgil sulameid karastatakse ja seejärel vanandatakse kas loomulikult (s.o. toatemperatuuril) või kunstlikult (s.o. kõrge temperatuuril). Seejuures saavutatakse tugevus mitte karastamisega nagu terastel, vaid vanandamisega.

Alumiiniumi deformeeritavad sulamid

Deformeeritavad alumiiniumisulamid liigitatakse termotöötluse põhjal järgmiselt:

- sulamid, mida termotöötlusega ei tugevdata (mittevanandatavad);
- termotöötlusega tugevdatavad sulamid (vanandatavad).

Esimesse gruppi kuuluvad eelkõige Al-Mn-, Al-Mg-sulamid, teise Al-Cu-Mg-, Al-Mg-Si-sulamid.

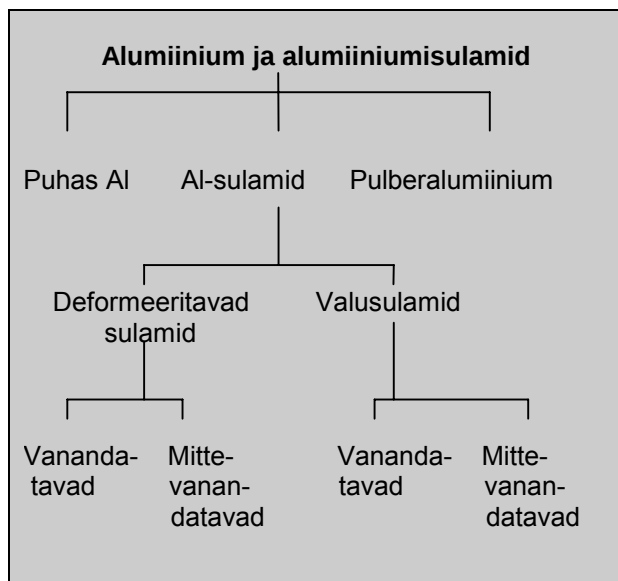
Deformeeritavatest, mittevanandatavatest sulamitest tuntumad Al-Mn- ja Al-Mg-sulamid sisaldavad 1...5% Mn või Mg, olles ca 15% tugevamad puhtast alumiiniumist ja veidi suurema korrosioonikindlusega.

Deformeeritavatest vanandatavatest sulamitest tuntuim on *duralumiinium* (Al-Cu-Mg-sulam), mille termotöötlus on võimalik tänu vase lahustuvuse muutusele alumiiniumis temperatuuri alanedes (väheneb 5,7%-lt 0,2%-ni). Karastamisele järgneva vanandamise tulemusel (sele 1.42) tõuseb duralu-

miiniumi kõvadus ja tugevusnäitajad, vähenevad aga plastsusnäitajad.

Alumiiniumi valusulamid

Alumiiniumi valusulamite tüüpilised esindajad on Al-Si-sulamid - *silumiinid*, mis ei moodusta ega mille koostises ei ole keemilisi ühendeid. Sulamites esineb eutektmuutus temperatuuril 577 °C ja ränisisaldusel 11,7% moodustub eutektikum. Tänu eutektsumi heale vedeloolavusele (Si suurendab ka puhta Al vedeloolavust) kasutatakse sulameid

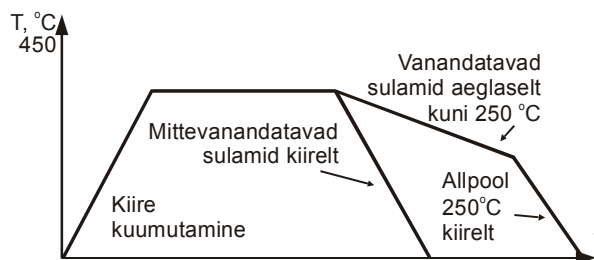


valusulameina, valatuna liivsavi- või metallvormi. Enam kasutatakse Al-valusulameid, mis sisaldavad 10...13% Si, need on eutektkoostisele ligilähedased sulamid. Reeglina on eutektstruktuur jämedateraline, tehes sulami hapraks. Sulami struktuuri peenendamiseks sulameid modifitseeritakse – lisatakse vedelmetalli väikeses koguses (ca 0,01%) naatriumi, mille tulemusena saadakse peeneteraline haprate ränikristallideta struktuur.

Alumiiniumisulamite termotöötlus

Alumiiniumisulamite tugevdamiseks rakendatakse karastamist ja vanandamist, struktuuri ühtlustamiseks ja kalestumise kõrvaldamiseks ka lõõmutamist.

Lõõmutamine. Rakendatakse homogeniseerivat kui ka rekristalliseerivat lõõmutamist. Esimest kasutatakse esmajoones sulami likvatsiooni (metalli kristallide koostise ebaühtluse) kõrvaldamiseks. Lõõmutatakse temperatuuril 450...520 °C kümneid tunde, jahutatakse õhu käes või koos ahjuga. Rekristalliseeriv lõõmutamine viiakse läbi sõltuvalt sulami koostisest temperatuuril 350...500 °C kestusega kuni paar tundi kalestumise kõrvaldamise ja tera peenendamise eesmärgil.



Sele 1.41. Alumiiniumi pehmelõõmutamine

Karastamine seisneb kuumutamises temperatuurini, mil sulamis lisandid lahustuvad alumiiniumis kas täielikult või osaliselt, sellel temperatuuril seistumises ja seejärel kiires jahutamises üleküllastatud tardlahuse saamiseks. Karastamine toimub vees. Pärast karastamist on tardlahuse struktuuriga sulam madalate tugevusomadustega, ent on suure plastsusega.

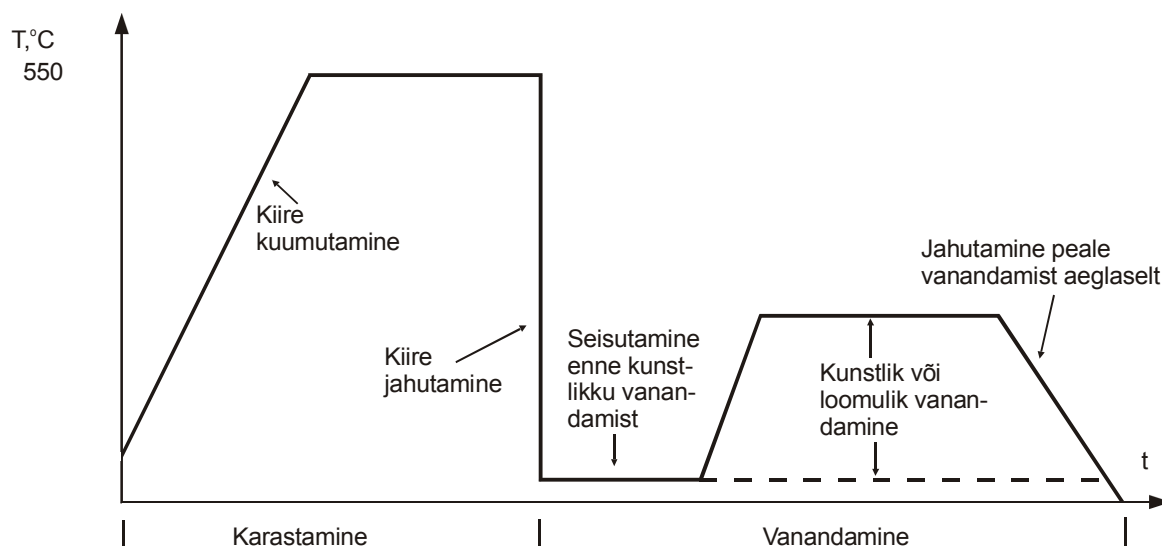
Vanandamine seisneb karastamisele järgnevas seisutamises toatemperatuuril mõne ööpäeva kestel (loomulik vanandamine) või kõrgendatud temperatuuril alates mõnest tunnist (kunstlik vanandamine). Vanandamise käigus toimuvad üleküllastunud tardlahuses muutused (eraldub CuAl_2), mille tulemusena sulam tugevneb. Vanandamisel tõuseb sulami kõvadus, tõmbetugevus ja volavuspiir. Seejuures väheneb aga plastsus ja sitkus.

Tabel 1.26. Alumiiniumisulamite pehmelõõmutus

EN tunnusnr.	$T_{\text{lõõm}}$ °C	Kestus min
AW-1050	380...450	30
AW-1200	380...450	30
AW-2014	380...420	30 (30°/min) kuni 250 °C
AW-5052	380...450	30
AW-5083	410...450	30
AW-6082	380...420	30 (30°/min) kuni 250 °C
AW-7020	400...420	30

Tabel 1.27. Alumiiniumisulamite termotöötlusrežiimid

EN tunnusnr.	T_{kar} °C	Loomulik vanandamine päev	Kunstlik vanandamine	
			°C	min
AW-2024	520±5	5	175±5	6
AW-6082	530±10	2	180±5	5
AW-7020	480±20	30	120±5	24



Sele 1.42. Duralumiiniumi termotöötlus (karastamine + vanandamine)

1.2.3. Vask ja vasesulamid

Vask

Vask on üks vanimaid inimkonnale teadaolevaid metalle, mis sulameina (koos tinaga pronksidena) on olnud kasutusel enam kui 5000 aastat. Tänapäeval on palju väga kasulikke vasesulameid, kuid metalli kõrgest hinnast tingituna on need paljudel juhtudel asendumas odavamate materjalidega nagu alumiinium ja plastid.

Põhilised vasemaagid on kompleksmaagid vask- ja raudsulfididest. Vase tootmine neist toimub sulatusmetallurgia (pürometallurgia) ja elektrometallurgia meetoditega. Sulatuse teel saadakse *toorvaske*, mis sisaldab 98,5...99,5% Cu ja lisandena rauda, väävlit, hapnikku jt. Toorvask rafineeritakse elektrolüütiliselt, mille tulemusena saadakse puhas *elektrolüütiline vask* e. *katodvask* vasesisaldusega 99,2...99,7%.

Lõõmutatud vase elektrijuhtivus ($1/\rho$) temperatuuril 20 °C on $58 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$, mis on võetud elektrijuhtivuse standardväärtuseks ja võrdub 100%-ga IACS järgi (International Annealed Copper Standard).

Puhta vase nagu alumiiniumigi mehaanilised omadused sõltuvad suuresti külmdetormeerimisest ja karestumisest ning metalli järgnevast lõõmutamisest. Lõõmutamisel väheneb tõmbetugevus, suurenevad plastsusnäitajad, aga märgatavalt ka tera suurus. Puhta vase kasutusalaadeks elektrotehnikas on igasugused elektrimähised ja -juhtmed, arhitektuuris pindade katmine, koduses majapidamises, toiduainete- ja keemiatööstuses mitmesuguste nõude ja mahutite valmistamine, soojusvahetid jm.

Vaske legeeritakse mitmesuguste elementidega, saades erisulameid, millistest peamised on:

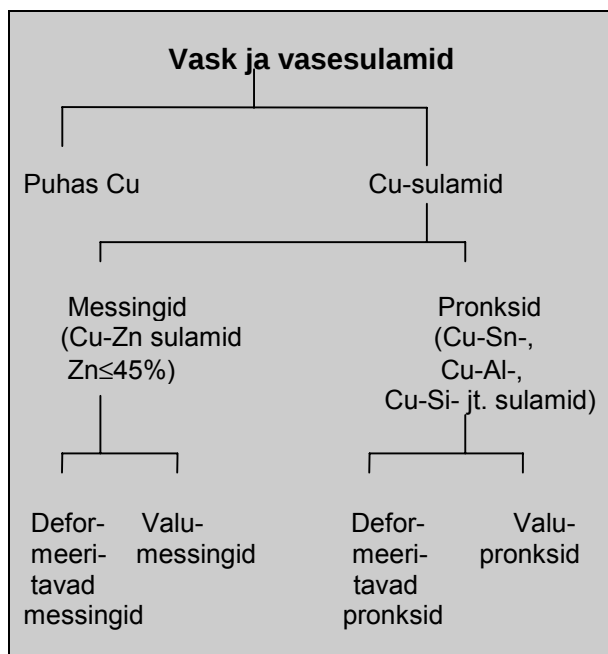
- vasetsingisulamid e. *messingid* (tuntud ka kui valgevased),
- vasetina-, vasealumiiniumi- jt. sulamid e. *pronksid*,
- vaseniklisulamid.

Messingid

Kuna vask annab tsingiga tardlahuse tsingi lahustuvusega kuni 39%, on messingid plastsed ja sobivad külmsurvetöötuseks. Suurema Zn-sisaldusega sulamid on samuti survetöödeldavad, ent seda kõrgematel temperatuuridel. Nad on reeglina ka valatavad.

Tsingi lisamine vasele soodustab sulami tugevuse suurenemist eelkõige tänu tsingi lahustumisele vases; samuti suureneb ka plastsus, mis on eba-harilik. Suure plastsusel sulamina on tuntud 30% Zn-sisaldusega messing, nn *hülsimessing*. Deformeeritavate messingite Zn-sisaldus piirdub tavaliselt 35%-ga. Edasine Zn-sisalduse tõus toob kaasa messingi plastuse vähenemise, kuna struktuuris moodustub väga kõva ja habras faas.

Cu	
Tihedus ρ	8900 kg/mm ³
Sulamistemperatuur T_s	1083 °C
Kristallivõre	K12
Tõmbetugevus R_m	Puhas Cu 200...250 N/mm ² , sulamid 700 N/mm ²
Joonpaisumistegur	$17 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$
Elektrijuhtivus $1/\rho$	$58 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ (100% IACS)
Korrosioonikindlus	Väga hea



Väikestes kogustes Sn ja Al lisamine parandab messingi korrosioonikindlust merevees, Pb lisamine parandab aga löiketöödeldavust. Tuntumad hea survetöödeldavusega messingid sisaldavad 10...20% Zn, hästi löiketöödeldav ja automaadmessingina tuntud sulam sisaldab aga ca 40% Zn ja 1...2% Pb.

Pronksid

Põhilisandi järgi eristatakse tinapronkse, alumiiniumpronkse, ränipronkse, berülliumpronkse jt.

Tinapronkside Sn-sisaldus ei ületa 20%, sest vastasel korral tuleksid struktuuri haprad faasid. Valusulameis tuleb struktuuri mõningal määral habras faas siiski juba alates 5% Sn-sisaldusest. Selline valamisel tekkiv struktuur sobib laagrimaterjalile. Kahefaasiline struktuur on neile sobiv, kuna ühelt poolt tagab laagri hea sissetöötavuse ja vastupanu löökidele ja teiselt – väga kõvad ja haprad osakesed kannavad koormust ja tagavad hea kulumiskindluse. Sulami keemilise koostise ebaühtlus – likvatsioon – on kõrvaldatav pikaajalise lõõmutamisega. Survetöödeldavate sulamite Sn-sisaldus tavaliselt ei ületa 7%. Neid sulameid kasutatakse mitterauasulameist vedrude, müntide ja dekoratiivse pronkspleki valmistamiseks. Fosforit sisaldavaid suurema tugevusega tinapronkse nimetatakse ka *fosforpronksideks*.

Alumiiniumpronkside omadused on analoogsed tinapronkside omadega. Need sulamid on eelkõige ühefaasilised ja hea külmsurvetöödeldavusega, kusjuures kahefaasilisi sulameid kasutatakse eelkõige valatult või kuumsurvetöödeldult. Alumiiniumpronkside peamisteks omadusteks on suurepärane korrosioonikindlus, sealhulgas ka merelistes tingimustes. Neid kasutatakse pleki, soojusvahetite torustiku jms. valmistamiseks.

Tabel 1.28. Vask ja vasesulamid

Nimetus	EN tunnusnr	Margitähis	Koostis %		Olek ¹⁾	Omadused R _m , N/mm ²	Kasutus ja omadused
			Cu	Muu			
Puhas vask							
	CW008A	Cu-OF	99,95	-	L Kal.	220 350	Hea elektrijuhtivus
Messingid							
Tombak	-	CuZn10	90	10 Zn	L Kal.	280 510	Juveelitooted ja dekoratiivtööd
Pooltombak	CW702R	CuZn20	80	20 Zn	L Kal.	310 510	
Hülsimessing	CW702R	CuZn30	70	30 Zn	L Kal.	325 700	Kõrgplastne, nt. mürsukestade valmistamiseks
Automaadi-messing	CW617N	CuZn40Pb2	58	40 Zn 2 Pb	L Kal.	380 590	
Pronksid							
Tinapronks	CC480K	CuSn10-C	90	10 Sn	Val.	280	Liugelaagrid Kõrgtugevad valandid Vedrupronks
Alumiinium-pronks	CC330G	CuAl9-C	91	9 Al	Val.	700	
Berüllium-pronks	CW101C	CuBe2	98	2 Be	K+V	1400	
Vaseniklisulamid							
Mündimelhior	-	CuNi25	75	25 Ni	L Kal.	360 600	Mündimetall
Melhior	CW3544	CuNi30Mn1	69	30 Ni 1 Mn	L Kal.	375 650	Soojusvahetite torud, suurepärane korrosioonikindlus

¹⁾ L – lõõmutatult, Kal. – kalestatult, Val. – valatult, K+V – karastatult ja vanandatult

Alumiiniumpronkse Al-sisaldusega ca 10% kasutatakse laeva sõukruvide, klappide, pumpade jms. merelistes tingimustes töötavate seadmete või nende osade valmistamiseks.

Ränipronksid. Tehnikas kasutatavad ränipronksid sisaldavad tavaliselt 3% Si ja on homogeense ühefaasilise struktuuriga. Enamasti on ränipronksid legeeritud väikestes kogustes Mn-ga (kuni 1%). Ühefaasilisest struktuurist tulenevalt on ränipronksid hästi survetöödeldavad nii külmalt kui ka kuumalt. Ränipronkside omadused on ligilähedased tinapronksidele, ent nad on odavamad, mistõttu neid kasutatakse sageli tinapronkside asemel.

Berülliumpronksid on suurima tugevusega vasesulamid. Sulamid on termotöödeldavad (karastatavad ja vanandatavad) analoogselt Al-Cu-sulameile, mille tulemusena saavutatakse tugevus kuni 1400 N/mm^2 . Enimkasutatav berülliumpronks sisaldab 2% Be. Berülliumpronksi kasutatakse vedrude, membraanide, sädet mitte andvate tööriistade jm. valmistamiseks.

Vaseniklisulamid

Vaseniklisulamid on tugevad ja plastsed ning suurepärase korrosioonikindlusega ja heade elektriliste omadustega.

Cu-Ni-sulamite joonpaisumistegur Ni-sisaldusel 40...50% on nullilähedane, samas elektritakistus aga maksimaalne. Väga väike joonpaisumistegur peaaegu ei muutu kuni temperatuurini 500°C , mistõttu *konstantaanina* tuntud Cu-Ni-sulamid (55% Cu, 45% Ni) kasutatakse elektri- ja täppis-seadmeis, kus esinevad suured temperatuurikõikumised.

Korrosioonikindlad vaseniklisulamid sisaldavad ca 30% Ni ja vähesel määral Fe ning Mn, mistõttu nad on püsivad merevees.

Vaseniklisulam CuNi25 on tuntud mündimetallina – *mündimeliorina*. Teisteks nimetatud vaseniklisulami kasutusvaldkondadeks on soojusvahetid jms. Tsingi lisamisel Cu-Ni-sulamitesse saadakse sulam (45...75% Cu, 10...20% Ni, 20...35% Zn), mis on tuntud *uushõbedana* e. *alpakana*. Uushõbe on väga plastne sulam, mille põhiline kasutusvaldkond on juveelitööstus.

1.2.4. Nikkel ja niklisulamid

Nikkel

Puhas nikkel on plastne hästi töödeldav metall. Suur osa niklist (u. 15% kogu kasutatavast niklist) kasutatakse legeeriva elemendina terastes ja malmides, aga ka mitterauasulamites. Niklit kasutatakse ka puhta metallina ja ta on paljude tehnomaterjalide põhikomponent.

Puhas nikkel on väga hea korrosioonikindlusega aluste ja hapete suhtes, seetõttu kasutatakse teda keemiatööstuse seadmeis ja toiduainetööstuses. Niklit kasutatakse sageli õhukese lehena süsinikterasest pleki katmisel aga ka elektrolüüt-

pindena paljude teiste metalsete materjalide puhul (nikeldamisel).

Niklisulamid

Kuigi niklil on suurepärane korrosioonikindlus, on see veelgi parem vase, kroomi või molübdeeniga legeeritud niklisulamil. Parima korrosioonikindlusega on Ni-Cu-sulamitest tuntud *monelmetall*, milles nikli ja vase vahekord on 2:1. Monelmetalli head omadused ilmnevad eriti merevees. Lisaks korrosioonikindlusele iseloomustab monelmetalli ka hea tugevus ja sitkus, need säilivad laias temperatuurivahemikus: ta ei muutu hapraks madalatel temperatuuridel ja tugevusomadused säilivad ka suhteliselt kõrgetel temperatuuridel (kõrgematel kui messingitel).

Ni-Cr-sulamid on tuntud eelkõige kuumuspüsivate materjalidena, mida suure elektritakistuse tõttu kasutatakse palju kütteelementides. *Nikroomina* tuntud materjalid sisaldavad 80...60% Ni ja vastavalt 20...40% Cr. Co, Ti ja Al-ga täiendavalt legeeritud Ni-Cr-sulamid on tuntud *nimonikidena*, mida kasutatakse kuumustugevate sulamitena gaasitruubiinide ja muude kõrge temperatuuril töötavate masinaosade materjalina. Eriti kuumuspüsivad ja kuumustugevad Ni-sulamid on lisaks kroomile legeeritud rauaga, mis on tuntud *inkonelli* ja *inkolloina*. Samasse gruppi kuuluvad ka lisaks rauale molübdeeniga legeeritud Ni-sulamid, mida nimetatakse *hastelloidideks*.

Ni	
Tihedus ρ	8900 kg/m^3
Sulamistemperatuur T_s	1455°C
Kristallivõre	K12
Tõmbetugevus R_m	Puhas Ni $270...700 \text{ N/mm}^2$, sulamid 1500 N/mm^2
Joonpaisumistegur	$13 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$
Elektrijuhtivus $1/\rho$	ca 25% IACS
Korrosioonikindlus	Väga hea

Eelpooltoodud sulamid (inkonell, hastelloi ja nimonik), mis on eelkõige ette nähtud tööks kõrgetel temperatuuridel, on tuntud ka *supersulamena*. Nende kasutus on eelkõige seotud reaktiivlennukite ja kosmosetehnikaga.

Tabel 1.29. Niklisulamid

Sulami nimetus	Koostis, %	R _m N/mm ²	Kasutus
Monelmetall	60 Ni 30 Cu 3 Fe jm	1400	Keemiatööstuse seadmed
Nikroom	80 Ni 20 Cr	L 700 ¹⁾ Kal. 1250	Kütteelementide materjal
Nimonik 75	77 Ni 20 Cr 2,5 Fe jm.	800	Termopaaride ümbrised, gaasiturbiinide labad
Inkonell	80 Ni 14 Cr 2 Fe jm.	-	Keemiatööstuse seadmed, kuumutuselementid
Hastelloi	55 Ni 17 Mo 15 Cr 5 Fe 5 W jm	800	Keemiatööstuse seadmed

¹⁾L – löömutatult, Kal. - kaldestatult

1.2.5. Titaan ja titaanisulamid

Titaan on üks levinumaid elemente looduses. Tema suhteline sisaldus maakoos on ca 0,6%; see on vähem ainult alumiiniumi (7,5%), raua (4,2%) ja magneesiumi (2,1%) sisaldusest. Kõiki teisi tehnikas kasutatavaid metalle, sh. ka ammu kasutusel olnuid (Cu, Pb, Zn, väärismetallid jt.) leidub looduses titaaniga võrreldes oluliselt väiksemas koguses.

Titaanil on suhteliselt väike tihedus (1,7 korda väiksem kui raual). Titaani tugevus ja kõvadus sõltuvad suurel määral ta puhtusest. Kõik lisandid, eriti lahustunud gaasid ja süsinik suurendavad oluliselt tugevust ja kõvadust.

Toatemperatuuril tekib titaani pinnal väga tihe ja inertne TiO₂ kiht, mistõttu nii titaan kui ka ta sulamid ei korrodeeru atmosfääris, mage- ja merevees, peaaegu üheski orgaanilises ega ka paljudes anorgaanilistes hapetes, leeliste lahustes. Nad on vastupidavad kavitatsioonile ja pingekorrosioonile. Metalsetest lisanditest avaldavad titaanisulamite tugevusele olulist mõju tina, alumiinium ja vanaadium, mistõttu kasutatakse neid titaanisulameis legeerivate elementidena.

Vaatamata titaani polümorfismile ja sellega seotud lisandite lahustuvuse muutusele mõjutab titaanisulamite termotöötlus (karastamine) mehhaanilisi omadusi vähem kui nende legeerimine.

Puhas titaan ja titaanisulamid on plastsed ning kergesti külmalt deformeeritavad; kuumsurvetöötlemisel tuleb aga kasutada toorikute kuumutamisel ahjudes kaitsekeskkonda (tavaliselt argoon). Samuti saab titaani keevitada ainult argooni keskkonnas. Õhus muutub kuum keevisõmblus hapraks hapniku ja lämmastiku lahustumise tõttu selles. Titaanisulamitest valandite saamine on seotud raskustega ja seda mitte ainult vajadusest metalli sulatada kaitsekeskkonnas (veel parem vaakumis), vaid ka

seetõttu, et sulametall reageerib energiliselt peaaegu kõikide vormimaterjalidega (ainukesena sobib selleks tsirkooniumoksiid).

Titaanisulameid kasutatakse rohkesti (tänu nende suurele eritugevusele) lennukiehituses. Kõrge korrosioonikindlus teeb nad heaks materjaliks laevaehituses, toiduainete- ja keemiatööstuse seadmes ning meditsiinis (kirurgiliste implantaatide valmistamiseks).

Ti	
Tihedus ρ	4500 kg/m ³
Sulamistemperatuur T _s	1660 °C
Kristallivõre	K8
Tõmbetugevus R _m	Puhas Ti 200...300 N/mm ² , sulamid 1200 N/mm ²
Joonpaisumistegur	8,5·10 ⁻⁶ 1/K
Elektrijuhtivus 1/ρ	15% IACS
Korrosioonikindlus	Suurepärane

Tabel 1.30. Titaanisulamid

Margitähis	Koostis %, max		Omadused, min	
	Ti	Muu	R _{p0.2} N/mm ²	R _m N/mm ²
Ti2 (puhas Ti)	99,5	-	240	340
Ti2Pd	99,5	0,2 Pd	215	340
TiAl6V4	90	6,7 Al 4,5 V	900	1000
TiAl6V6Sn2	87	6 Al 6 V 2,5 Sn	965 (max 1200)	1030 (max 1200)

1.2.6. Magneesium ja magneesiumisulamid

Magneesiumi iseloomustab väike tihedus ja madal sulamistemperatuur, suur kalduvus kalustumisele plastsel deformatsioonil, mistõttu ta tugevus ei sõltu ainult puhtusest (nagu titaanil), vaid ka mikrostruktuurist. Õhus kuumutamisel süttib magneesium kergesti, mistõttu teda kasutatakse pürotehnikas ja keemiatööstuses. Korrosioonikindluse poolest jääb magneesium alla alumiiniumile, kuna magneesiumi pinnal tekib oksüüdikiht on põhismetallist tihedam ja kergesti pragunev. Magneesium on hästi lõiketöödeldav ja keevitav, kuid ta pole nii plastne ja ka nii hästi külmsurvetöödeldav kui alumiinium.

Magneesiumisulameid legeeritakse alumiiniumiga, tsingiga, mangaaniga ja tsirkooniumiga. Tehnikas kasutatavad magneesiumisulamid on kas hästi kuumvormitavad või valatavad: selle järgi liigitatakse magneesiumisulamid deformeeritavaks ja valusulameiks.

Magneesiumi deformeeritavad sulamid kuuluvad madaltugevate sulamite gruppi, kuid nad on hea plastisusega, keevitavad ja korrosioonikindlad. Magneesiumisulameid kasutatakse tänu suurele eri-

tugevusele lennukiehituses, rattavelgede materjalina jm. Neist valmistatakse kuumvaltsimise teel profile, latte jms., sepiiseid ja stantsiseid.

Mg	
Tihedus ρ	1700 kg/m ³
Sulamistemperatuur T_s	649 °C
Kristallivõre	H12
Tõmbetugevus R_m	Puhas Mg 80...180 N/mm ² , sulamid 350 N/mm ²
Joonpaisumistegur	25·10 ⁻⁶ 1/K
Elektrijuhtivus 1/ ρ	15% IACS
Korrosioonikindlus	Väga hea

Tabel 1.31. Magneesiumisulamite koostis

Margitähis	Koostis %, max		
	Al	Mn	Zn
MgMn2	-	2	-
MgAl3Zn	3	0,4	1,5
MgAl6Zn	6	0,4	1,5
MgAl8Zn	8	0,3	0,8
MgAl9Zn1	9	0,2	1

Tabel 1.32. Magneesiumisulamite tugevusomadused

Margitähis	Olek ¹⁾	Omadused, min		
		$R_{p0,2}$ N/mm ²	R_m N/mm ²	A %
MgMn2	valtsitud	145	200	1,5
MgAl3Zn	valtsitud	155	240	10
MgAl6Zn	valtsitud	195	270	8
MgAl8Zn	pressitud, KV	215	310	6
	valatud, Ho	90	240	8
MgAl9Zn1	valatud, Ho	110	240	6
	KV	150	240	2

¹⁾KV – kunstlikult vanandatult,
Ho – homogeniseeritult

Magneesiumi valusulamid on hea vedelvoola- vusega, mis tagab valandite suure tiheduse ja korro- sioonikindluse. Sulamid on kuumustugevad: nad võivad töötada pikaajaliselt temperatuuril 250 °C, lühiajaliselt ka 350 °C juures. Valusulamite mehaa- nilised omadused sõltuvad suuresti sulami struktuu- rist: mida peeneteralisem on valand, seda paremad on omadused.

Magneesiumisulamite valamisel tuleb raken- dada meetmed metalli süttimise vältimiseks. Sulatus tehakse raudtiiglitest rübukihi all, metalli valamisel puistatakse sellele väävlipulbrit, mis moodustab väävelgaasi ja hoiab ära metalli süttimise.

1.2.7. Tsink, plii, tina ja nende sulamid

Tsink, plii ja tina on heade tehnoloogiliste omadus- tega (madal sulamistemperatuur, head valuoma- dused), mis soodustavad nende kasutamist valu-

sulameina, laagrimaterjalina, joodisena ja mujal, kus on tähtis madal sulamistemperatuur.

Tsink

Tsinki kasutatakse laialdaselt teraste antikorrosioon- pinnetena (katuseplekk, veetorud). Kontaktis tera- sega moodustab ta galvaanilise paari ja, olles anoo- diks, lahustub, kaitstes sellega terast korrosiooni eest.

Plii

Plii neelab hästi röntgenkiirgust, summutab vibrat- siooni ja heli, on kõrgplastne, märgab hästi teisi metalle (katab hästi teiste metallide pinda), on korrosioonikindel väävelhappes, kus lahustuvad pal- jud roostevabad terased ja titaan. Pliid kasutatakse suurtes kogustes akumulaatorite, haavlite, kuulide jms. valmistamisel. Varem nimetati pliid ka sea- tinaks.

Tina

Tina (vananenud nimetus inglistina) on asendamatu nn. valgepleki tootmisel, millest valmistatakse konservipurke. Võib öelda, et konservitööstuse areng algas XIX sajandi algusest, millal avastati, et tinaga kaetud raudplekist purgid lubavad säilida toiduained väga kaua (on näiteid, et lihakonservid nendes pole riknenud viiekümne ja enama aasta jooksul). Samal otstarbel kasutatakse tina toidu- nõude, aparaatide ja torustike katmisel. Plii selleks ei sobi, sest moodustab toksilised ained.

Zn	
Tihedus ρ	7100 kg/m ³
Sulamistemperatuur T_s	419 °C
Kristallivõre	H12
Tõmbetugevus R_m	Puhas Zn 120...250 N/mm ² , sulamid 350 N/mm ²
Joonpaisumistegur	39,5·10 ⁻⁶ 1/K
Elektrijuhtivus 1/ ρ	30% IACS
Korrosioonikindlus	Hea

Pb	
Tihedus ρ	11300 kg/m ³
Sulamistemperatuur T_s	327 °C
Kristallivõre	K12
Tõmbetugevus R_m	Puhas Pb 15...50 N/mm ² , sulamid 75 N/mm ²
Joonpaisumistegur	29·10 ⁻⁶ 1/K
Elektrijuhtivus 1/ ρ	1400% IACS
Korrosioonikindlus	Väga hea

Sn	
Tihedus ρ	7300 kg/cm ³
Sulamistemperatuur T_s	232 °C
Kristallivõre	Tetragonaalvõre
Tõmbetugevus R_m	Puhas Sn 10...12 N/mm ² , sulamid 115 N/mm ²
Joonpaisumistegur	23·10 ⁻⁶ 1/K
Elektrijuhtivus 1/ ρ	800% IACS
Korrosioonikindlus	Väga hea

Tabel 1.33. Tsingisulamid

Margitähis	Koostis %	Omadused, min		Kasutus
		R_m N/mm ²	A %	
ZnAl4 (valusulam)	96 Zn 4 Al	250	3...6	Hüdripidurite, karburaatorite, spidomeetrite, aparaatide jms. korpused
ZnAl4Cu1 (valusulam)	95 Zn 4 Al 1 Cu	280	2...5	Hüdripidurite, karburaatorite, spidomeetrite, aparaatide jms. korpused
ZnAl10Cu5 (deformeeritav sulam)	85 Zn 10 Al 5 Cu	350	4	Valatud laagrid ja püksid

Babiit

Plii ja tina on peale malmi ja pronksi leidnud kasutamist laagrimaterjalina, eelkõige kergsulavate *babiitide* valmistamisel. Babiidid on laagrisulamid, mis sisaldavad peale põhiosise (tina või plii) lisandina antimoni, vaske jm. elemente. Babiidi teeb sobivaks laagrimaterjaliks eelkõige tema iseloomulik struktuur – kõvad kristallid pehmes metalses põhimassis, mis tagab analoogselt laagripronksidele hea sisetöötavuse ja kulumiskindluse ning väikese hõõrdeteguri.

1.2.8. Metallide markeerimine

Eri riikides on metallide *marginähistus* erinev, markeerimissüsteem on määratletud vastava riigisisese standardiga (näit. Venemaal GOST, Saksamaal DIN, Rootsis SS, Soomes SFS). Ent nüüd on olemas ka rahvusvahelised eurostandardid (EN), mis kehtivad kõigis Euroopa Liidu riikides ja laiemaltki. Eurostandardite hulk suureneb jõudsalt ja neid kehtestatakse järjepidevalt riikide (rahvuslike) standarditena. Nõnda toimitakse ka Eestis, sh. metallide markeerimist sätestavate eurostandarditega.

Metallsete materjalide (teras, malm, mitteraudmetallid ja mitterauasulamid) Euroopa markeerimissüsteemi järgi, mis suures osas põhineb Saksa DIN-standarditel, kasutatakse kahte tähistust:

- materjali marginähist,
- materjali tunnusnumbrit.

Teraste marginähistus

Teraste *marginähistussüsteem* põhineb nende kasutusala, mehaaniliste ja füüsikaliste omaduste ning keemilise koostise iseloomustamisel ja selle sätestab eurostandard EN10027.

Kasutusala järgi on teraste marginähiste põhilised sümbolid:

- S – ehitusteras,
- P – surveotstarbeline teras,
- L – torujuhtmeteras,
- E – masinaehitusteras,
- B – betooniteras (sarrusteras),
- Y – eelpingestatav betooniteras (sarrusteras),
- R – relsiteras,
- M – elektrotehniline teras jt.

Sümbolile järgneb number, mis näitab minimaalset voolavuspiiri R_{eH} või R_{eL} , N/mm² (S-, P-, L-, E- ja B-teraste puhul, näit. S355), minimaalset tõmbetugevust R_m (Y- ja R-terased, näit. R880) või magnetomadusi iseloomustavad numbrid ja tähised (M-teraste korral).

Keemilise koostise järgi markeeritavate teraste marginähiste põhilised sümbolid on:

- mittelegeerteraste korral – C, millele järgneb C-sisaldust sajandikes protsentides näitav number (näit. C45).
- madal- ja kesklegeerteraste korral (legeeriva elemendi sisaldus alla 5%) korral:
 - arv, mis näitab C-sisaldust, korrutatuna 100ga,
 - legeerivate elementide keemilised sümbolid sisalduse alanemise järjestuses,
 - legeerivate elementide protsentuaalne sisaldus korrutatuna järgmise kordajaga:

Legeeriv element	Kordaja
Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4
Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr	10
Ce, N, P, S	100
B	1000

Näit. 28Mn6 (28 - C %x100, Mn 1,5 %)

- kõrglegeerteraste korral (legeeriva elemendi sisaldus $\geq 5\%$)
 - täht X,
 - C-sisaldus x 100 näitav arv,
 - legeerivate elementide keemilised sümbolid sisalduse alanemise järjekorras,
 - legeerivate elementide sisaldust näitavad numbrid;

näit. X12CrNi18-10 (0,12% C, 18% Cr, 10% Ni)

Teraste *tunnusnumbrite süsteem* põhineb Saksa DIN-standardist pärit tunnusnumbrite süsteemil. Tunnusnumber on kuni 7-positsiooniline:

1. XX XX (XX)
Materjali grupp: 1-teras
Terase grupi nr.
Jrk. nr. grupis
Lisanumbrid (jäetakse sageli ära)

Malmide margitähistus

Malmide *margitähistussüsteemi* kohaselt on malmide margitähiste sümbolid:

GJL – liblegrafiitmalm (hallmalm),

GJS – keragrafiitmalm,

GJM (GJMB, GJMW) – tempermalm.

Sümbolile järgnevad numbrid, mis näitavad minimaalset tõmbetugevust R_m , N/mm² (hallmalmid, näit. *GJL-200*) või tõmbetugevust R_m , N/mm² ja katkevenivust A, % (keragrafiit- ja tempermalmid, näit. *GJS-600-3*).

Malmide *tunnusnumbrite süsteem* on järgmine:

Hallmalmid – JL1010...JL1060 või

JL2010...JL2060 (markeerimisel kõvaduse HB järgi)

Keragrafiitmalmid – JS1015...JS1090 või

JS2010...JS2090 (HB järgi)

Tempermalmid – JM1010...JM1050 (valged)

JM1110...JM1200 (mustad)

Mitteraudmetallid ja mitterauasulamid

Mitteraudmetallide ja mitterauasulamite Euroopa margitähistused koosnevad keemiliste elementide sümbolitest ja numbritest järgmise süsteemi kohaselt.

Esimesel kohal on tähises põhikomponendi sümbol:

Al – alumiinium ja alumiiniumisulamid,

Cu – vask ja vasesulamid,

Ni – nikkel ja niklisulamid jne.

Puhta metalli puhul järgneb elemendi sümbolile selle metalli sisaldus protsentides (näit. *Al 99,9*).

Sulamite margitähises näitavad põhikomponendi sümbolile järgnevad sümbolid lisandeid ja numbrid nende sisaldust protsentides (näit. *AlSi11, CuZn38Pb2*).

Margitähise ees olevad tähed näitavad puhta metalli või sulami otstarvet (kasutusala):

W margitähise ees – deformeeritav sulam (AW – deformeeritav alumiiniumisulam, CW – deformeeritav vasesulam); C margitähise ees – valusulam (AC – alumiiniumi valusulam, CC – vase valusulam).

Alumiinium ja Al-sulamid

Alumiiniumi ja alumiiniumisulamite margitähistus põhineb Saksa tähistussüsteemil, numbrisüsteem ja oleku tähistus aga rahvusvahelistel ISO-standarditel.

Näiteid:

	Margitähis	Numbritähis
Deformeeritav alumiinium	AW-Al 99,6	AW-1060
Deformeeritavad sulamid	AW-AlCu4Mg1	AW-2024

Valualumiinium	AC-Al99,5	AC-10500
Valusulamid	AC-AlSi11	AC-44000

Vask ja Cu-sulamid

Margitähistus põhineb standardil ISO1190-1, numerdussüsteem eurostandardil EN1412-1, materjali olekut näitav tähis EN1173.

Näiteid:

	Margitähis	Numbritähis
Deformeeritav vask	Cu-0F	CW009A
Deformeeritavad vasesulamid	CuZn37	CW508L
Valuvask	Cu-C	CC040A
Valusulamid	CuSn10-C	CC480K

Teraste markeerimise muud süsteemid

Joonistel ja tehnodokumentides kohtab metallide markeeringut ka teiste standardite kohaselt – näiteks Saksamaa, Venemaa, Rootsi või mõne muu riigi standardi (rahvusliku standardi) järgi. Mõnikord on tegu tootjafirma enda kehtestatud standardivälise märgistusega (kaubamärgiga): näit. Soome firma Rautaruuki RAEX-ehitusterased või Saksamaa Böhleri terased. Sel puhul võib firmakataloogist tavaliselt siiski leida ka standardijärgse margitähise. Ameerika Ühendriikidest või Jaapanist pärit metalltoodete (peam. autode varuosade) materjal on enamasti markeeritud vastava tööstusharu normide järgi: Ameerika Ühendriikide korral levinumalt ASME või SAE standardite järgi.

Kõige süsteemsemaks võib pidada Saksa- maa pika traditsiooniga DIN-standardideid. Terasi markeeritakse nende järgi kahel viisil: tunnusnumbriga või margitähisega. *DIN-i tunnusnumbrite süsteem* oli aluseks vastavale EN- standardile ja langeb niisiis sellega kokku. Pisierinevusi on vaid lõpptöötuse märkimisel. *Margitähis* koosneb tähtedest ja numbritest, mille järgi saab määratleda terase keemilist koostist (ka kvaliteeti) või mehaanilisi omadusi. Näiteks kõrglegeeritud roostevaba terase margitähis: *DIN 17440 – X10 CrNiTi18 10*. Ehitus- ja konstruktsiooniteraste puhul määratlevad numbrid materjali tugevuse (näit. mittelegeerehitusteras: *DIN EN 10025 – Fe490-2*). DIN- või DIN EN-standardite järgi markeerimist rakendavad ka mitmed metalli tarnijad väljaspool Saksamaad.

Venemaa teraste puhul kehtib enamikule teraseliikidele igaühele oma riiklikud standardid (*GOST* või *GOST-R*), mis määratlevad margitähise ja ühtlasi konkreetse terase keemilise koostise või mehaanilised omadused. Sellised standardid on olemas süsinik- ja legeerkonstruktsiooniteraste, vedruteraste, tööriistateraste, valuteraste jt. kohta. Mõned viimase aja *GOST*-id (näit. ehitusteraste puhul) on osaliselt ühtlustatud EN või ISO standarditega.

Rootsi *SS-standardite* järgi on terastel kuuekohaline, standardi numbriga ühilduv margitähis. Margitähise 2 esimest numbrit näitavad, millise materjaliga on tegemist. Metalliliste materjalide puhul on see 14, mis üldiselt jäetakse märkimata.

Soome *SFS-standardite* kohaselt on terased markeeritud margitähisega, millele tavaliselt lisatakse vastava teraseliigi standardi järgi selle margi standardinumber. Margitähised ise on põhisosad analoogsed DIN-standardites esitatavatega, terase standardinumber aga võimaldab vajadusel leida lisaandmeid omaduste (näit. keevitatavuse) või kvaliteedinäitajate kohta.

Praktikas on sageli vaja mingi standardi kohasele terase margile leida eurostandardiga või mõne riigi standardiga määratletud analoogiline terasemark. Seda saab teha *margivastavustabelite* abil, mida võib leida kirjandusest, tootekataloogidest või muudest infoallikatest. Ent tuleb silmas pidada, et sellised margiasendused on tihti ligilähedased ja analoogmargid ei pruugi olla täpselt ühesuguste omadustega.

1.3. Mittemetalsed materjalid

1.3.1. Tehnoplastid

Üldist

Plastitööstus areneb kiiresti ja praeguste teadmiste juures on traditsioonilised materjalid nagu puit, klaas ja paljud metallid edukalt asendatavad plastidega. Plastide kasutusala laieneb üha.

Plastid on polümeermaterjalid, mille põhikomponent on polümeerid. Mitmekomponentse süsteemina sisaldavad need põhipolümeerile lisaks mitmeid lisandeid ja abiaineid, mille ülesanne on polümeeride tehnoloogiliste ja talitlusomaduste mitmekesistamine:

- füüsikaliste, mehaaniliste või elektriliste omaduste modifitseerimine,
- termo- ja valguskindluse suurendamine,
- hinna alandamine,
- värvuse, läbipaistvuse jt. optiliste omaduste muutmine,
- töödeldavuse parandamine.

Põhilisteks lisa- ja abiaineteks on täiteained, plastifikaatorid, stabilisaatorid, määrdeained ja värvained.

Polümeerid kui plastide põhikomponendid on kõrgmolekulaarsed ühendid, milles makromolekul on ehitatud madalamolekulaarsetest ühenditest – monomeeridest, mis on ühendatud keemilise sidemega.

Põhjusi, miks plaste kasutatakse on mitmeid:

- madalam töötlemistemperatuur kui metallidel ja keraamilal, seega madalm energiakulu,
- nad on kergemad (mahu ja massi suhe on polümeermaterjalide kasuks),
- viimistlemise minimaalne vajadus, toote odavus,
- hea töödeldavus,
- korrosioonikindlus,
- hea tugevuse ja tiheduse suhe (eritugevus),

- plastid tagavad ühtlaselt vaikse töö ja müra summutuse,
- nad on head elektri- ja soojusisolaatorid.

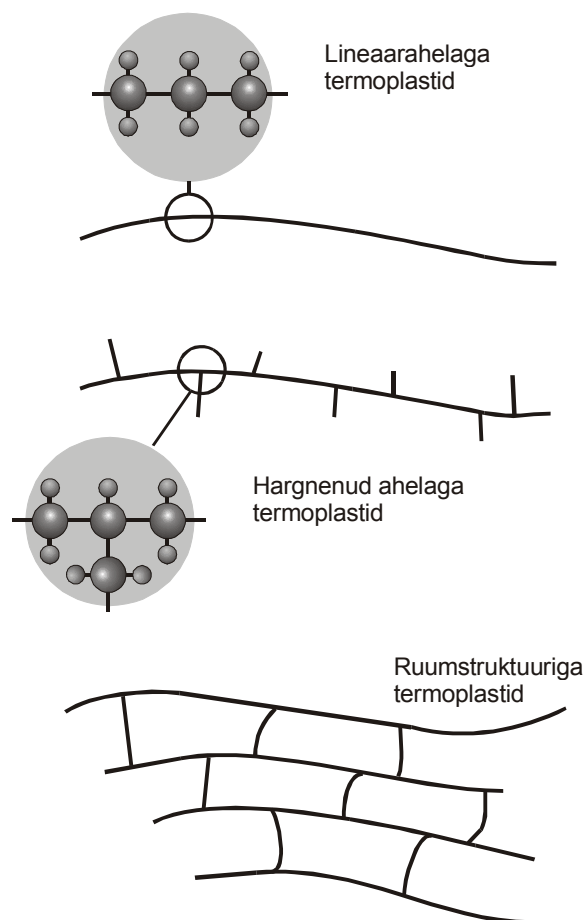
Plastide liigitus ja omadused

Temperatuurile reageerimise järgi liigitatakse plastid kahte gruppi:

1. Termoplastid,
2. Termoreaktiivid.

Termoplastid muutuvad kuumutamisel voolavaks, jahtudes aga taastuvad esialgsed omadused; nende makromolekulidel on enamasti lineaarne või veidi hargnenud struktuur (sele 1.43).

Termoreaktiivid muutuvad kuumutamisel või kõvendi toimel ruumilise struktuuriga võrestikpolümeerideks, mis ei sula ega lahustu.



Sele 1.43. Plastide makromolekulaarstruktuur

Lõppomaduste ja otstarbe järgi liigitatakse termoplastid ja termoreaktiivid:

- a) *tarbeplastideks* – need on polüetüleen (PE), polüpropüleen (PP), polüvinüülkloriid (PVC), polüstüreen (PS), fenoplast (PF) jt.
- b) *konstruktsioonplastideks* – need on polükarbonaat (PC), polüamiid (PA), orgklaas (PMMA), epoksüplast (EP) jt.
- c) *eriplastideks* – fluoroplast (PTFE) jt.

Plastid

Termoplastid

- Polüetüleen (PE)
- Polüpropüleen (PP)
- Polüvinüülkloriid (PVC)
- Polüamiid (PA)
- Polüstüreen (PS)
- Polükarbonaat (PC)
- Polütetrafluoretüleen e. fluorplast (PTFE)
- Polümetüülmetakrülaad e. orgklaas (PMMA) jt.

Termoreaktiivid

- Epoksüplast (EP)
- Aminoplastid (UF, MF)
- Fenoplast (PF) jt.

Elastomeerid

- Kautšuk
- Kummi
- Polüuretaan (PUR) jt.

Plastist toodete talitusomadused, mis ilmnevad eksploatatsioonis, on:

a) mehaanilised:

- vastupanu mehaanilistele mõjudele (tõmbele, survele, paindele, löögile),
- kõvadus,
- hõõrdekulumiskindlus;

b) füüsikalise-keemilised:

- soojus- ja külmaskindlus, tulekindlus,
- soojusjuhtivus,
- soojuspaisumine,
- keemiline vastupidavus;

c) elektrilised:

- vastupanu elektrivälja toimele,
- dielektriline läbitavus;

d) optilised:

- läbipaistvus,
- valguse neeldumine/peegeldumine;

e) tervisekaitse ja ohutusega seotud omadused.

Plastide töötlemine

Plastide tootmine ja töötlemine oleneb plasti tüübist ja toote konstruktsioonist. Termoplaste peamiselt valatakse, vormitakse ja töödeldakse ekstruuderiga; termoreaktiive pressitakse, valatakse ja vormitakse. Mõlema puhul kasutatakse ka lõiketöötlemist (treimist, freesimist, saagimist, puurimist). Keevitamist on võimalik rakendada ainult termoplastide puhul.

Tehnoloogiliselt olulised omadused, mis määravad plastide töödeldavuse on:

- sulavoolavus/sulaviskoossus,
- niiskusesisaldus,
- termostabiilsus,
- kompaundi koostis (segu terviklik koostis, mis on töötlemisvalmis ja sisaldab juba kõiki vajalikke lisandeid),
- kahanemine.

Enamik plastide töötlemise protsesse koosneb järgnevatest operatsioonidest:

- soojendamine pehmenemiseni,
- vormimine,
- jahutamine (tardumine),
- toote eraldamine.

Pulbriliste plastide vormimine

Pressimine on töötlemisviis, mille puhul materjal viiakse rõhu ja kuumuse toimel plastsesse olekusse, misjärel ta täidab kogu vormi. Pressimiseks kasutatakse sõltuvalt energia ülekande viisist mehaanilisse, hüdraulilisse, pneumaatilisse või kombineeritud pressi paigutatavaid või nende juurde kuuluvaid, ühe- või mitmepesalisi pressvorme. Vormi pandud plasti pulber (presspulber) muutub temperatuuril 170...200 °C ja rõhul 15...75 MPa voolavaks, täidab vormipesa ning muutub keemiliste reaktsioonide tulemusena kõvaks ja lahustumatuks.

Tabel 1.34 Põhiliste termoplastide omadused

Plast	Omadused		
	Tihedus kg/m ³	R _m N/mm ²	A %
Polüetüleen (PE)			
kõrgtihe (HDPE)	960	22...38	20...1300
madaltihe (LDPE)	920	1...16	90...650
Polüpropüleen (PP)	905	27...40	30...200
Polüvinüülkloriid (PVC)	1470	24...62	2...40
plastifitseerimata (UPVC)	1375	7...56	200...450
plastifitseeritud (PPVC)	2175	17...30	75...450
Fluorplast (PTFE)	1070	35...84	1...4,5
Polüstüreen (PS)	1100	50...75	5...8
Orgklaas (PMMA)	1200	60...70	50...120
Polükarbonaat (PC)	1020...	40...90	40...150
Polüamiid (PA)	1150		

Tabel 1.35 Põhiliste termoreaktiivide omadused

Plast	Omadused			
	Tihedus kg/m ³	R _m N/mm ²	A %	AU J/m ²
Epoksüplast (EP)	1850	60	4	8...10
Klaasplast (EP+klaas-kiud)	1900...2200	II 2100 ⊥ 950 # 200	- - -	- - -
Fenoplast (PF)	1275	35...55	5,2...7	1...1,5
Aminoplast (UF, MF)	1550	40...90	0,5	-

II – piki kiudu, ⊥ – risti kiudu, # – orienteerimata kiuga

Kasutatakse järgmisi pressimismeetodeid (sele 1.44):

a) otsepressimine

- külmpressimine ($T < 170\text{ °C}$; $p < 45\text{ MPa}$),
- kuumpressimine ($T > 170\text{ °C}$; $p > 45\text{ MPa}$);

b) valupressimine, mispuhul pressivormi surutakse soojendatud voolavaks muutunud materjal ($T = 170\text{...}200\text{ °C}$; $p = 15\text{...}75\text{ MPa}$).

Survevalamine on levinuim ja kiiresti arenev plastide töötlemise meetod nii termoplastide kui ka termoreaktiivide korral.

Valamiseks kasutatakse survevalumasinat, milles pöörlev tigu (või vanemates masinates ka kolb) surub silindris soojust ja rõhu toimel voolavaks muutunud materjali läbi valukanali vormi sisse.

Survevalumasina põhikonfiguratsioon koosneb (sele 1.45):

- valusõlmest, milles toimub materjali plastifitseerimine, homogeniseerimine ja viimine voolavasse olekusse;
- vormisulgemissõlmest, mille ülesandeks on valuvormi sulgemine ja avamine ning vormi kooshoidmine valamisel;
- valuvormist, mis võib olla ühe- või mitmepesaline.

Survevalumasinal võib toote vormimise protsessi jagada neljaks osaks:

- vormi sulgumine (vormi liikumine suudmiku vastu),
- materjali surumine vormi,
- materjali tardumine vormis ja uue materjali ettevalmistus valuks,
- valuvormi avamine ja toote eemaldamine vormist.

Termoplastide valamisel on silindri temperatuur $100\text{...}280\text{ °C}$ ja rõhk $57\text{...}400\text{ MPa}$. Vormi surutud kuum materjal tardub jahtudes (vormi temperatuur $30\text{...}90\text{ °C}$) ning omandab vormipesa kuju.

Termoreaktiivide korral on silindri temperatuur $80\text{...}95\text{ °C}$ ja rõhk $100\text{...}200\text{ MPa}$. Nende survevalu põhineb asjaolul, et termoreaktiivid käituvad lühikese aja vältel nagu termoplastid. Hiljem materjal kõveneb kuumas vormis ($140\text{...}180\text{ °C}$) kulgevate reaktsioonide tulemusena.

Ekstrusioonil töödeldakse termoplaste järgnevalt: ekstruuderis kuumas silindris muutub plast seda pöörleva teo toimel plastseks (plastifitseeritakse), mis võimaldab seda suruda läbi vormiva kanali (ekstrusioonipea ehk suudmiku). Seejärel toode jahutatakse. Ekstruuderis silindri temperatuur ($140\text{...}240\text{ °C}$) valitakse plasti järgi.

Ekstrusiooniprotsessi staadiumiteks on:

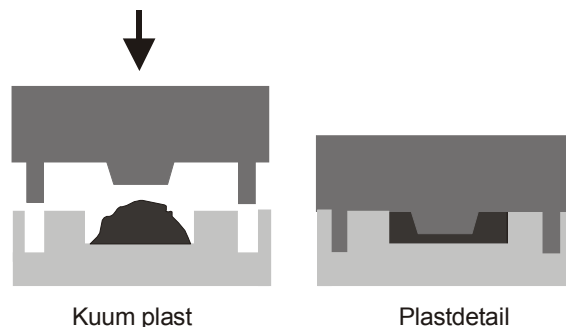
- materjali plastifitseerimine ekstruuderis,
- plastses olekus materjali vormimine suudmikus,
- vormitud materjali jahutamine,
- vastuvõtt, lõikamine, kerimine.

Valuvormimine seisneb ilma lisarõhku rakendamata termoplastse materjali sulatamises ja järgnevalt selle juhtimises vormi, milles toimub tardumine kas jahutamise või katalüsaatorite mõju tulemusena. Vormimise operatsioonideks vormis polümerisatsioonil on:

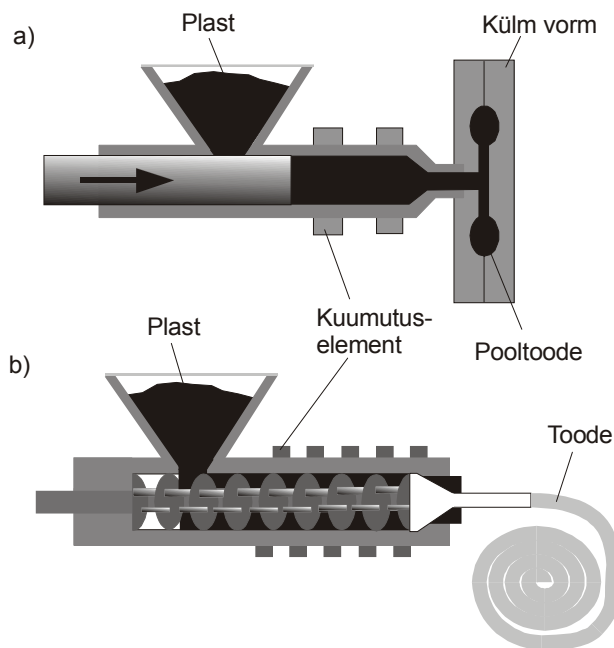
- materjalide ja vormi ettevalmistus,
- polümeriseeruva kompositsiooni valmistamine,
- toote vormimine.

Valuvormitavaist materjalidest levinumad on nailon (tuntud ka teiste nimetuste all) ja polüakrülaadid.

Rotatsioonivalu korral surutakse pulbriline plast tsentrifugaaljõu mõjul vastu kuuma vormi; jahtudes omandab sulanud materjal vormi kuju. Nii saab vormida suuri ja keeruka kujuga esemeid.



Sele 1.44. Vormpressimine



Sele 1.45. Survevalumasinate skeemid.

a- kolbsurvega, b- tiguvõlliga

Leht- ja torumaterjalist toodete vormimine

Leht- või torumaterjalide korral kasutatakse vormimist üle- või alarõhu toimel, vastavalt kas *pneumo-* või *vaakumvormimist* (sele 1.46).

Materjali vormimisel soojendatakse see infrapunasoojendi abil ja imetakse või surutakse vastu vormi seina.

Materjali vormimisprotsess koosneb järgmistest operatsioonidest:

- materjali soojendamine,
- materjalile sobiva kuju andmine,
- toote vormist eemaldamine.

Termoplastist materjali vormimisel soojendatakse see temperatuurini 100...200 °C ja surutakse õhu (rõhk kuni 2,5 MPa) või imetakse vaakumi abil vastu vormi (mudelit), mille kuju ta jahtudes omandab. Vormimismenetlusel valmistatakse termoplastsest leht- ja torumaterjalist õhukeseseinalisi suuremõõtmelisi tooteid.

Pneumovormimine võimaldab võrreldes vaakumvormimisega valmistada sügavamaid ja suurema seinapaksusega tooteid.

Mehaaniline vormimine ehk kahepoolne vormimine toimub lehtmaterjali ettekuumutamisega, misjuures ta vormitakse mittekuumutatava martriitsi ja templi vahel.

1.3.2. Tehnokeraamika

Tehnokeraamika üldiseloomustus

Tehnokeraamika all mõeldakse rasksulavate ühendite baasil saadud tööriista- ja eriomadustega konstruktsioonimaterjale. Sellega eristatakse tehnokeeraamika ehituskeraamikast (tellised, põrandaplaadid, drenaažitorud jt) ja tarbekeraamikast (fajanss-, portselan- savinõud jt).

Keraamika on vanim konstruktsioonimaterjal (põletatud savist tellised), mida inimkond hakkas valmistama looduslikust toorainest. Tehnokeraamika algab 1930. aastast, kui Saksamaal püüti kasutada keraamikat (Al_2O_3) terase puhastreimisel. Keraamika väikese tugevuse ja suure hapruse tõttu ei leidnud ta laiemat kasutamist. Tänu eriti puhaste (>99,99%) ja ülipeenete pulbrite valmistamise tehnoloogia väljatöötamisele ning kuumpressimise rakendamisele on viimastel aastakümnetel saadud keraamikat piisavalt heade mehaaniliste omadustega (tugevus, löögisitkus), mis on teinud nad konkurentsivõimelisteks ja mõningates olukordades (kõrged temperatuurid, agressiivsed keskkonnad) asendamatuks materjalideks.

Tööstusriikides on viimastel aastakümnetel toimunud "keraamiline plahvatus", millega on kaasnud miljarditesse dollaritesse ulatuvad investeeringud keraamikatööstusesse, on välja töötatud kümneid uusi keraamilisi materjale, tehnoloogiaid ja tooteid. Tehnokeraamikat peetakse XXI sajandi materjaliks.

Tehnokeraamilised materjalid on väga erinevate omadustega sõltuvalt nende koostisest ja valmistamise tehnoloogiast. Nende seas on häid elektrijuhte (keraamilised ülijuhid) kui ka peaaegu ideaalseid dielektrikuid.

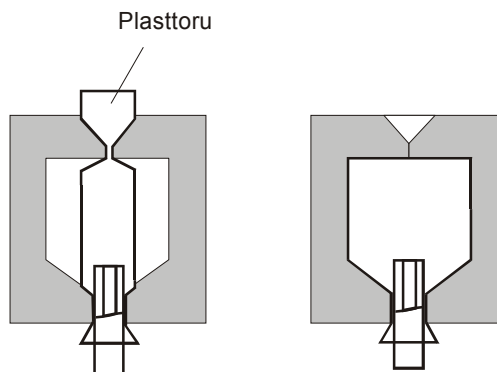
Tehnokeraamika üldisteks positiivseteks omadusteks on:

- suur kuumus- ja termopüsivus (keemilise koostise stabiilsus),
- korrosioonikindlus,
- suur kõvadus ja kulumiskindlus,
- väike tihedus,

Tehnokeraamika puudusteks on:

- väike painde- ja tõmbetugevus,
- suur haprus,

- omaduste suur hajuvus,
- halb töödeldavus,
- kõrge hind.



Sele 1.46. Toodete pneumovormimine

Tehnokeraamika

Oksiidkeraamika

- Al_2O_3 -keraamika
- MgO-keraamika
- ZrO_2 -keraamika
- Al_2O_3 -keraamika
- MgO-keraamika
- ZrO_2 -keraamika jt.

Mitteoksiidkeraamika

- Karbiidkeraamika
- Nitriidkeraamika
- Boriidkeraamika
- Silitsiidkeraamika jt.

Segakeraamika

- Oksinitriidkeraamika
- Oksikarbiidkeraamika jt.

Tehnokeraamika kasutus

Konstruktsioonikeraamika

- Kuumuskindel keraamika
- Termokindel keraamika
- Kulumiskindel keraamika
- Antifriktioonkeraamika
- Porne keraamika
- "Sitke" keraamika
- Biokeraamika

Tööriistakeraamika

- Ülikõva keraamika
- Lõikekeraamika
- Kermised

Elektrokeraamika

- Dielektrikud
- Pooljuhid
- Ülijuhid
- Raadiotehniline keraamika

Tehnokeraamika liigitus

Tehnokeraamilisi materjale liigitatakse mitmeti. Enamtuntud on liigitamine keemilise koostise ja kasutusala järgi.

Keemilise koostise järgi jaotatakse tehnokeeraamika kolme gruppi: oksiid-, mitteoksiid- ja segakeraamika; kasutusala järgi: konstruktsiooni-, tööriista- ja elektrokeraamika.

Tehnokeraamilised materjalid koosnevad põhiliselt rasksulavaist ühendeist (oksiidid, karbiidid, nitriidid jne), mille sulamistemperatuur on üle 1500 °C. Rasksulavate ühendite omadused sõltuvad kristallide omadustest ja nendevahelistest sidemetest. Monokristallide omadused sõltuvad omakorda aatomitevahelistest keemilistest sidemetest ja kristallivõre struktuurist.

Rasksulavad ühendid jagatakse hapnikku sisaldavaks ja hapnikku mittesisaldavateks ning kombineerituks, s.o. nad koosnevad mitmest ühendist. Hapnikku sisaldavad rasksulavad ühendid on oksiidid. Hapnikku mittesisaldavad rasksulavad ühendid, mida kasutatakse tehnokeeraamikas, on karbiidid, boriidid, nitriidid ja silitsiidid.

Üleminekugrupi metallide rasksulavail ühenditel – karbiididel ja nitriididel on reeglina sisendustüüpi ruum- või tahkkesendatud kuupvõre või kompaktne heksagonaalvõre. Mittemetalli aatomid asetsevad metalli kristallivõre sees. Mittemetalli aatomite sisenemine metalliaatomite võresse kutsub esile tugevate keemiliste sidemete moodustumise metalli ja mittemetalli aatomite vahel, mis muudab oluliselt komponentide füüsikalisi omadusi. Ühenditel on märksa kõrgem sulamistemperatuur, elastsusmoodul, kõvadus ja väiksem joonpaisumisetegur.

Oksiidkeraamika

Oksiidkeraamika aluseks on oksiidid, mis esinevad looduses puhtal kujul või saadakse metallide kuumutamisel õhus või hapnikus. *Oksiidid* on kõrge sulamistemperatuuriga; tehnokeeraamikas kasutatakse enim Al_2O_3 , MgO , ZrO_2 , SiO_2 , TiO_2 .

Mitteoksiidkeraamika

Mitteoksiidkeraamika aluseks on puhtad karbiidid, nitriidid, boriidid ja silitsiidid.

Karbiidid on struktuurilt ja füüsikalis-keemiliste omaduste poolest tüüpilised sisendustüüpi keemilised ühendid (välja arvatud SiC).

Karbiide saadakse metallide või nende oksiidide pulbrite karbidiseerimisega vesinikus või süsinikku sisaldavas keskkonnas.

Nitriidid on struktuurilt ja füüsikalis-keemilistelt omadustelt sarnased karbiididega, kuid nitriididel on parem elektrijuhtivus, mis on ligi 2 korda suurem kui vastavatel karbiididel. Ka on nitriididel sulamistemperatuur madalam kui karbiididel.

Nitriidide kõvadus langeb igas grupis elemendi aatomnumbri suurenedes, mis viitab metalli ja mittemetalli aatomi sidemete nõrgemisele. Tehnokeraamika valmistamisel kasutatakse laialdaselt järgmisi nitriide: Si_3N_4 , AlN , BN .

Boriidid on asendustüüpi kristallivõrega keemilised ühendid. Boori aatom on liiga suur, et tungida metalli kristallivõresse, mistõttu nad vaid asendavad metalli aatomeid. Boori aatomid võivad boriidides olla üksteisest isoleeritud või olla valentselt seotud. Seepärast on boriidide struktuur keerulisem (heksagonaalne, rombiline, tetragonaalne).

Boriide saadakse elementide sünteesil vaakumis või taandavas keskkonnas sulatamise teel ning kõrgetemperatuurilise iseleeviva või plasmakeemilise protsessi vahendusel. Tehnokeraamikas kasutatakse: TaB_2 , TiB_2 , ZrB_2 .

Silitsiidid on metallide keemilised ühendid. Nad on füüsikalis-keemiliste omaduste poolest lähedased boriididele. Neil on hea soojus- ja elektrijuhtivus, happe- ja leelisekindlus. Mõned neist (MoSi_2) ei oksüdeeru õhus isegi kuumutamisel kuni 1700 °C-ni.

Segakeraamika

Segakeraamika aluseks on kahe või enama rasksulava ühendi segu. Tüüpilisteks segakeraamika esindajateks on karbonitriidid, oksinitriidid jne.

Karbonitriidid on karbiidi ja nitriidi baasil tardlahused või keemilised ühendid. Nad ületavad mõningate füüsikalis-mehaaniliste omaduste poolest vastavaid karbiide ja nitriide. Näiteks on Ti(C,N) paindetugevus kõrgem kui TiC ja TiN oma.

Simeonid on keerulise koostisega oksinitriidid räninitriidi ja metallioksiidi (Al , Mg , Be ja Y) baasil. Nad on perspektiivsed konstruktsioonimaterjalid tänu suurele kõrgetemperatuursele tugevusele, kuumuspüsivusele, väikesele joonpaisumistegurile ja heale termokindlusele.

Tehnokeraamikas on kõige levinum ja perspektiivsem Si_3N_4 ühend Al_2O_3 -ga, mis kannab nime *sialon*.

Konstruktsioonikeraamika

Konstruktsioonikeraamika suurimaks tarbijaks on autotööstus, eelkõige süüteküünalde näol. Perspektiivis on auto diiselmootori detailide (kolvid, klapid, silindrihülssid, kepsud jt) osaline valmistamine keraamikast. Selline mootor ei vaja jahutussüsteemi, on 15% kergem ja 30...40% ökonoomsem. Samuti võib bensiini asemel kasutada madalasordilisi kütuseid nagu põlevkiviõli, masuut jne. Tänu keraamika väiksemale tihedusele väheneb pöörlevate osade mass ja inerts.

Tööriistakeraamika

Lõikekeraamika on põhilisi tööriistamaterjale, millest valmistatakse metallitöötlemise instrumente (trei- ja freeslõikurid jt.). Lõikekeraamikat valmistatakse põhiliselt Al_2O_3 ja Si_3N_4 baasil. Lõikekeraamika ei sisalda plastset ja suhteliselt kergesti sulavat sideainet nagu kõvasulamid, mistõttu nad on suurema kõvaduse ja kulumiskindlusega, kuid väiksema haprusega.

Elektrokeraamika

Elektrokeraamikat kasutatakse kõige enam elektroonikatööstuses mitmesuguste elektroonikaelementide

(mikroskeemide alused, kondensaatorite ja takistite korpused jne.) valmistamiseks. Elektrokeraamiliste materjalide seas on häid elektrijuhte (keraamilised ülijuhid) kui ka häid isolaatoreid. Elektrokeraamil on pöhirõhk asetatud keraamika elektrilistele ja soojuslikele omadustele (elektri- ja soojusjuhtivus).

Tehnokeraamika omadused

Tehnokeraamika on vähesel tugevusega ning suure haprusega. Kuna keraamika tõmbetugevus on väike, antakse tugevustajate tavaliselt painde- või survetugevus. Vähem oluline pole tehnokeraamika korral selle kõvadus (see on piiratud 1200...3000 HV). Kõvadusega on otseselt seotud kulumiskindlus. Oluliselt ei muutu tehnokeraamika, näit. löikekeraamika tugevus- ja kõvadusomadused temperatuuri tõusul kuni 1000 °C-ni. Keraamiliste materjalide põhiline puudus on nende suur haprus, mida iseloomustab ühe sitkuse näitajana purunemissitkus (mida väiksem see on, seda sitkem materjal).

Tehnoloogia

Tehnokeraamika valmistatakse pulbermetallurgia meetodil ja protsess sisaldab üldiselt samu etappe: pulbrite valmistamine, vormimine ja paagutamine ja vajadusel täiendav töötlemine.

Tehnokeraamika tehnoloogia erineb traditsioonilisest pulbertehnoloogiast, eelkõige pulbrite valmistamise, paagutamise ja täiendava töötlemise poolest. Heade füüsikalismehaaniliste omadustega tehnokeraamika saamiseks on vajalikud puhtad (kontrollitava koostisega) peened pulbrid. See eeldab teistsuguseid pulbrite valmistamise meetodeid.

Pulbrite saamine

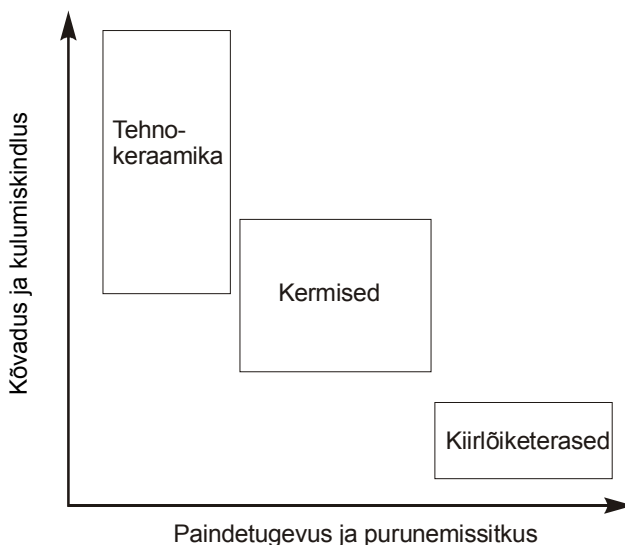
Pulbrite saamine seisneb raskulava keemilise ühendi sünteesimises ja vajaduse korral saadud pulbri täiendavas mehaanilises peenestamises. Keraamiliste pulbrite saamiseks kasutatakse mitmesuguseid meetodeid, mida traditsioonilises pulbertehnoloogias kasutatakse vähe eelkõige väikese tootlikkuse ja kõrge hinna tõttu. Enamlevinud keraamiliste pulbrite valmistamise meetodid on sadestamine soolalahustest, laser- ja plasmakeemiline süntees, aurufaasist kondenseerimine jt. Kasutatakse ka jahvatamist kuul- ja vibroveskeis nii iseseisva saamisviisina kui ka mõne eelneva saamisviisi täiendusena. Igal saamisviisil on omad positiivsed ja negatiivsed küljed. Saamisviisi valikul lähtutakse keraamikale esitatavatest nõuetest ja omahinnast.

Vormimine

Keraamiliste pulbrite vormimiseks kasutatakse kõiki pulbertehnoloogias kasutatavaid vormimismeetodeid (pressvormi pressimine, lobriyalamine, pulbersurvevalamine, ekstrusioon, kuumpressimine jt).

Pressvormi pressimine on levinumaid vormimisviise. Kuna keraamilised pulbrid on kõvad ja haprad, siis lisatakse pressimise hõlbustamiseks

enne pressimist kleepaineid e. plastifikaatoreid. Kuumutamisel plastifikaatorid eemalduvad materjalist täielikult. Sellisteks plastifikaatoriteks on tavaliselt parafiin, polüvinüülpiiritus, polüetüleenglükool, kautšuk jt.



Sele 1.47. Tööriistamaterjalide sitkuse võrdlus

Tabel 1.36. Tehnokeraamika omadused

Omadused Materjal	Tihedus kg/m ³	Kõvadus HV	Survetugevus N/mm ²	Paindetugevus N/mm ²	Purunemissitkus N/mm ² /m ^{1/2}
Al ₂ O ₃	3800	2000	2500	500	4
ZrO ₂	6050	1350	2000	1400	10
Si ₃ N ₄ ¹⁾	3200	1600	2800	900	7
AlN ¹⁾	3200	1200	2100	400	6
SiC ¹⁾	3200	2500	2700	600	4
B ₄ C ¹⁾	2500	3000	2600	400	3

¹⁾ kuumpressitud

Lobriyalamine on teine enamkasutatav keraamika vormimise viis. Selpuhul lisatakse pulbrisegule vajalik kogus vedelikku või plastifikaatorit (parafiin, polüvinüülpiiritus, vaha jne.), mis tagab pulbrimassi (lobri) voolavuse vormi. Lobriyalu eriliike on kuumlobriyalu, kus pulbrisegu muutub kuumutamisel vedelaks (lobriks). Pulbrimass valatakse poorsesse kips- või keraamilisse vormi. Liigne vedelik imbub vormi pooridesse ja peale kuivamist (või jahtumist) võetakse toorik vormist välja. Protsess võimaldab vormida keerulise kujuga detaile. Protsessi puuduseks on väike tootlikkus ja tooriku suur poorsus.

Keraamiliste toodete saamiseks kasutatakse ka *ekstrusiooni* ja *pulbersurvevalamist*.

Paagutamine

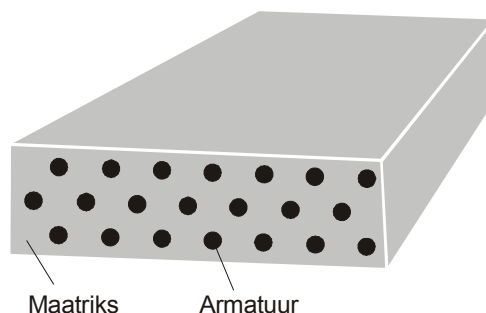
Paagutamine on tehnokeraamika tähtsaim tehnoloogiline operatsioon, kuna sellest sõltuvad keraamiliste materjalide füüsikalismehaanilised omadused eelkõige.

Tehnokeraamikat on raske paagutada, sest materjalide tihendamiseks vajalikud difusiooniprotsessid on raskendatud. Seepärast kasutatakse tehnikeraamikas vähem normaalarhul e. rõhuta paagutust, mis metallipulbrist toodete puhul on tavaline. Ta sobib vähemvastustusrikaste detailide valmistamiseks, eelkõige protsessi odavuse tõttu. Tehnikeraamika valmistamisel on paagutusviisidest enamkasutatavad aktiveeritud paagutamine, survepaagutamine, kuumpressimine jt.

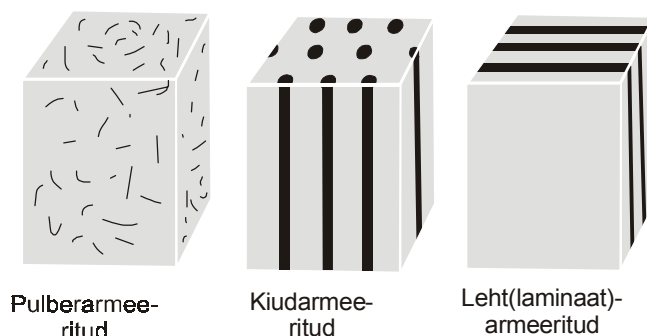
Täiendav töötlemine

Sageli pole vormimise ja sellele järgneva paagutamise teel võimalik saada vajaliku kuju ja täpsuse ning siledusega tooteid. Seepärast tuleb tehnikeraamikat mõnikord täiendavalt töödelda. Suure kõvaduse ja hapruse tõttu on seda raske teha ja seetõttu töömahukas ja kallis. Käesoleval ajal kasutatakse tehnikeraamika töötlemiseks mitmeid meetodeid, milleks on:

- mehaanilised (abrasiiv- ja vee-abrasiivjoaga töötlemine),
- keemilised (söövitamine),
- elektrilised (elektrierosioonitöötlemine),
- füüsikalised (laserkiirega, elektronikiirega ja ioonikiirega töötlemine).



Sele 1.48. Komposiitmaterjali struktuur



Sele 1.49. Komposiitmaterjalide liigitus armatuuri järgi

1.4. Komposiitmaterjalid

1.4.1. Komposiitmaterjalide struktuur ja liigitus

Komposiitmaterjalideks (KM) nimetatakse kahest või enamast osast – faasist – materjale, kusjuures faaside omadused ja orientatsioon on selgelt erinevad ja kontrollitavad. Komposiitmaterjal on heterogeenne, selle omadused on ette antud (korrosiooni- ja kuumuskindlus, magnetilised omadused, jäikus, tugevus jm). Tavaliselt on üks faasidest kõva ja tugev ning teine plastne ja elastne. Kõva faasi nimetatakse *armatuuriks* (sarruseks) ja plastset *maatriksiks* (sele 1.48).

Armatuur

Armatuur annab komposiitmaterjalile tugevuse, jäikuse ja tagab mehaaniliste omaduste säilimise tööolukorras (kõrgel või madalal temperatuuril, agressiivses keskkonnas jne).

Armatuur võib olla kiuline või pulbriline. Kiuline armatuur võib olla ka riide, vildi, lindi jms. kujul. Kiudarmatuuril on nii positiivseid kui ka negatiivseid omadusi. Eeliseks on suurem tugevus ja võimalus luua tugevaid komposiitmaterjale. Puuduseks aga on see, et kiudarmatuur võib kanda ainult teljesuunalist koormust. Ristsuunas kiudarmatuur tugevust ei suurenda, vaid võib isegi nõrgendada. Kiudarmatuurina kasutatakse

- niitkristalle e. *fibrille*, mida iseloomustab hea tugevus, kergus, kuumus- ja korrosioonikindlus, aga ka kõrge hind (MgO, mulliid $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ jt.);

Tabel 1.37 Komposiitmaterjalide omadused

Materjal	R_m N/mm^2	%	Eritugevus km
Metallkomposiidid (MKM)			
Al-B (50%)	1400	0,6	54,0
SAP865	380	7	-
	105	2	-
	(500 °C)		
Plastkomposiidid (PKM)			
Klaasplast (EP-ga)			
- pikiarmatuuriga	2100	-	96
- ristiarmatuuriga	950	-	50
- orienteerimata armatuuriga	20...200	-	1,2...12
Süsinikplast	1000	-	67
Keraamilised komposiidid (KKM)			
MgO+10% Mo kiudu	120 ¹⁾	-	-
Fajanss+(30%)W-traati	25	-	-
Süsinikkomposiidid (SSK)	190	-	5
			(2000°C)

1) paindetugevus

- metalltraati, mida iseloomustavad stabiilsed füüsikalised-mehaanilised omadused ja odavus (W, Mo, teras);
- polükristallilist ja anorgaanilist kiudu (süsinik, kvarts jt), mida iseloomustab odavus ja kergus, kuid mis on väga tundlikud mehaaniliste mõjutuste suhtes.

Maatriks

Komposiitmaterjali põhiosa on reeglina *maatriks*, mis koos armatuuriga (sagedamini kiududena) võtab vastu koormuse. Maatriks annab materjalile vormi, monoliitsuse ning tagab koormuse ümberjaotumise armatuuri elementide (kiudude) vahel. Kui kiud purunevad, deformeerub maatriks plastselt. Siit järeldeb, et maatriksi deformeeritavus peab olema sama suur või suurem kui kiudude deformeeritavus.

Komposiitmaterjali maatriksina kasutatakse metalle ja sulameid (alumiiniumi, magneesiumi, niklit, titaani jt.), polümeersest materjalidest termoreaktiive (epoksü-, polüester- ja fenoolvaike), keraamilistest materjalidest oksüüd- (Al_2O_3 , MgO , ZrO_2) ja mitte-oksüüdkeramikat (boriide TiB_2 , ZrB_2 , nitride Si_3N_4 , AlN , BN , silitsiide MoSi_2 jt.).

Maatriksi koostise järgi liigitatakse komposiitmaterjale järgmiselt:

- metallkomposiitmaterjalid (MKM), sh ka dispersioonarmeeritud komposiitmaterjalid ja pseudosulamid,
- plastkomposiitmaterjalid (PKM),
- keraamilised komposiitmaterjalid (KKM),
- süsinikkomposiitmaterjalid (SKM).

1.4.2. Metallkomposiitmaterjalid

Metallkomposiitmaterjalides (MKM) kasutatakse maatriksina kõige sagedamini alumiiniumi, magneesiumi, titaani, niklit ja koobaltit, armatuurina aga kõrgtugevat ja jäika teras- või süsinikkiudu.

Kuna maatriksi ja armatuuri eri liikide mehaanilised ja tehnoloogilised omadused on suuresti erinevad, siis on rakendatavad tehnoloogilised võimalused väga laiad. Metallkomposiitmaterjalides valmistamisel kasutatakse praktiliselt kõiki metallide tehnoloogias tuntud tehnoloogilisi meetodeid: survetöötlemist, keevitamist, valamist, pulbermetallurgiat jt. Metallkomposiitmaterjalide konkreetse valmistamisviisi valikul peab arvestama seda, et armatuur oleks maatriksis ühtlaselt jaotatud; armatuuri ei tohi tehnoloogiliste operatsioonide käigus vigastada. Silmas tuleb pidada armatuuri ja maatriksi sobivust. Kuna armatuur on tavaliselt juba ette valmistatud (lõigatud, orienteeritud; vilt, võrk jne), siis on metallkomposiitmaterjalide valmistamise tehnoloogia määratud sellega, mis kujul on maatriksit parem armatuuriga ühendada. Lähtudes maatriksi kujust (olekust) kasutatakse metallkomposiitmaterjalide valmistamisel järgmisi meetodeid:

- a) *tardfaasilist meetodit* – maatriks on pulber, õhuke leht (foolium) või kompaktn metall,
- b) *vedelfaasilist meetodit* – maatriksi materjal sulatatakse ja sellega immutatakse armatuuri või kasvatatakse sulami suundkristalliseerimise teel armatuuris kiulised armeerivad kristallid,
- c) *sadestusmeetodit* – maatriks sadestatakse armatuurile soolalahustest, auru- või plasmafaasist.

Komposiitmaterjalid

Metallkomposiitmaterjalid (MKM)

Kiudarmeeritud
Dispersioontugevdatud
Pseudosulamid

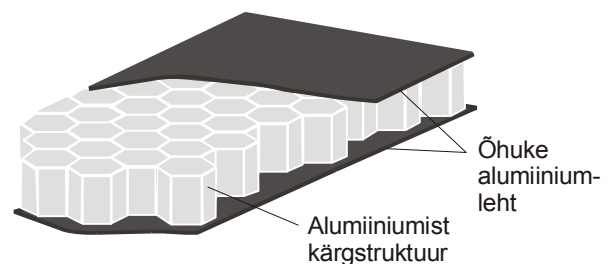
Plastkomposiitmaterjalid (PKM)

Klaasplastid
Süsinikplastid
Metalloplastid
Organoplastid

Keraamilised komposiitmaterjalid (KKM)

Metallkeraamika
Süsinikkeraamika

Süsinikkomposiitmaterjalid (SKM)



Sele 1.50. Kõrgkomposiitmaterjali struktuur

1.4.3. Plastkomposiitmaterjalid

Plastkomposiitmaterjalideks (PKM) nimetatakse materjale, mis koosnevad polümeersest maatriksist (põhimaterjalist) ja tugevdavast komponendist kiulisel või pulbrilisel kujul.

Käesoleval ajal valmistab tööstus erinevaid plastkomposiite (klaasplastid, metalloplastid jt.) ja teeb neist konstruktsioonidetaile: raketikeresid, naftatsisterner, lennukipropellereid, torusid, spordiriistu, elektroonika mikroskeeme jt. Üks põhjus, mis viimase ajani takistas klaasplastide kasutamist raskkoormatud detailide valmistamisel, oli nende suhteliselt väike jäikus. Viimastel aastatel on kasutusele võetud boor- ja süsinikkiudarmatuur ja seeläbi saanud võimalikuks valmistada piisavalt jäikastid plastkomposiite, mis ületavad eritugevuse poolest mitu korda metalle.

Eriti efektiivsed on plastkomposiidid tingimustes, kus oluline on minimaalne mass, korrosioonikindlus, orgaaniliste lahustite, õli- ja happekindlus. Armeeritud plastid on head elektri- ja soojusisolatorid, nad on vibratsioonikindlad ja mittemagnetilised. Nende peamine puudus on suhteliselt madal termopüsivus (tavaliselt temperatuurini 300 °C).

Suur armatuuri ja maatriksimaterjali valik koos võimalusega reguleerida laias vahemikus armatuuri mahulist sisaldust komposiidis annavad plastkomposiitidele väga mitmekesised omadused ja avarad kasutusvõimalused.

Plastkomposiitide põhirühmad, lähtudes armatuurist on järgmised:

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

1.4.4. Keraamilised komposiitmaterjalid

Keraamilised komposiitmaterjalid (KKM) koosnevad keraamilisest maatriksist ja armatuurist. Viimane võib olla mõni raskuslavad metall (W, Mo jt) või raskuslavad ühend (WC, SiC jt). Keraamilisi komposiitmaterjale iseloomustab keraamikale omase suure survetugevuse ja kõvaduse kõrval rahuldav tõmbetugevus ja sitkus.

Keraamilistes komposiitides kantakse koormus haprast maatriksist üle tugevale armatuurile, kusjuures efekti ei anna mitte pulbikujuline tugevdav faas nagu dispersioontugevdatud metallkomposiitides (näit. kõvasulamites), vaid kiuline. Näiteks tuleb ühesuguse tugevusega kermise valmistamisel viia sellesse 3 korda vähem metallikiudu kui sama koostise korral metallipulbrit.

Keraamilise maatriksi tugevdamist metallarmatuuriga saab realiseerida kahel viisil:

- a) kasutades armatuuriks materjali, millel on suurem elastsusmoodul kui maatriksil,
- b) kasutades armatuuriks materjali, millel on maatriksiga võrreldes suurem joonpaisumistegur.

Esimesel juhul annab elastsem maatriks deformeerimisel suurema osa pingetest üle jäigale armatuurile, teisel juhul tekivad survepinged keraamilises maatriksis jahtumise käigus armatuuri suurema kahanemise tõttu.

Keraamilise komposiitmaterjali näitena võib tuua volframtraadiga armeeritud fajansskeraamika (50% kaoliini, 30% ränioksiidi, 20% päevakivi), mida kasutatakse elektriisolaatorite valmistamiseks.

1.4.5. Süsinikkomposiitmaterjalid

Süsinikkomposiitmaterjalide (SKM) kasutuselevõtu on tingitud eelkõige kõrgetemperatuurse tehnika areng: on vaja konstruktsioonmaterjale, mille talituslikud omadused säiluvad kõrgel temperatuuril (üle 1000 °C). Polümeermaatriksiga materjalidel on kõrge eritugevus, kuid nad kaotavad selle juba suhteliselt madalatel temperatuuridel. Metallmaatriksiga komposiidid on rasked, lisaks sellele on nad kallid kaskeeruka valmistamistehnoloogia või komponentide kõrge hinna tõttu. Sama võib öelda ka traditsiooniliste keraamilise maatriksiga komposiitmaterjalide kohta.

Nende asjaolude tõttu pakuvad huvi süsiniku baasil ning süsinikkiududega armeeritud materjalid. Neid on paljudes maades viimase 10...15 aasta jooksul intensiivselt uuritud. Sellistel süsinikkomposiitidel on väike tihedus, suur tõmbetugevus ja elastsusmoodul, hea termokindlus; nad töötavad oksüdeerivas keskkonnas temperatuuril kuni 500 °C, inerts keskkonnas ja vaakumis aga kuni 3000 °C.

Pidevate või tükiliste kiududena süsinikarmatuur saadakse orgaaniliste kiudude kõrgetemperatuurse pürolüüsi teel. Lähtematerjaliks on naturaalsed (tselluloos) või sagedamini tehiskiud (viskoos, polüamiid jt). Erinevalt süsinikplastidest ei valmistata süsinikkomposiitide armatuuri eraldi, vaid üheaegselt süsinikmaatriksiga. Viimasena kasutatakse pürolüütilist süsiniku (kivisöövaiku, polümeere, fenool- ja teisi orgaanilisi vaike). Kõrgetemperatuursel töötlemisel vaigud koksistuvad. Mida mida suurem on vaigusisaldus, seda paremad tulevad süsinikkomposiidi omadused.

2. METALLIDE TEHNOLOOGIA

2.1. Metallurgia

Metallurgia on metallide ja metallisulamite ning nendest pooltoodete tootmise tööstusharu. Eristatakse:

- rauametallurgiat e. ferrometallurgiat, mis hõlmab raua ja rauasulamite (teras, malm) tootmist;
- mitterauametallurgiat e. värvilismetallide metallurgiat, mis hõlmab mitterauametallide (Cu, Al, Mg, Ti jt.) toomist.

Enamik metalle on maakoos keemiliste ühenditena, valdavalt oksiididena, millest tuleb metall mitmesuguseid metallurgilisi protsesse rakendades eraldada. Põhilised metallurgilised protsessid on:

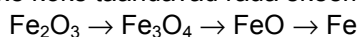
- *Pürometallurgia* – metallide ja sulamite tootmine kõrgetel temperatuuridel, mis tekib kütuse põlemisel või teiste keemiliste reaktsioonide toimel. Kasutatakse näiteks malmi, terase ja vase tootmisel.
- *Hüdrometallurgia* – metallide saamine nende soolade vesilahustest; kasutatakse paljude mitterauametallide tootmisel.
- *Elektrometallurgia* – metallide ja sulamite saamine elektrienergiat kasutades; elektrienergiat kasutatakse sulatamisprotsessiks (legeerteraste, Ti, Cr, Mo jt. metallide tootmisel) või elektrolüüsimisel (Al, Mg jt. metallide tootmisel).
- *Pulbermetallurgia* – metallidest ja sulamitest toodete tootmine pulbrilisi lähtematerjale kasutades (vt. p. 2.6).

Metallurgiliste protsesside tüüpnäitena vaatleme terase kui tehnikas enimkasutatava konstruktsioonimaterjali ning sellest pooltoodete (valtsmetalli) tootmist. Teras tootmine saab alguse toormalmi tootmisest spetsiaalsetes šahtahjudes – kõrgahjudes (sele 2.1). Kõrgahju täidise moodustavad rauamaak, koks ja rübusti.

Kõrgahjuprotsess seisneb oksiidse rauamaagi redutseerimises koksi abil. Koksi toodetakse kivisöest ja oma koostiselt koosneb ta peamiselt süsinikust. Koks on nii soojusallikaks – koksi põlemisel eraldub pürometallurgilisteks protsessideks vajalik soojus – kui ka raua redutseerijaks (taandajaks) maagist.

Rübusti peamised ülesanded metallurgilistes protsessides on maagis sisalduva aheraine (enamasti ränioksiidi SiO_2) ning kütuses – koksis – oleva tuha eemaldamine. Rübustina kasutatakse peamiselt lubjakivi (CaCO_3).

Spetsiaalselt töödeldud ahjutäidis – maak, koks, rübusti – viiakse kõrgahju ülevalt. Kütuse põlemiseks kõrgahju koldes antakse ahju ettekuumutatud põlemisõhku (sele 2.1). Koksi põlemise peamine gaasiline produkt – vingugaas CO, aga samuti tahke koks taandavad raua skeemi järgi:



Moodustunud käsnaud rikastub kokkupuutes koksi ja vingugaasiga ning tekib suure süsinikusisaldusega (3,7...4%) rauasulam – malm, mis tilkadena kõrgahju koldesse valgub. Sulamalm, samuti sularäbu väljutatakse aeg-ajalt väljalaskeavade kaudu.

Enamik toodetud malmist (ca 95%) – *toormalm* – on lähtematerjaliks teraste tootmisel. Väiksemat osa kõrgahju toodangust – valumalmi – kasutatakse malmvalandite tootmiseks valutööstuses.

Suure süsinikusisaldusega toormalm sulatakse tänapäeval ümber terasteks peamiselt hapnikukonverterites (sele 2.1), kõrgkvaliteetteras elektri ahjudes. Hapnikukonverteri täidise põhiosa (~70%) on toormalm. Täidisesse lisatakse samuti terasmurdu ning rübustina lubjakivi.

Terase tootmisel on rübusti vajalik eelkõige terase omadusi halvendavate kahjulike lisandite (väävel, fosfor) sidumiseks. Pürometallurgilise protsessi algatamiseks puhutakse konverterisse puhast hapnikku. Hapnik oksüdeerib ahjutäidises olevat rauda, süsinikku jt. elemente. Süsiniku oksüdeerimisega kaasneb sulatise süsinikusisalduse pidev vähenemine. Läbipuhumine hapnikuga lõpetatakse sobiva süsinikusisalduse ja piisavalt madala kahjulike lisandite sisalduse (S, P) saavutamisel.

Enamik metallurgiatehastes toodetavatest terastest töödeldakse pooltoodeteks, valtsmetalliks – sorditeras, lehtteras (plekk), torud, spetsiaalsed valtsed. Sorditerase all mõistetakse selliseid terasprofiile nagu ümarteras, nelikanteras, I-tala, U-tala, rõõbas jms. Toodetakse õmbluseta torusid ja keevistorusid (õmbluseta torusid). Spetsiaalse valsterase hulka kuuluvad kuulid, tervikrattad, eriprofiilid autoehituse tarvis jms.

Valtsimisele eelneb valuplokkide tootmine, kaasaegsetes metallurgiatehastes enamasti pidevalu meetodil (sele 2.1). Pidevaluseadmeni transporditakse metall kopaga, kust sulateras voolab veega jahutatavasse vormi.

2.2. Valutehnoloogia

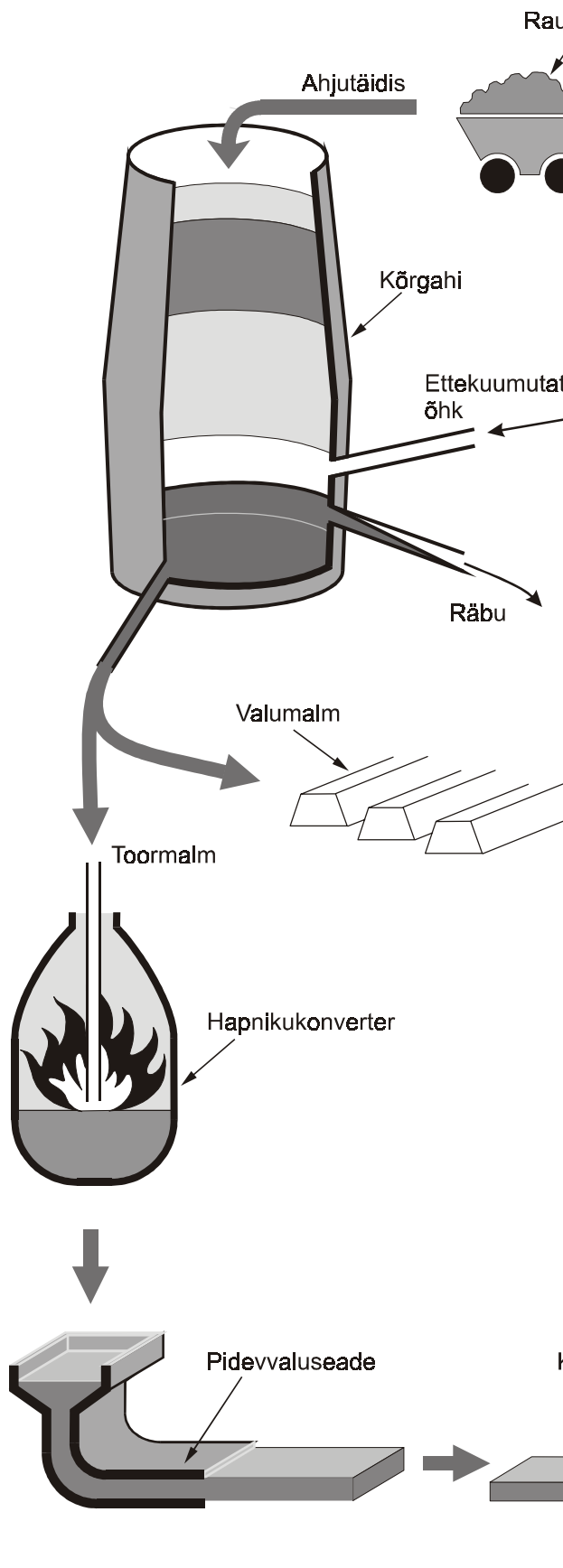
2.2.1. Liigitus

Valutehnoloogia olemus seisneb pooltoodete või toodete – valandite – tootmises sulametalli valamise teel valuvormi. Valu teel toodetakse peamiselt keeruka kujuga pooltooteid, mille mass võib olla mõnest grammist sadade tonnideni. Masinaehituses moodustavad valandid üle 50% masinate ja mehhanismide massist.

Vedelmetalli valuvormi valamise teel tehakse näiteks sisepõlemismootorite silindriplokke, kolbe, pumpade tööriistu, tööpinkide sänge jms.

Valuvormi materjalist olenevalt eristatakse:

- valu kord- e. ainukasutusega vormidesse,
- valu korduvkasutusega e. püsivormidesse.



Esimesse rühma kuuluvad liivvormvalu, koorikvalu, täppisvalu jts. Teise rühma kuuluvad näiteks kokillvalu, survevalu, tsentrifugaalvalu. Valumeetodi valik sõltub valandite nõutavast täpsusest (tehnoloogiline külg) ja hulgast (majanduslik külg).

2.2.2. Metallide valuomadused

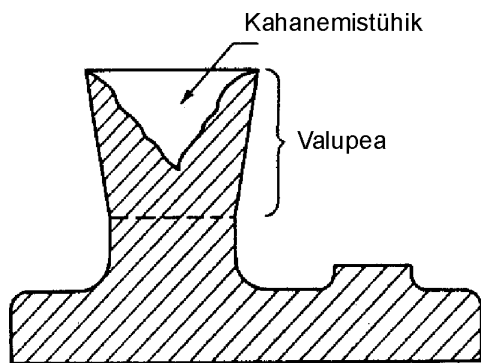
Vedelmetalli valuomadusi hinnatakse vedelvoolavusega, valukahanemisega, samuti kalduvusega gaasitühikute tekkimiseks.

Vedelvoolavus on sulami omadus vedelas olekus täita valuvorm. See omadus on eriti oluline õhukeseseinaliste valandite tootmisel. Raua-sulamitest on parim vedelvoolavus malmidel.

Valukahanemine on valusulamite omadus vedelast olekust tardudes ja ümbritseva keskkonna temperatuurini jahtudes mahult väheneda. Kahanemist mõjustab põhiliselt sulami keemiline koostis. Joonkahanemine on hallmalmil 0,9...1,3%, terastel 2...2,4%, Al-sulamil 0,5...1,5%. Kahanemine põhjustab kahanemistühikuid ja -poorsust, samuti valandite kaardumist ning isegi pragunemist.

Kahanemistühik ja -poorsus paiknevad valandi viimasena tardunud osas. Kahanemistühikuteta ja -poorsuseta valandi saab, kui lisada tardumispiirkonda vedelmetalli. Selleks kasutatakse *valupäid* e. *kompensatoreid*, mis asetatakse valandite massiivsemate osade juurde (sele 2.2). Viimasena kristalliseerudes toidavad nad valandit sulametalliga. Peale kahanemise lõppu valutühikuga valupea eemaldatakse.

Sele 2.1. Malmi ja terase ning terasest valtsprofiili tootmine



Sele 2.2. Valupea (kompensaator) kahanemistühiku vältimiseks.

Peale kahanemistühiku ja -poorsuse võivad valandi terviklikkust rikkuda ka *gaasitühikud*. Gaasitühikute vältimiseks kasutatakse peamiselt selliseid meetmeid nagu vedelmetalli gaasisalduse vähendamine (näiteks sulametalli vaakumeerides) ning valuvormi gaasiläbilaskvuse suurendamine. *Gaasiläbilaskvus*, mis iseloomustab valuvormi materjali võimet läbi lasta vormiõõnsuses olevaid või moodustuvaid gaase, on vormimaterjali peamisi omadusi liivvormivalus (vt. p. 2.2.3). Gaasiläbilaskvuse parandamiseks tehakse valuvormi ventilatsioonikanalid või suurendatakse vormi poorsust.

2.2.3. Valu kordkasutusega vormidesse

Liivvormvalu puhul valand vormitakse liivvormis, mille siseõõnsus kopeerib valandi kuju (sele 2.3). Liivvorm koosneb ülemisest ja alumisest vormipooldest, mis valmistatakse vormisegust (vormiliiva ja sideaine segust) tihendamise teel vormkastides koos jäljendi samaaegse võtmisega mudeliilt. Kuna metalli maht üleminekul vedelast olekust tahkesse väheneb, siis on *mudeli* mõõtmised valandi omadest valukahanemise võrra suuremad. Mudeli vertikaalpindadele jäetakse valukalded, mis kergendavad mudeli eemaldamist vormist. Mudelid valmistatakse metallist, alumiiniumist, puidust. Valandi siseõõnsus kujundatakse vormi asetatava *kärni* abil. Kärn valmistatakse nagu liivvormgi liiva ja sideaine (savi, polümeervaik) segust spetsiaalses rakises – kärnkastis. Mudel on varustatud *kärnmärkidega*, mis kujundavad vormis toetuspinna kärnile. Kärn on kärnmärgi võrra pikem.

Tähtsaks valuvormi osaks *valukanalite süsteem*, mis tagab metalli juhtimise vormiõõnsusesse ja kvaliteetse valandi saamise. Põhi-
osad on valulehter, püstkanal, räbu-

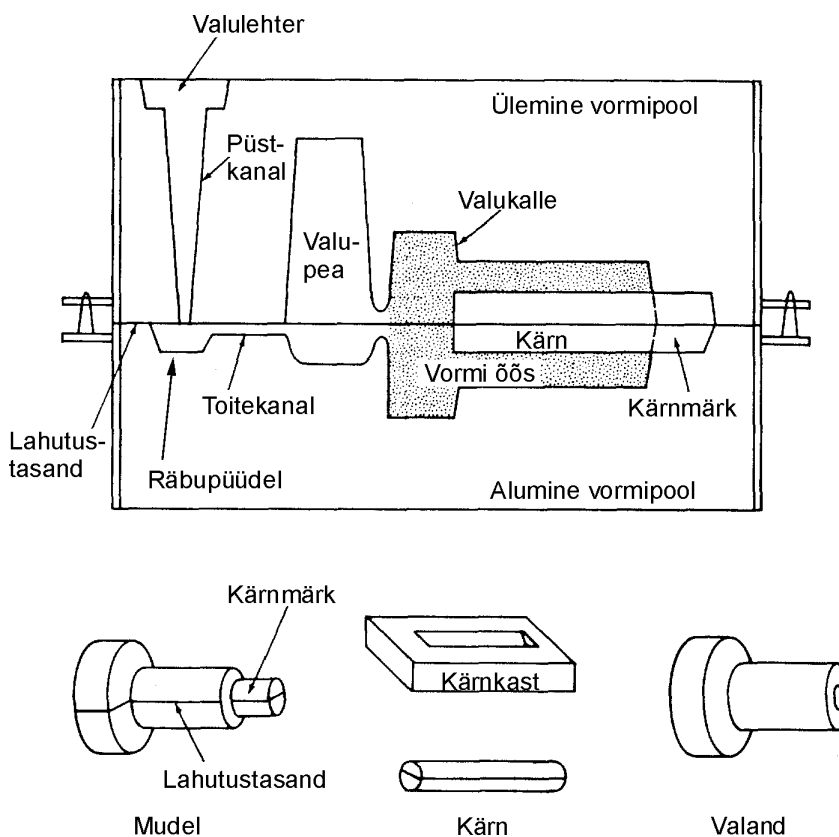
püüdja, toitekanal (toitekanalid). Kvaliteetse, ilma valutühikute ja -poorsuseta valandi saamiseks kasutatakse valupead (kompensaatorit).

Liivvormide ja -kärnide valmistamisel kasutatakse *vormimaterjale* – vormiliiva ja sideaineid (vormisavi, vesiklaas, polümeervaigud). Vormiliiv (tavaliselt kvartslüüv SiO_2) on vormi ja kärnisegude põhiosis. Vormisavi (kuni 15% segu mahust) on liivvormide põhiline sideaine.

Valuvormi käsitsi ja masinvalmistamise põhioperatsioonideks on vormkasti täitmine vormiseguga, tihendamine ja mudeli eemaldamine vormist. Oluliseimaks tehnoloogiliseks variandiks on vormimine kahte vormkasti poolitavaid mudeleid kasutades (sele 2.3).

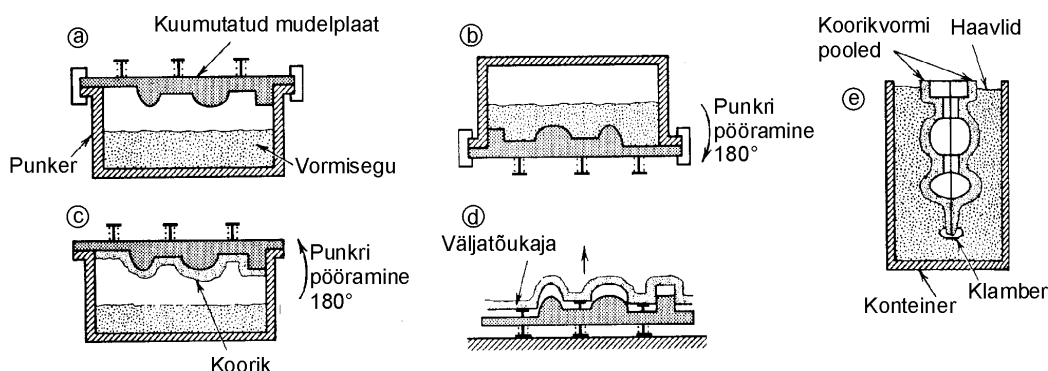
Vormipoolte vormimisele järgneb *kuivvormide* valmistamisel vormide kuivatamine nende tugevuse suurendamiseks ja gaaside eraldumise vähendamiseks sulametalliga kokkupuutel. Väikeseid valandeid toodetakse enamasti kuivatamata valuvormides – *märgvormides*.

Valuvormid täidetakse valukoppade abil. Sellele järgneb valandi tardumine ja ettenähtud temperatuurini jahutamine. Malmvalandid jahutatakse temperatuurini 400...500 °C, tugevamad terasvalandid temperatuurini 500...700 °C. Valandite eemaldamiseks (väljalöömiseks) kasutatakse spetsiaalseid seadmeid – väljalöömisreste. Valandis sisemisi õõnsusi moodustavad kärnid eemaldatakse eriseadmetel.



Sele 2.3. Liivvorm

Pärast valu-
vormist eemalda-
mist tehakse va-
landite järeltöötle-
mine – valukana-
lite ja pinnadefek-
tide eemaldamine,
juga- või trummel-
puhastus. Juga-
puhastamisel töö-
deldakse valandite
pinda haavli-
joaga. Trummel-
damisel puhasta-
takse suhteliselt
väikeste valandite pind puhastamine abrasiivmater-
jaliga täidetud pöörlevas trumlis.



Sele 2.4. Koorikvormi valmistamine

sulavmodeliga ja täppisvaluks gasifitseeruva
modeliga.

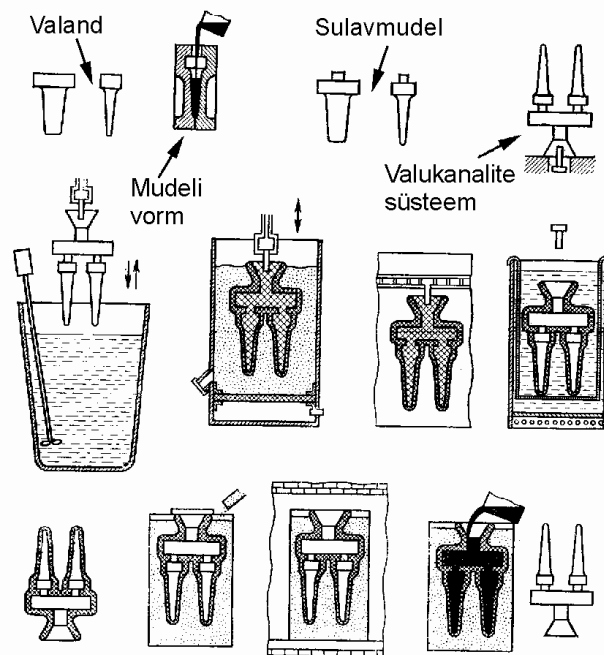
Liivvormvalu on enimkasutatav valumeetod –
sel viisil toodetakse ligikaudu $\frac{3}{4}$ kõikidest valan-
ditest. Liivvormvalu teel toodetavate valandite mass
ei ole põhimõtteliselt piiratud ja võib ulatuda tuhan-
dete tonnideni. Nii suurte valandite tootmine ei ole
võimalik vormkaste (sele 2.3) kasutades. Sel juhul
kasutatakse eritehnoloogiat – pörand- e. kessoon-
vormimist. Kessoon e. valukaevend on tellistest või
raudbetoonist pörandasse ehitatud kast vormi-
miseks ja sulametalliga täitmiseks.

Koorikvalu toimub koorikvormides (seina-
paksusega 8...12 mm), mis valmistatakse kuumu-
tatud metallmodelit kasutades. Vormimaterjaliks on
liiv, mida seob polümeerväik.

Koorikvorm valmib järgmiselt (sele 2.4).
Temperatuurini 200...250 °C kuumutatud metallist
mudelplaadit kinnitatakse punkrile (a), mida pöörat-
akse koos vormiseguga 180° (b). Vormisegu
puistatakse mudelplaadile ja hoitakse seal 10...30 s.
Vaik sulab 6...10 mm paksuses vormisegu kihis ja
kleebib liivaterad kokku. Seejärel pööratakse punker
endisesse asendisse (c). Koorikut koos mudel-
plaadiga kuumutatakse ahjus 300...350 °C 1...2
minutit, misjärel kõvenenud koorik eemaldatakse
mudelplaadilt (d). Analooiliselt valmistatakse
koorikvormi teine pool, samuti koorikkärnid (seest
õõnsad kärnid). Enne vedelmetalliga täitmist pan-
nakse vorm kokku, kasutades liimimist või klambreid
(e). Deformeerumise ja purunemise vältimiseks
(koorikvorm on õhukeseseinaline) ümbritsetakse
koorikvorm valamisel puistematerjaliga, näiteks
malmhaavliteliga.

Koorikvalu eeliseks liivvormvaluga võrreldes
on valandite täpsus ja hea pinnakvaliteet, takista-
matu kahanemine, valandit on kerge vormist eemal-
dada, vormisegu kulub vähe. Koorikvaluga toode-
takse keerulisi, sageli õhukeseseinalisi piiratud
massiga (kuni 300 kg) valandeid, näiteks mootor-
ratate silindriplokke, autode nukk- ja väntvõlle jms.

Täppisvalu kõige iseloomulikumaks tunnu-
seks teiste valumeetoditega võrreldes on tervik-
vormide ja ühekordselt kasutatavate valumodelite
kasutamine. Valumodelid valmistatakse täppisvalu
tarvis kõige sagedamini kergsulavast segust, sageli
ka sulametalli toimel gasifitseeruvast vahtplastist.
Vastavaid valumeetodeid nimetatakse täppisvaluks



Sele 2.5. Täppisvalu sulavmodeliga. a – mudeli
valmistamine, b – kooriku valmistamine, c – vormi
koostamine ja täitmine

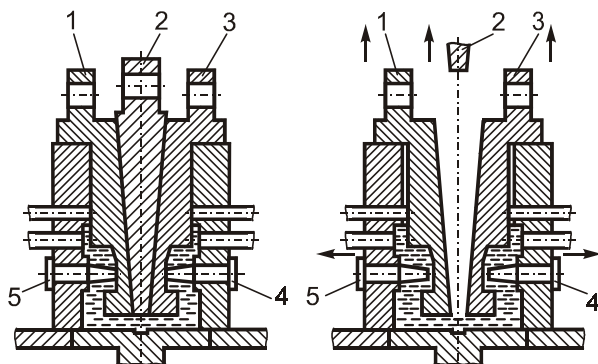
Sulavmodelid valmistatakse kergsulavatest
segudest, mille koostis on lähedane küünalde
tootmisel kasutatavaga (sele 2.5). Edasi koosta-
takse mudelitest ühise valukanalite süsteemiga
plokk. Mudeliploki tekitatakse koorik, mis moodus-
tabki valuvormi. Kooriku tekitamiseks kastetakse
mudeliplokk keraamilisse suspensiooni (kvartstolmu
ja teatava polümeeri segu), tolmutatakse kvarts-
liivaga ja kuivatatakse. Kihte kantakse mudelile kuni
12. Vormi sees olev mudel sulatatakse välja kuumas
vees või kuumas auruga. Õhukese seinaga kooriku
deformeerumise vältimiseks valamisel ümbritse-
takse see nagu koorikvaluski puistematerjaliga.
Vormi tugevdamiseks kuumutatakse seda elektri-
ahjus 900...950 °C. Kuum vorm täidetakse sula-
metalliga. Tardunud valandilt eemaldatakse koorik
vibrorestidel nagu liivvormvaluski.

Täppisvalu eeliseks on valandite täpsus tänu
tervikkvormide kasutamisele. Puuduseks on tehnolo-

loogia keerukus ja valandite kõrge omahind. Kasutatakse täpsete, keeruka kujuga ja õhukeseseinaliste, piiratud massiga (kuni 100 kg) valandite tootmiseks.

2.2.4. Valu korduvkasutusega vormidesse

Kokillvalu korral kasutatakse korduvkasutusega, enamasti malmist vorme. Metallvormi mõned osad – eelkõige sisemisi õõnsusi moodustavad kärnid – võivad olla valmistatud liivast. Kokill on enamasti kaheosaline, koostatav. (sele 2.6) Mootorikolvi siseõõnsust moodustav metallkärn koosneb keskmisest (2) ja kahest külgmisest (1 ja 3) osast. Peale kokilli täitumist sulametalliga ja piisavalt tugeva kooriku moodustumist keskmine ja külgmised kärnid, samuti kolvi külgevastid moodustavad metallkärnid (4 ja 5) eemaldatakse. Valmisvaland eemaldatakse kokillist tõukuritega. Valand kristalliseerub metallvormis kiirelt, mistõttu on kokillvalus raske saada keerulisi ja õhukeseseinalisi valandeid.

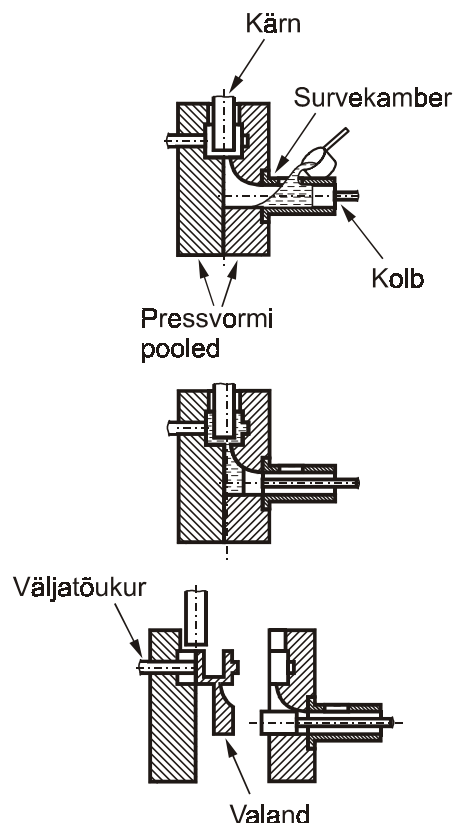


Sele 2.6. Koostatava kärniga kokill mootorikolvi valamiseks. 1, 2, 3, 4, 5 - metallkärnid

Kokillvalu eeliseks on vormi korduvkasutus – üks kokill peab vastu kuni 10 000 malmist ja kuni 250 000 Al-sulamist valandit. Kokillvalu kasutatakse piiratud massiga (kuni mõnisada kg) valandite tootmisel suhteliselt madala sulamistemperatuuriga metallisulamitest: Al-, Mg-, Cu-sulamid, malm.

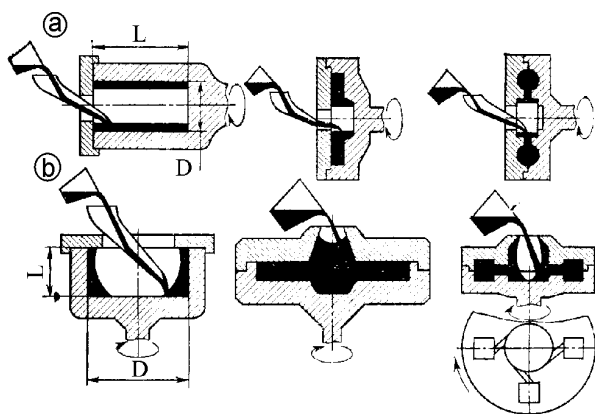
Survevalu on kokillvalu edasiarendus – valandite tootmine metallvormides, nn. *pressvormides* vormiõõne surve all täitmisega. Survevalu kasutatakse survevalumasinaid (sele 2.7). Sulametalldoseeritakse survekambris, kust sulametal surutakse kolviga pressvormi õõnde. Valandi õõnsuse moodustab metallkärn. Valand eemaldatakse väljatõukuriga.

Survevalu eeliseks on suur tootlikkus – kuni 3600 valandit tunnis ning valandite täpsus ja pinnasiledus. Peamiseks puuduseks on valandite gaasipoorsus, mis tekib pressvormi väga kiirel täitumisel sulametalliga, mistõttu õhk ei jõua vormiõõnest täielikult väljuda. Survevalu kasutatakse nagu kokillvalugi peamiselt madala sulamistemperatuuriga metallisulamitest (Al-, Mg-, Cu-, Zn-sulamid) ja piiratud massiga (kuni 50 kg) valandite hulgi-tootmisel. Sellised tooted on näiteks Al-sulamitest karburaatoridetailid, mootorrataste silindriplokid, Cu-sulamitest sanitaartehtiline armatuur jms.



Sele 2.7. Survevalu külmsurvekambriga horisontaalsurvevalumasinal

Tsentrifugaalvalu on valumeetodite üldnimetus, mille puhul sulametalli vormimine toimub tsentrifugaaljõudude toimel. Olenevalt pöörleva vormi telje asendist eristatakse horisontaalset ja vertikaalset tsentrifugaalvalu (sele 2.8). Tsentrifugaalvalu eeliseks on võimalus saada sisemise õõnsusega valandeid kärne kasutamata, samuti poorsuse puudumine ja valandite täpsus. Puudub vajadus valukanalite süsteemi järgi. Tsentrifugaalvalu teel toodetakse kõige enam õõnsaid valandeid, näiteks malmtorud, automootori malmhülsid jms.



Sele 2.8. Horisontaalne (a) ja vertikaalne (b) tsentrifugaalvalu

2.3. Survetöötlus

2.3.1. Liigitus

Plastse deformeerimisega kaasneb metalli struktuuri ja järelikult ka omaduste oluline muutumine – *kalestumine*. Kalestumine väljendub metalli tugevnenemises – mida suurem on plastne deformeerumine, seda tugevamaks (ka kõvemaks) metall muutub. On olemas kalestumisele vastupidine protsess – *rekristalliseerumine*, mille kestel metalli esialgne, kalestumisele eelnenud struktuur ja omadused, sh. metalli esialgne plastsus taastuvad. Rekristalliseerumine algab temperatuuril, mis on ligikaudu pool metalli või -sulami sulamistemperatuurist.

Survega töötlemisel toimub pooltoodete (toodete) vormimine tahkest metallist kas külmalt või kuumalt. Vastavalt sellele eristatakse külmsurvetöötlust ja kuumsurvetöötlust. *Külmsurvetöötluseks* nimetatakse survetöötlust temperatuuridel allpool metallisulami rekristalliseerumistemperatuuri. Terastel on see temperatuur 500...600 °C. Külmsurvetöötlusega kaasneb metalli kalestumine, mistõttu deformatsiooniaste on piiratud. *Kuumsurvetöötluseks* nimetatakse survetöötlust temperatuuridel üle metallisulami rekristalliseerumistemperatuuri. Kuna rekristalliseerumisega kaasneb metalli plastsete omaduste taastumine, siis kuumsurvetöötlemisel deformatsiooniaste ei ole piiratud. Teraste puhul on kuumsurvetöötluse alamiseks piiriks tavaliselt 750...800 °C.

Tööstustemperatuurile liiks kasutatakse survetöötlusprotsesside liigitamist tooriku liigi järgi. Eristatakse maht- ja lehtvormimist. *Mahtvormimisel* kasutatakse toorikutena ümar- või ristkülikulise ristlõikega toorikuid. *Lehtvormimisel* kasutatakse toorikutena lehtmaterjali (plekki). Maht- ja lehtvormimise tüüpprotsessid on seletatud 2.9.

Survetöötlusprotsesse liigitatakse samuti pidevprotsessideks ja perioodilisteks protsessideks. Survetöötluse *pidevprotsessideks* on valtsimine, ekstrudeerimine ja tõmbamine (sele 2.9a), mida rakendatakse peamiselt metallprofiilide tootmisel metallurgiatööstuses.

Survetöötluse *perioodiliste protsesside* abil toodetakse tükktöoteid. Sellised protsessid on sepistamine, vormstantsimine (mahtvormimisprotsess) ja leht-

stantsimine (lehtvormimisprotsess).

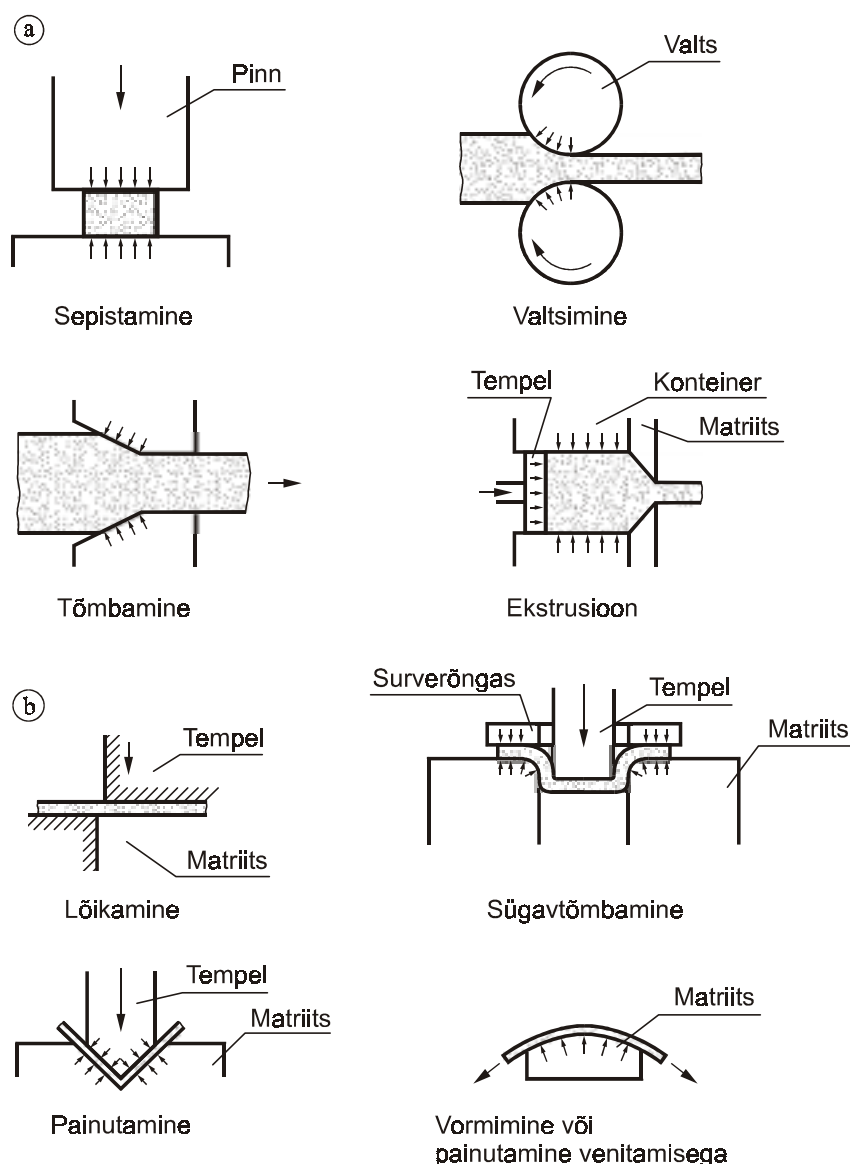
2.3.2. Metallide survetöödeldavus

Survetöödeldavusele (deformeeritavusele) avaldavad mõju metallisulami keemiline koostis, töötlemistemperatuur, deformeerimiskiirus ja muud tegurid.

Suurim plastsus ja järelikult deformeeritavus on puhastel metallidel ning tardlahustel. Teraste puhul avaldab survetöödeldavusele suurimat mõju süsinikusisaldus. Üldiselt on kuni 0,5% süsinikusisaldusega terased külmsurvetöötlemiseks piisavalt plastsed. Legeerimendid (väljaarvatud Ni) vähendavad plastset.

Temperatuuri kasvades üldjuhul metalli plastsus suureneb. Siiski mõnedes temperatuurivahemikes, näiteks paljudel terastel 300 °C piirkonnas (nn. sinihparuse piirkond) plastsus hoopiski väheneb.

Deformeerimiskiiruse all mõistetakse survetöötlusmasina (vasar, press) tööorgani liikumis-



Sele 2.9. Maht- (a) ja lehtvormimisprotsessid (b)

kiirust. Üldiselt deformeerimiskiiruse kasvades plastsus (deformeeritavus) väheneb. Mõnede metallisulamite plastsus võib ülisuurtel deformeerimiskiirustel (näiteks plahvatusesga stantsimine) aga hoopiski suurenda.

2.3.3. Survetöötlemise mahtvormimisprotsessid

Valtsimine on survetöötlemise pidevprotsess, mille puhul toorik tõmmatakse hõõrdejõudude toimel pöörlevate valtside vahele (sele 2.9a). Valtsimine on enimlevinud survetöötlusmeetod: ca 90% toodetavast terasest ning 50% mitterauasulamitest (Cu-, Al-jt. metallide sulamid) valtsitakse.

Valtsimisprodukt – valtsmetall – on reeglina standardiseeritud. Valtsmetall liigitatakse sordimetalliks, lehtmetailiks (plekk), torudeks ja spetsiaalseteks valtsitud toodeteks (vt. ka p. 2.1).

Sordimetall liigitatakse lihtprofiilideks (ümar, nelikant-, kuuskant- ja lintvaltsmetall) ning kuju-
profiilideks (T-tala, I-tala, rööbas jms.).

Plekk (lehtmetail) liigitatakse paksplekiks (paksus 4...160 mm), õhukeseks plekiks (paksus 0,2...3,9 mm) ning fooliumiks (paksus alla 0,2 mm). Valtsimistemperatuuri järgi eristatakse külma- ja kuumvaltsplekki.

Torud liigitatakse õmbluseta torudeks ja keevistorudeks (õmblusega torudeks). Õmbluseta torusid toodetakse valtsitud ümarprofiilist siseõõnsuse moodustamisega torni abil. Keevistorusid tehakse metalliribakujulisest torutoorikust, mis erilistes valtspinkides järk-järgult toruks vormitakse ja seejärel piki õmblust kinni keevitatakse. *Spetsiaalsete valtsitud* hulka kuuluvad perioodilised profiilid masinaehitusele (näiteks väntvõlli toorik autoehitusele), tervikrattad vaguniehitusele, kuulid, rõngad, hammasrattad, sarrusmetall ehitustööstusele jms.

Valtsimisel on lähtetoorikuks metallurgia-tööstuse valuplokid. Valtsmetall saadakse mitut valtsimislabimit kasutades, milliste kestel toimub pidev valtsitoote lõppkujule lähenemine. Plekki valtsitakse siledade silindriliste valtsidega, kusjuures iga läbimiga lähendatakse valtsi teineteisele. Sordimetalli valtsitakse vagudega valtside vahel ja mingi valtsitoote (kuuskant, rööbas, I-tala jms.) saamiseks tuleb samuti kasutada mitut labimit.

Ekstrudeerimine on kuumsurvetöötlemise pidevprotsess, mille puhul konteinerisse (sele 2.9a) paigutatud toorik surutakse templi abil läbi matriitsiava. Saadava pooltoote – ekstruusi – ristlõige on ühesugune matriitsi ava ristlõikega.

Ekstrudeerimisel on toorikuks valuplokk või valtsmetallist väljalõigatud toorik. Ekstrudeeritakse tavaliselt mitterauasulameid (Al-, Mg, Cu-sulamid), harvem teraseid. Toodetakse nii lihtsa kui ka väga keerulise ristlõikega profiile, samuti torusid. Tehnoloogiliste iseärasuste tõttu saab toota profiile, mida valtsimisega toota ei ole võimalik, näiteks nelikant- või ovaalse ristlõikega torusid.

Ekstrudeerimise eelisteks valtsimisega võrreldes on suurte deformatsiooniastmete võimalus, samuti võimalus ekstrudeerimisagregaati kiirelt ühelt

profiililt teisele häälestada. Enamasti piisab matriitsi vahetusest. Parem on ekstrudeeritud profiilide täpsus. Puuduseks on ekstrudeerimisjäägi moodustumine, sest tooriku kogu metalli ei ole võimalik konteinerist välja pressida. Valtsimisest väiksem on tootlikkus.

Tõmbamine on survetöötlemise pidevprotsess, mille puhul traadi-, varda-, toru- või ribakujuline pooltoode (või toode) saadakse tooriku tõmbamisega läbi tõmbesilma (sele 2.9a). Tõmbamisel on võimalikud deformatsioonid piiratud tõmbesilmast väljaulatuva profiili tugevusega. Seetõttu tõmmatakse tavaliselt külmalt, kui metalli tugevusomadused on piisavad. Külmtõmbamisel toimub metalli kalestumine (tugevnemine), kusjuures samal ajal saavutatakse toote suur täpsus ja pinnasiledus. Juhul kui tõmbamisel tooriku ristlõikemõõtmed oluliselt ei muutu, ent eesmärk on profiili suur täpsus ja pinnasiledus, nimetatakse tõmbamist *kalibreerimiseks*.

Tõmbamisel on toorikuks valtsmetall või ekstruusi (ekstrudeeritud toode). Tõmmatakse teraseid ja praktiliselt kõiki mitterauasulameid. Tõmbamine on praktiliselt ainus traadi (tõmmatakse traati läbimõõduga 0,002...6 mm) ja väikese ristlõikemõõtmetega torude saamise meetod. Külmtõmbamisel metall kalestub, mistõttu suurte deformatsioonide saavutamiseks kasutatakse mitut tõmbeastet, mille vahel toimub metalli esialgset plastsus taastav vaheldõmutamine metallisulami rekristalliseerumistemperatuuri ületaval temperatuuridel.

Sepistamine e. vabasepistamine on survetöötlemise perioodiline protsess (sele 2.9a). Sepistatakse tavaliselt kuumalt. Saadud pooltoodet või toodet nimetatakse *sepiseks*. Eristatakse käsitsi sepistamist ja masinsepistamist. Viimane jaguneb omakorda sepistamiseks vasaratel ja sepistamiseks pressidel.

Sepistamine vasaratel on leidnud sepiste tootmisel kõige laiemat kasutamist. Sepistusvasarad kuuluvad dünaamilise toimega seadmete hulka – vasarapea liikumiskiirus kontakti hetkel toorikuga ulatub kuni 10m/s. Erinevat tüüpi sepistusvasarate põhiosa on vasarapea, mille külge kinnitatakse ülemine pinn, massiivne alasi, alasile kinnitatud padi, mille külge omakorda kinnitatakse kiilude abil alumine pinn (sele 2.10). Vasarapea käitamiseks kasutatava keskkonna järgi eristatakse auruvasaraid, suruõhuvasaraid ning hõõrd- e. friksioonvasaraid (sele 2.10b).

Auruvasarate (sele 2.10a) vasarapea tõstetakse ja langemisel kiirendatakse auruga. Hõõrdvasaratel (sele 2.10b) on vasarapea külge kinnitatud tugevast puidust laud, mille vahendusel rullid tõstavad vasarapea hõõrdejõu abil soovitud kõrgusele. Sobiv vasar valitakse langevate osade massi või löögienergia järgi.

Raskete sepiste (massiga üle 2...3 tonni) tootmisel kasutatakse sepistamist pressidel. Põhiliselt kasutatakse hüdropresse (sele 2.10e). Hüdropressi tööpõhimõte on lihtne – pressi liuguri külge kinnitatud pinni töökaigul kasutatakse tööd,

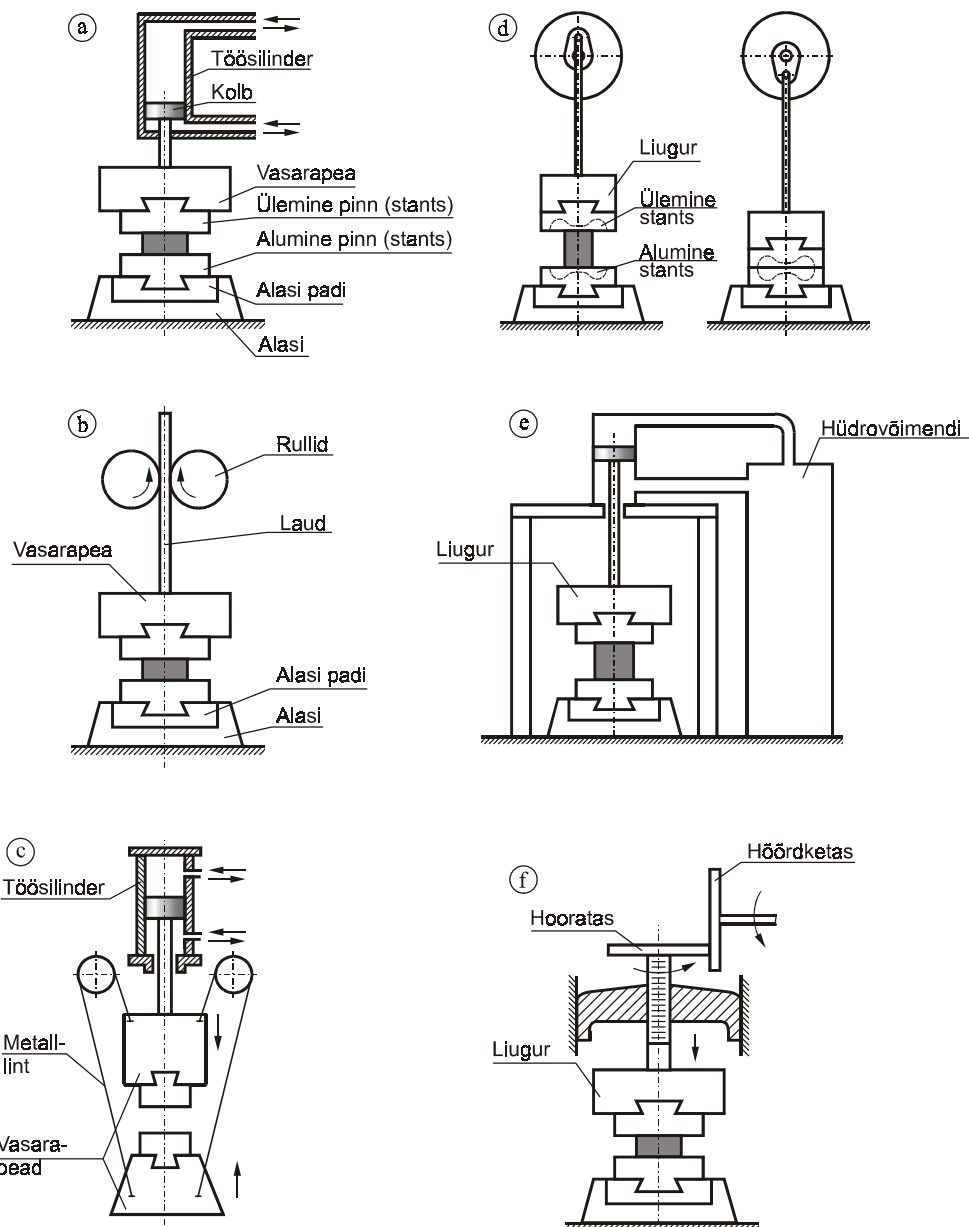
mida sooritab pressi töösilindris olev kõrge rõhu all vedelik. Tehnoloog valib pressi survejõu järgi.

Vormstantsimisel kasutatakse tooriku deformeerimiseks eritööriistu – stantsivagudega stantse. Vormstantsimine on survetöötuse perioodiline protsess, kus sepiamisest erinevalt on metalli voolamine stantsivao vormiga piiratud. Metallil on võimalik stantsivaost, soovitatavalt pärast selle kõikide uurete täitumist, väljuda vaid spetsiaalsesse kitsasse kraadisoonde (sele 2.11).

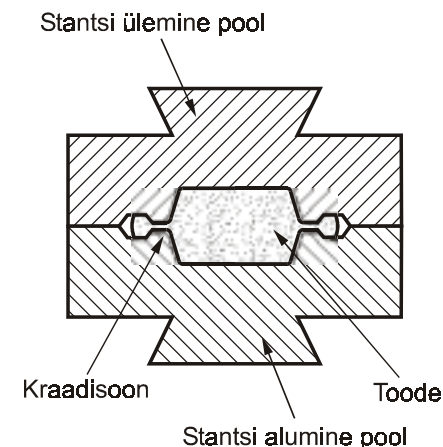
Vormstantsimise iseärasused, sepiamisega võrreldes, on järgmised:

1. Stantsitud toodete – stantsiste – piiratud mass (üldjuhul kuni 500 kg), samal ajal kui sepiaste mass võib ulatuda sadade tonnideni.
2. Märksa suurem tootlikkus, kuid kasutatavate spetsiaaltööriistade – stantside – kõrgest maksumusest tingituna leiab vormstantsimine kasutamist peamiselt massvalmistusel.
3. Stantsiste täpsus ja pinnakvaliteet ületavad sepiaste oma, mis vähendab täiendava mehaanilise töötuse (lõiketöötuse, vt. 2.5) mahukust.
4. Kasutatakse reeglina suurema võimsusega seadmeid (vasaraid, presse) kui sepiamisel. Põhjuseks on metalli voolamine vormstantsimisel kogu mahus, samal ajal kui sepiamisel deformeeritakse toorikut osade kaupa, s.t. piiratud mahus.
5. Võimalus valmistada keerukamaid tooteid kui sepiamisel (sele 2.12).

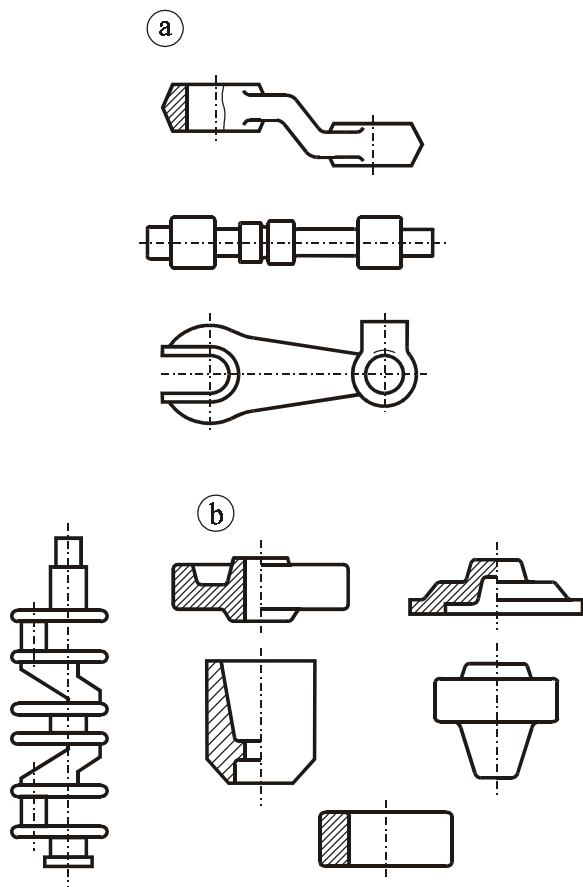
Deformeerimistemperatuuri järgi eristatakse kuum- ja külmvormstantsimist. *Kuumvormstantsimine* on leidnud kõige laiemat kasutamist keskmise ja suure massiga stantsiste tootmisel.



Sele 2.10. Sepistus- ja vormstantsimisseadmete skeemid. a – auruvasar, b – hõõrd- e. friksioonvasar, c – vastulöögivasar, d – vāntpress, e – hüdروpress, f – krupipress



Sele 2.11. Kraadisoonega vasarastants



Sele 2.12. Vormstantsitud tooted. a – venitatud pikiteljega, b – telgsümmeetrilised tooted

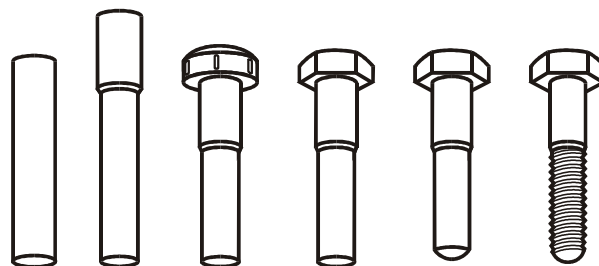
Külmvormstantsimist kasutatakse peamiselt väikeste stantside (massiga kuni 0,1 kg) tootmisel, sest kiire jahtumise tõttu väikesteid stantsiseid kuumstantsida ei saa.

Kuumvormstantsimist, nagu sepistamistki, liigitatakse kasutatava seadme järgi: kuumvormstantsimine vasaratel ja kuumvormstantsimine pressidel. Esimesel juhul kasutatakse stantsimisvasaraid, mille ehitus ja põhiparameetrid on sarnased sepistusvasarate omale (sele 2.10). Kuumvormstantsimisel kasutatakse auruvasaraid ja hõõrd- e. friktsioonvasaraid. Selliste vasarate puuduseks on löögienergia suure osa hajumine vasara konstruktsioonelementides ja vundamendis. Märgetavalt suurem kasutegur on vastulöögivasaratel (sele 2.10c), millel vasarapead ja nende külge kinnitatud stantsipooled liiguvad teineteise vastu.

Kuumvormstantsimisel, samuti külmvormstantsimisel kasutatakse peamiselt mehaanilisi presse. Mehaanilistest pressidest on enimkasutatavad vāntpressid ja kruvipressid (sele 2.10). Vāntpressidel kāitatakse pressi liugurit vāntmehhanismi abil. Kruvipressil edastatakse liugurile hooratta kineetiline energia kruviülekanne kasutades. Kuumvormstantsimisega toodetakse maailmas massi järgi suurim kogus stantsiseid.

Arvuliselt suurim kogus stantsiseid toodetakse *külmvormstantsimisega*. Külmvormstantsitakse toatemperatuuril piisava plastsusega (deform-

meeritavusega) metalle: süsinikkonstruktsiooniterased süsinikusisaldusega kuni 0,5%, plastsed legerterased, Al-, Cu-, Ti-, Pb-, Zn- ja Sn-sulamid. Külmvormstantsimise eelisteks kuumvormstantsimisega võrreldes on stantside kõrge täpsus ja pinnakvaliteet. Puudusteks on kõrged nõuded tööriista (stantsi) materjali suhtes, eelkõige kõrge surve tõttu deformatsiooniprotsessis. Külmvormstantsimisel on vajalikud märksa suuremad deformatsioonijõud ja -energia kui kuumvormstantsimisel. Külmvormstantsimine on majanduslikult õigustatud stantside massivalmistamisel. Külmvormstantsimisega toodetakse näiteks selliseid tooteid nagu kruvid, poldid, mutrid, needid, naelad. Poldi järk-järguline kujunemine külmvormstantsimisel stantsi eri vagudes koos järgneva keermesrullimisega on näha sele 2.13.



Sele 2.13. Poldi külmvormstantsimine järgneva keermesrullimisega

2.3.4. Survetöötuse lehtvormimisprotsessid

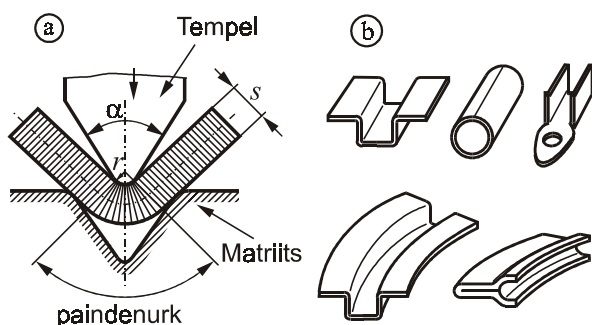
Lehtstantsimisel e. lehtvormimisel kasutatakse toorikuna plekki, samuti lihtmetalli pleki kitsa ribana. Lehtstantsitakse üldjuhul külmalt, kusjuures lehttooriku paksus muutub tavaliselt vähe. Tinglikult saab lehtstantsimisoperatsioonid liigitada kahte gruppi:

- 1) eraldusoperatsioonid, kus toimub tooriku ühe osa eraldamine teisest ette antud kontuuri mööda;
- 2) kujumuute- e. vormimisoperatsioonid, kus tasapinnalisele toorikule antakse ruumiline vorm.

Tähtsamad eraldusoperatsioonid on toodud selel 2.14. *Mahalõikamine* (a) seisneb tooriku osa täielikus eraldamises lahtist kontuuri mööda. *Tükeldamine* (b) on tooriku jaotamine kaheks või enamaks tooteks (pooltooteks) lahtist kontuuri mööda. *Väljalõikamine* (c) on tooriku osa täielik eraldamine kinnist kontuuri mööda, kusjuures eraldatud osa on tooteks või pooltooteks. *Avalõikamine* (d) on väljalõikamisele sarnane eraldusoperatsioon – ava moodustamine toorikusse suletud kontuuri mööda, kusjuures eraldatud osa on jäätmeiks. *Sālkamisel* (e) eraldatakse materjali tooriku servast. *Sisselõikamine* (f) toimub mööda avatud kontuuri, ilma materjali eraldamiseta. Sisselõikamist tehakse tavaliselt tooriku mingi osa painutamiseks tasapinnast välja. *Āralõikamine* (g) on viimistlev operatsioon näiteks viimistlevaks töötlemiseks jäetud varu või kraadi eemaldamiseks stantsitud tootelt. *Puhastamine* (h) on viimistlusoperatsioon stantsise servade

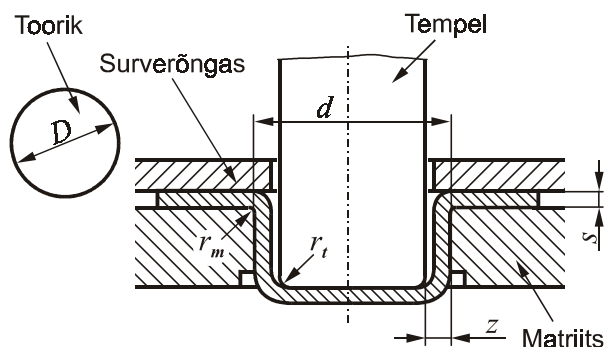
Lehtstantsimise vormimisoperatsioonide hulka kuuluvad painutamine, sügavtõmbamine, ahendamine, avardamine, vormimine venitamisega, reljeefstantsimine jt. operatsioonid.

Painutamine on tooriku osade vaheliste nurkade moodustamine või muutmine (sele 2.15). *Painutamine* paindenurga säilumisega saab võimalikuks tänu plastsetele deformatsioonidele paindekohas. Minimaalne painderadius r_{min} on piiratud pragude tekkimise võimalusega paindekoha välismiseks materjalikihis. Minimaalne painderadius sõltub lehtmaterjali paksusest s_0 .



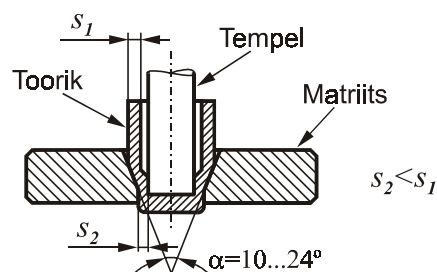
Sügavtõmbamine on lehtstantsimise vormi-
misoperatsioon, kus tasapinnaline toorik deformee-
ritakse (tõmmatakse) ruumiliseks õõneskehaks.
Sügavtõmmatav toorik läbimõõduga D saadakse
plekist väljalõikamisega. Sügavtõmbamisel tõmma-
takse toorik matriitsi avasse templiga (sele 2.16).
Tooriku purunemisvõimaluse vähendamiseks ümar-
datakse templi ja matriitsi servad. Templi ja matriitsi
vaheline pilu $z = (1,1...1,2)$ s (s on pleki paksus).
Voldite vältimiseks kasutatakse surverõngast, mis
surub ääriku matriitsi otspinna vastu.

selliste toodete tootmisel, mille pikkuse ja läbimõõdu suhe on suur (õhukeseseinalised torud ja anumad, näit. joogipurgid, tulekustutite ja gaasiballoonide korpused jms.)



A diagram of a cross-section of a cell. The cell is roughly oval-shaped with a wavy outer boundary. Inside, there is a large, dark, oval nucleus. Within the nucleus is a smaller, lighter, spherical nucleolus. An arrow points from the label 'Nucleolus' to the nucleolus.

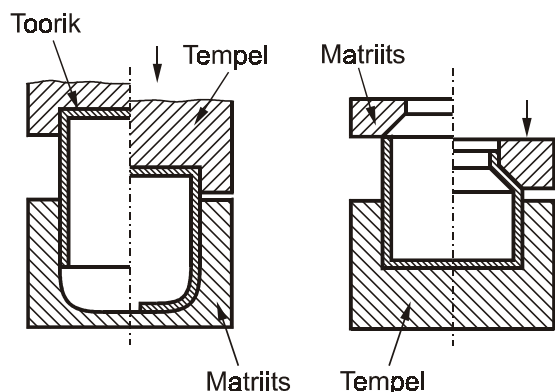
Ahendamine on vormimisoperatsioon õõneskeha kohalikuks ahendamiseks. Tavaliselt ahendatakse õõneskeha otsa (sele 2.18). *Avardamine* on ahendamisele vastupidine operatsioon eesmärgiga õõneskeha läbimõõtu suurendada.



Vormimine venitamisega seisneb tooriku vormimises vormimistemplil e. -pakul. Meetod on saanud alguse lennukitööstusest, kus on vaja vormida suuri kereelemente väikesel arvul. Venitamisega vormimisel tekitatakse toorikus voolavuspiiri ületavad tõmbepinged, mis põhjustavad jäävaid tõmbedeformatsioone 1...4%. Nii väike plastne deformatsioon on piisav selleks, et tooriku vormimistemplil omandatud vorm oleks jääv. Vormimisega venitamine skeemidest on tuntuimad tõmbamisega venitamine (sele 2.19a) ja mähkimisega venitamine (sele 2.19b).

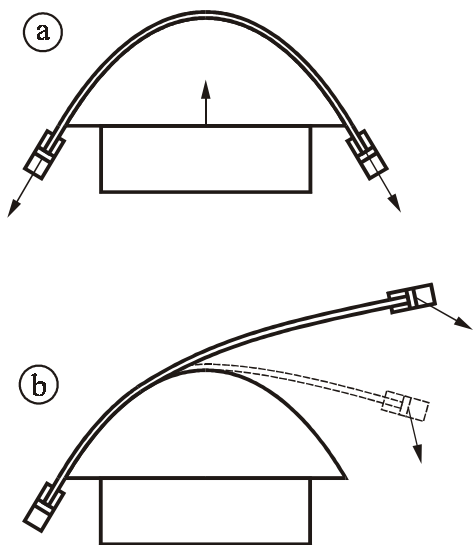
- 58 -

sega (näit. müntide verimimine), mille eesmärk on samuti pinnareljeefi moodustamine.

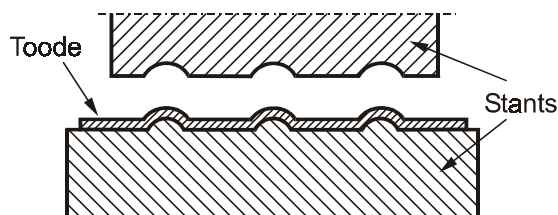


Sele 2.18. Ahendamine

Lehtstantsimisel kasutatavaid tööriistu – stantse – liigitatakse sageli stantsimisoperatsiooni järgi: avalõikestants, väljalõikestants, sügavtõmbestants jne. Väljalõikestantsi põhiosad on toodud selal 2.21. Tempel kinnitatakse pressi liugurile. Stantsi alusplaat kinnitatakse poltidega pressi töölaualle. Alusplaadi külge kinnitatakse matriits ja selle külge omakorda mahavõtja, mis tagab stantsitava metalliriba eemaldamise templilt selle tagasilükkumisel.



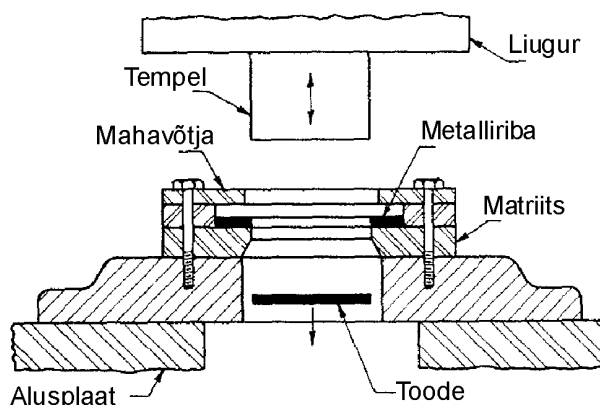
Sele 2.19. Vormimine venitamisega



Sele 2.20. Reljeefstantsimine

Lehtstantsimisel kasutatakse peamiselt mehaanilisi presse – vânt-, ekstsentrisk- ja kruvipresse, mis on

oma tööpõhimõttelt sarnased vormstantsimisel kasutatavate pressidega (vt. sele 2.10).



Sele 2.21. Väljalõikestantsi põhielemendid

2.4. Keevitamine, jootmine, termolõikamine ja -pindamine

2.4.1. Kevitusprotsesside liigitamine

Keevitamine on teraste ja mitterauasulamite enim levinud liitmismeetod nii tootmises kui remonttööl. Kevitusprotsesside hulka liigitatakse ka jootmine (p. 2.4.4), termolõikamine ja -pindamine (p. 2.4.5).

Kevitusprotsessid (meetodid) liigitatakse Euroopas enamasti kaheks põhirühmaks: sulakeevitus ja survekeevitus. *Sulakeevitusel* saadakse keevisõmblus nii, et sulatatakse liidetavate detailide servad lisamaterjali (elektrood, vardad) kasutades või ilma selleta. Sulakeevituse hulka kuuluvad kaarkeevitus, gaaskeevitus, räbukeevitus, elekterkontaktkeevitus jt. *Survekeevitusel* saadakse keevisõmblus liitepindu kokku surudes, vajaduse korral lisaks ka kuumutades. Survekeevituse alla kuuluvad külmkeevitus, ultrahelikeevitus, hõõrdkeevitus, plahvatuskeevitus.

Kevitusprotsesse võib liigitada ka liite moodustumisel rakendatava energia liigi järgi:

1. Termomeetodid, kus kasutatakse soojusenergiat (kaar-, plasma-, räbu-, elektronkiirkeevitus jt.).
2. Termomehaanilised meetodid, kus kasutatakse nii soojusenergiat kui mehaanilist jõudu (elekterkontaktkeevitus).
3. Mehaanilised meetodid, kus kasutatakse ainult mehaanilist energiat (ultraheli-, külm-, hõõrd- ja plahvatuskeevitus).

2.4.2. Metallide keevitatus

Keevitatavuseks nimetatakse ühesuguste või erinevate metallide omadust moodustada kvaliteedinõuetele vastav keevisliide. Kevitatavus sõltub keevitatavast materjalist, kasutatavast keevitustehnoloogiast, samuti keevisliite konstruktsioonist.

Praktikas on juurdunud 4 keevitatavuse hindamise astet: hea, rahuldav, piiratud, halb. Hea keevitatavuse korral on keevisõmblusel ligiläheda-

selt samad mehaanilised omadused kui keevitaval metallilgi. Keevitatavus on *rahuldav*, kui piisavalt hea keevisõmbuse saamiseks tuleb valida kindel (ratsionaalne) keevitusrežiim. *Piiratud* keevitatavuse korral tuleb kasutada erinevaid tehnoloogilisi võtteid (näiteks toorikute ettekuumutamine, järeltermotöötlus jne.) või isegi muuta keevitusviisi. *Halva* keevitatavuse puhul piisavat keevitatavust saavutada ei ole võimalik.

Metallide keevitatavust hinnatakse praodkindlusega. *Külmpraad* tekivad enamasti keevisõmbuse kõrval põhimetallis kohe või 10...48 tunni jooksul pärast keevitamist. Külmpragusid seostatakse suurest jahtumiskiirusest tingitud habraste karastusstruktuuride moodustumisega või metalli nn vesinikhaprusega (kõrgenenud vesiniku kontsentratsioonist tingituna). Külmpragude tekkimise oht on karastuvatel terastel, mille süsinikusisaldus on suurem kui 0,25%. *Kuumpraad* tekivad keevitamise ajal, tavaliselt õmbusmetallis. Praod tekivad kõrgel temperatuuril, kui õmbusmetall on pooltahkes või vasttardunud olekus. Kuumpragude tekkele kalduvad enamasti suure süsiniku-, väävli- ja fosforisisaldusega terased.

Nii külm- kui kuumpragude tekke põhjus on keeviskonstruktsioonis keevitamisel tekkivad keevituspinged. *Keevituspingeid* põhjustavad ebaühtlane temperatuuriväli (keevisõmbuse ligiduses on temperatuur märgatavalt kõrgem kui eemal), samuti keevisõmbuse lähiala takistatud paisumine kuumutamisel ja takistatud kahanemine jahtumisel.

Keevituspingeid ja nendest põhjustatud külm- ja kuumpragusid saab vältida liidetavaid toorikuid ette kuumutades (sellega väheneb temperatuuride ebaühtlus), samuti keeviskonstruktsiooni termilise järeltöötlemisega – lõõmutamisega keevituspingete kõrvaldamiseks. Suurte keeviskonstruktsioonide puhul ei ole võimalik kumbki eelnimetatud võtetest, mistõttu sellised konstruktsioonid (laevakered, autokered, mastid jms.) keevitatakse kokku hea keevitatavusega metallidest ja metallisulamitest, näiteks madalsüsinikterastest (süsinikusisaldus alla 0,25%).

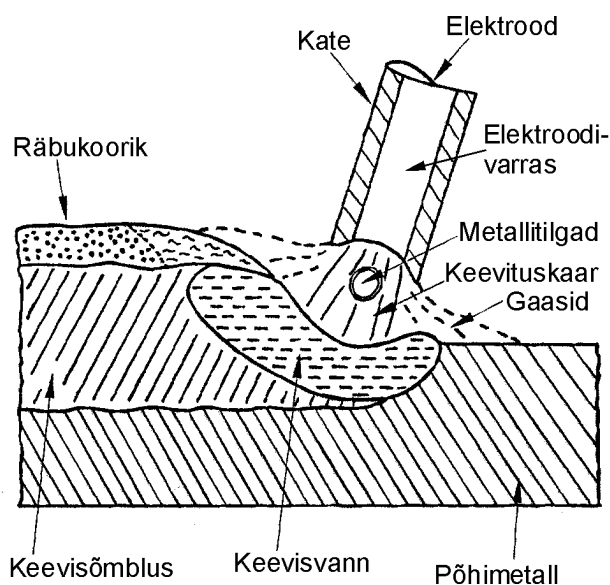
2.4.3. Tähtsamad keevitusmeetodid

Kaarkeevitamine e. elektrikaarkeevitamine on enimkasutatav keevitusmeetod (protsess). Kaarkeevitamisel kasutatakse elektriikaare poolt eralduvat soojusenergiat. Kaarkeevitamine on keevitusmeetodite üldnimetus, kus keevituskaare osalusel sulatatakse liidetavate detailide servad ja vajadusel samuti lisametall. Kaarkeevituse alaliigid on:

- elektrodkeevitus e. kaarkeevitus kattega elektrodidega,
- MIG/MAG-keevitus e. sulava elektrodiga kaarkeevitus kaitsegaasis,
- TIG-keevitus e. sulamatu elektrodiga kaarkeevitus kaitsegaasis,
- kaarkeevitus räubustis,
- elekter-räbukeevitus e. räbukeevitus,
- plasmakeevitus.

Elektrodkeevitamine kuulub rahvusvahelise liigituse järgi ilma kaitsegaasita kaarkeevitusmeetodite rühma.

Elektrodkeevitamisel (sele 2.22) kinnitatakse keevituselektrod elektrodihoidikusse. Keevituskaare, mille temperatuur on 5000...6000 °C, toimel elektrodivaras ja selle kate ning põhimetall sulavad. Tekib keevisvann, kuhu siirduvad elektrodimetalli tilgad ja katte sulamisel tekkinud räbu tilgad, mis moodustavad keevisvanni pinnal sularäbu kihi. Elektrodivarada ots sulab kattedest kiiremini, tekitades süvendi, mis suunab sulametalli tilgad ja katte lagunemisel tekkiva gaaside joa keevisvanni. Kattedest eralduvad gaasilised ained tekitavad kaarevahemikus keevisvanni kohale gaasikaitse ümbritseva keskkonna (õhu) hapniku ja lämmastiku mõju vastu. Keevisvanni jahtumisel moodustub keevisõmbus ning selle pinnale tardunud räbukoorig.



Sele 2.22. Elektrodkeevitamine

Keevituskiirus ja tootlikkus on elektrodkeevitusel väikesed – ühe elektroodi sulamise aeg on ühe-kahe minuti piires, millele järgnevad ajakaod elektrodide vahetamiseks ja kaare taassüütamiseks. Tänapäeval elektrodkeevituse osatähtsus väheneb, olles 20...25%.

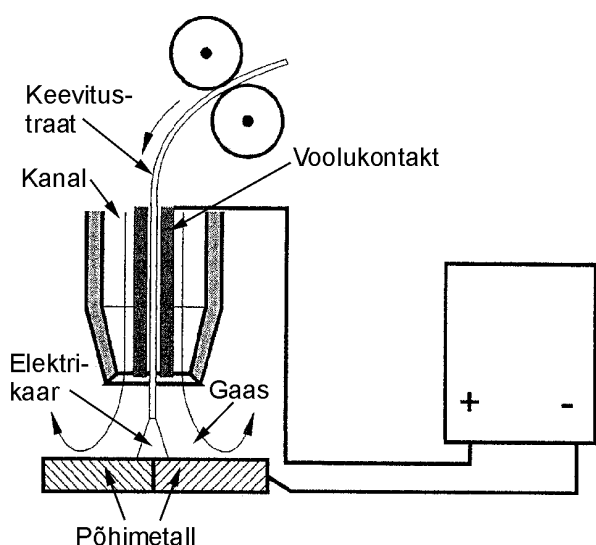
Elektrodkeevitamist kasutatakse kõikide teraseliikide, malmi, Cu-sulamite, piiratult ka Al-sulamite keevitamiseks. Elektrodkeevitamine sobib materjali paksustele üle 1,0...1,5 mm. Selle meetodi eelis on kasutatavus kõikides keskkonnatingimustes, võimalus keevitada õmbuse ruumis suvalise asendi puhul (põranda, seina ja laeõmbused), suhteliselt lihtsad ja teisaldatavad keevitusseadmed (keevitustrafod, keevitusallidid).

MIG/MAG keevitamist e. sulava elektrodiga kaarkeevitamist kaitsegaasis liigitatakse kasutatava kaitsegaasi järgi kahte gruppi:

- MAG-keevitamine e. kaarkeevitamine aktiivkaitsegaasis (näiteks süsihappegaasis CO₂),
- MIG-keevitamine e. kaarkeevitamine inertgaasis (näiteks argoonis).

Kuna mõlemad keevitusprotsessid erinevad vähe ja kasutatakse samu seadmeid, siis on sageli rahvusvaheliselt käibel lühend MIG/MAG-keevitamine.

MIG/MAG-keevitamisel tekitatakse traadikujulise elektroodi ja keevitatava detaili vahel kaarlahendus, mille soojusenergia toimel elektroodimetall ja põhimetall sulavad (sele 2.23). Keevituskaare piirkonda juhitakse gaasisuudmiku kaudu kaitsegaasi, mis kaitseb keevisvanni ja metallitilkasid õhuhapniku ja lämmastiku toime eest. Kevitustraati antakse kaarevahemikku traadietteandemehhanismi rullide abil. Kevitusvool juhitakse keevitustraati keevituspõletisse kinnitatava voolukontakti abil. MIG/MAG-keevitus on levinud põhiliselt poolautomaatkeevitusena – keevitustraati antakse ette automaatselt, põletit nihutatakse käsitsi.

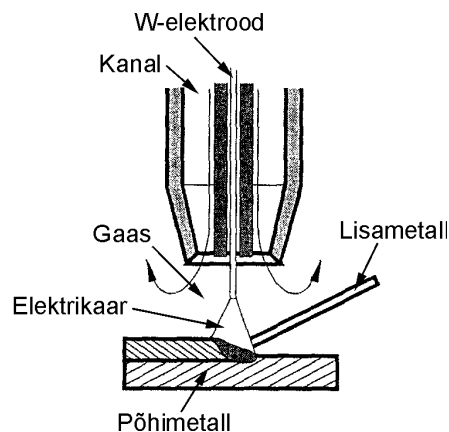


Sele 2.23. MIG/MAG-keevitamine (sulava elektroodiga kaarkeevitamine kaitsegaasis)

MIG/MAG-keevitamise eeliseks elektroodkeevitusega võrreldes on suur tootlikkus, kuna puuduvad ajakaod elektroodi vahetamiseks, keevitamisel ei teki räbu, ei ole vaja keevisõmblust rästust puhastada ja parem on õmbluse kvaliteet. Meetodi puuduseks on sobimatus välistingimustes, väiksem on keevitustraate valik. Kaitsegaas valitakse keevitamisel sõltuvalt keevitatavast materjalist: näiteks enimlevinud madalsüsinikterastest konstruktsioone keevitatakse enamasti kaitsegaasina süsihappegaasi (CO_2) kasutades. MIG/MAG-keevitus on tänapäeval maailmas enimlevinud keevitusmeetod, näiteks laevaehituses ja -remondis tehakse 95% töid MIG/MAG-keevitust kasutades.

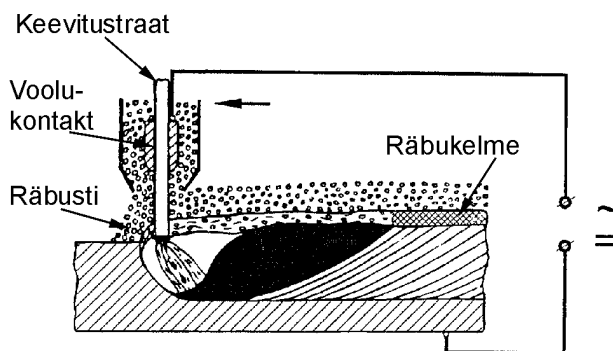
TIG-keevitamisel e. sulamatu elektroodiga kaarkeevitamisel kaitsegaasis põleb keevituskaar volframelektroodi otsa ja toote vahel (sele 2.24) ning on ümbritsetud keevituspõleti suudmikuist väljuva, kanalit läbiva gaasioaga. Kaitsegaas – argoon (Ar), harvem heelium (He) – kaitseb elektroodi ja keevisvanni ümbritseva õhu eest, ühtlasi keevituspõletit jahutades. Keevisvanni moodustamiseks kasutatakse lisametalli.

TIG-keevitus on levinud peamiselt käsikeevitusena. Kasutatakse õhukeste materjalide, alates 0,1 mm (võrdlusena: elektroodkeevitamisel alates 1,0 mm) keevitamisel. Kevitatakse peamiselt kõrglegeerteraseid ja kergoksüdeeruvaid metalle ja metallisulameid (Al, Mg, Ti jt.), aga samuti pronksi. Meetodi eelised ja puudused on samad, mis MIG/MAG-keevitamisel.



Sele 2.24. TIG-keevitamine

Kaarkeevitamine rästustis on kaarkeevitusprotsess, kus keevituskaar põleb pulbrilise rästusti kihi all katteta keevitustraadi ja detaili vahel (sele 2.25). Kaar põleb õhnsuses, mis on täidetud gaasidega ja pealt ümbritsetud sularäbuga. Sularäbu moodustab tardudes õmbluse peal klaasja rästukelme. Osa pulbrilisest rästustist ei sula ja seda saab uuesti kasutada.

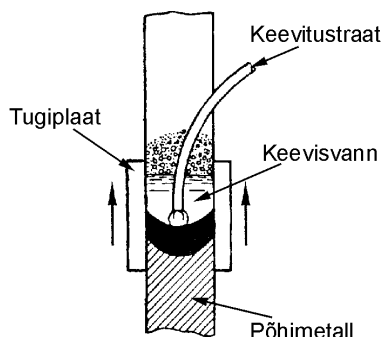


Sele 2.25. Kaarkeevitamine rästustis

Kaarkeevitamine rästustis on tavaliselt mehhaniseeritud, aga sageli ka automatiseeritud. Meetodi eeliseks on suur tootlikkus ja keevisõmbluse hea kvaliteet. Puuduseks on kasutamisevõimalus vaid õmbluse allasendis. Kasutatakse kui suure tootlikkusega keevitusprotsessi raskemasina- ja laevaehituses pikkade õmbluste keevitamisel, näit. katelde, surveanumate, korstnate puhul.

Elekter-rästukeevitamisel e. rästukeevitamisel liidetakse detailide servad ja sulatatakse elektrooditratit, kasutades keevisvanni peal asetsevat rästukihti läbivat elektrivoolu (sele 2.26). Protsessi alustamiseks tekitatakse elektrikaar elektroodi

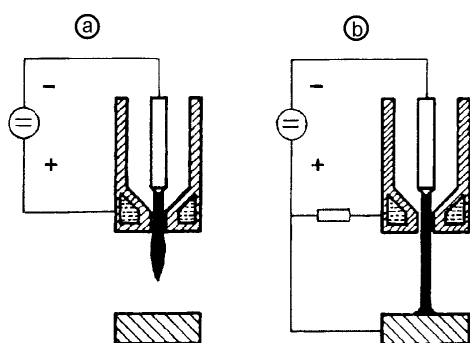
otsa ja alusplaadi vahel, millele on puistatud pulbriline räbukiht. Pärast teatud koguse sularäbu teket elektrikaar kaob ja elektrivool läbib sularäbu kihti. Keevisvanni piiratakse külgede poolt tugiplaatidega, mida jahutatakse veega. Keevisvanni moodustamiseks antakse pidevalt ette keevitustraati. Keevisvanni kristalliseerumisel moodustub keevisõmblus.



Sele 2.26. Elektter-räbukeevitamine

Räbukeevitamist kasutatakse suure paksusega (üle 20 mm) metalli keevitamiseks ühe läbimiga, ent seda saab teha vaid alt üles. Meetodit iseloomustab kõrge tootlikkus ja õmbluse kõrge kvaliteet.

Plasmakeevitamine on kaarkeevituse rühma kuuluv keevitusprotsess, kus energiaallikana kasutatakse kontsentreeritud ja ioniseeritud gaasivoolu (plasmad), mis tekitatakse keevituskaare kokkusurumise abil. Plasmakeevitamine on TIG-keevitusviisi edasiarendus. Analoogselt TIG-keevitamisega kasutatakse sulamatut volframelektroodi. Kevituskaar surutakse kokku plasmatroni kitseneva ja intensiivselt jahutatava suudmiku abil (sele 2.27). Kevituskaar ristlõige väheneb järsult, temperatuur tõuseb ning tekib voolujuhtiv kõrgetemperatuuriline (10 000... 30 000 °C) plasmajuga.



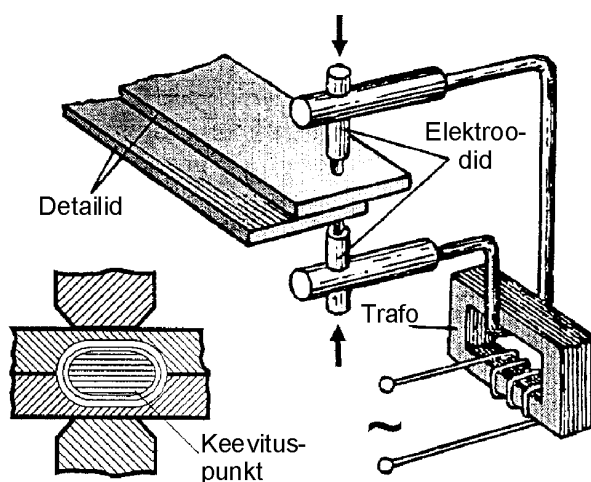
Sele 2.27. Plasmakeevitamine. a – kaudkaarega, b – otsekaarega

Eristatakse kaudkaarega plasmakeevitamist e. plasmakeevitamist ja otsekaarega plasmakeevitamist, e. plasmakaarkeevitamist (sele 2.27). Esimesel juhul kasutatakse nn. *kaudkaart*, kus elektrikaar põleb sulamatu elektroodi ja plasmagaasi kokku suruva düüsi vahel. Teisel juhul kasutatakse *otsekaart*, kus elektrikaar põleb vahetult sulamatu elektroodi ja keevitatava toote vahel. Mõlemal juhul moo-

dustub plasmajuga plasmatronides, kus plasmad moodustavate gaasidena kasutatakse Ar, He, N₂ jt. gaase. Metallide keevitamisel rakendatakse enamasti plasmakaarkeevitamist.

Kontaktkeevitamine e. elektrikontaktkeevitamine on survekeevitusmeetodite rühma üldnimetus, kus metallid ühendatakse detaile läbiva elektrivoolu ja survejõu rakendamise toimele. Lisametalli, räbus- teid ja kaitsegaasi ei kasutata. Reeglina on liitekoht kõrgema elektritakistusega ja kuumeneb kuni sulamistemperatuurini, kuid võib jääda ka plastsesse olekusse. Keevisõmbluse geomeetrilise kuju järgi eristatakse:

- punktkontaktkeevitust,
- joonkontaktkeevitust,
- reljeefkontaktkeevitust,
- põkk-keevitust.

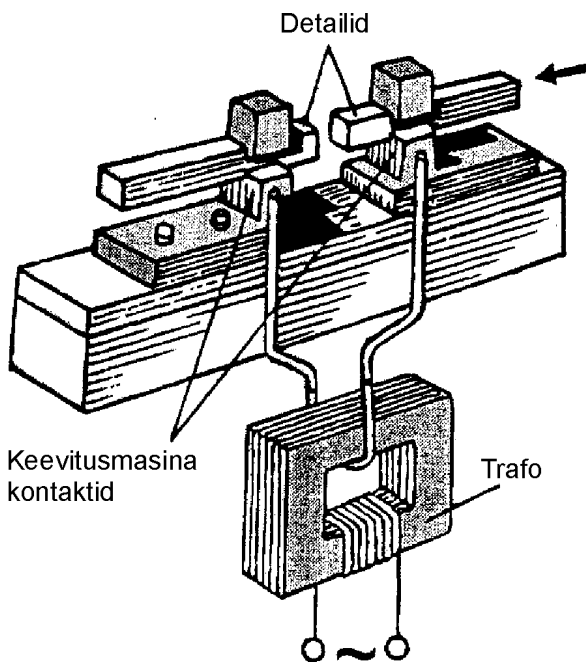


Sele 2.28. Punktkontaktkeevitamine

Punktkontaktkeevitusel e. punktkeevitusel ühendatakse ülekattes olevad detailid ühe või mitme keevipunkti abil, mis elektrivoolu toimele tekitab elektrodide vahel. **Joonkontaktkeevitus** on punktkeevituse edasiarendus, kus järjestikused keevituspunktid tekitavad detailide liikumisel kettakujuliste elektrodide vahel. **Reljeefkontaktkeevitamine** on sarnane punktkeevitusega, kus keevituspunktid moodustuvad detaili pinnast välja ulatuvate osade vahel.

Põkk-keevitamist liigitatakse keevitusprotsesside iseloomu järgi sulatuspõkk-keevitamiseks ning takistus- või takistus-keevitamiseks. Esimesel juhul saadakse põkkliide keevitusmasina kontaktide abil kokkupuutesse viidud detailide otspindade kuumutamiseks trafo vahendusel vooluahelat pingestades.

Enne otspindade kokkusurumist liidetavad pinnad sulavad. Takistus- või takistus-keevitamisel ühendatakse detailid surutakse otspindu pidi kokku ning kuumutatakse keevitusvooluga plastse olekuni, misjärel rakendatakse survejõudu. Hõõgumiseni kuumeneval liitekohal täheldatakse kohtjämendust. Sulatuspõkk-keevitamist kasutatakse suure ristlõikepinnaga detailide, takistus- või takistus-keevitust väikese ristlõikepinnaga detailide ühendamiseks.



Sele 2.29. Põkk-keevitamine

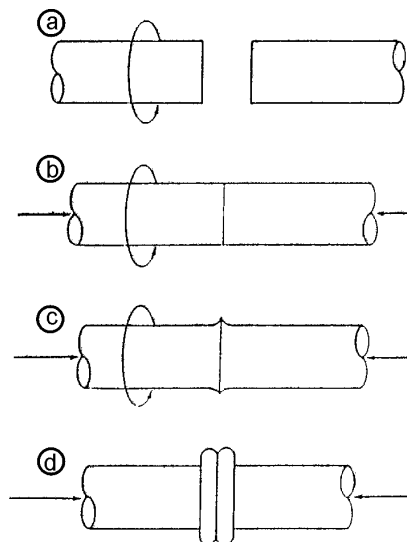
Mehaanilisel energial põhinevad keevitusprotsessid toimuvad reeglina tardfaasis. Olulisemad mehaanilisel energial põhinevad keevitusmeetodid on hõõrdkeevitamine, ultrahelikeevitamine ja külmkeevitamine.

Hõõrdkeevitamisel moodustub keevisiide üksteise suhtes pöörlevate või vibreerivate detailide vastastikusel hõõrdumisel tekkiva soojuse ning rakendatava survejõu toimel. Hõõrdumisel hõõrdepindades olevad, keevitumist takistavad oksiidkihted purunevad ja surutakse plastse deformatsiooniga radiaalsihis välja. Algetapil (sele 2.30) antakse ühele detailile pöörlev liikumine, teine on paigal (a). Edasi surutakse detailid telgsuunas kokku (b). Hõõrdumisel eraldub soojus ja algab lokaalne jämendumine (c). Lõplik jämendumine toimub pöörlemise pidurdumisel (d). Hõõrdkeevitamist kasutatakse näiteks autotööstuses mootorilappide, pikka kardaantvõllide, hammasratasplokkide jt. detailide valmistamisel lühemate elementide liitmise teel. Saab liita erinevaid metallisulamite, näiteks puuri saba puuri lõikeosaga.

Ultrahelikeevitamisel tekib keevisiide lokaalsete kõrgsageduslike võngete energia mõjul, seejuures hoitakse detaile survejõuga koos. Ultrahelivõnkumise allikalt antakse võnked sagedusega 15...75 kHz spetsiaalsete otsakute kaudu ühenduskohta paralleelselt detailide pinnaga. Hõõrdejõudude toimel purustatakse liitekohal olevad oksiidkihted, liitekoht kuumeneb ja metall deformeerub seal plastset. Kasutatakse ühesuguste ja erinevate metallisulamite ning metallide ja mittemetallide liitmiseks – näiteks elektrikontaktide, juhtmete, mähiste kokkukeevitamiseks, mikroelektronikas juhtmete liitmiseks pooljuhtidega.

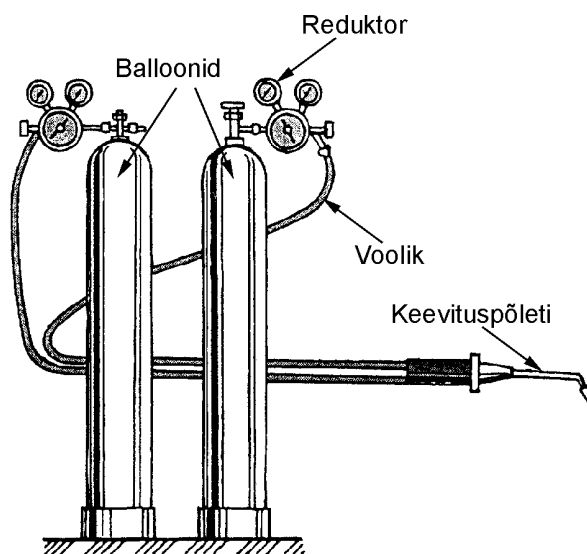
Külmkeevitamine on tardfaaskeevitamine suurte survete ja sellega kaasneva plastse deformatsiooniga. Keevisõmbluse geomeetria järgi liigita-

takse see keevitusviis analoogselt kontaktkeevitusega *punkt-külmkeevitamiseks* ja *põkk-külmkeevitamiseks*. Punkt-külmkeevitamisel saadakse katteliide üksikutes punktides. Kasutatakse suure plastisusega metallide ja metallisulamite (Cu, Al, madalsüsinikterased) keevitamisel, näiteks alumiiniumlehtede või fooliumi ühendamiseks vasega elektrotehnikas jms.



Sele 2.30. Hõõrdkeevitamise etapid

Gaaskeevitamine on keemilisel reaktsioonil põhinevate sulakeevitusprotsesside üldnimetus, kus energiaallikana kasutatakse hapniku ja põlevgaasi segu põlemissoojust. Reeglina on sel juhul tegu käsikeevitusega. Enimlevinud on hapnik-atsetüleenkeevitus, kus põlevgaasina kasutatakse atsetüleen (C_2H_2). Atsetüleenileegi temperatuur ulatub kuni 3100 °C. Veel kasutatakse vesinikku ja looduslikku gaasi, nende puhul on gaasileegi temperatuur märgatavalt madalam.



Sele 2.31. Gaaskeevitamine

Gaaskeevitamisel juhitakse hapnik ja põlevgaas balloonidest läbi gaasireduktorite ja keevitusvoolikute põletisse, kus nad segunevad ja tekitavad gaasileegi. Tänapäeval kasutatakse universaalseid keevitus-lõikepõleteid, millega on võimalik nii gaaskeevitada kui ka gaaslõigata (vt. p. 2.4.5). Keevitamisel kasutatakse lisametalli (traat, vardad), mille keemiline koostis peab olema keevitatavale metallile lähedane.

Gaaskeevitamise eeliseks on võimalus keevitada mistahes asendis. Saab keevitada õhukest plekki, mis elektroodkeevitusega võimalik ei ole. Puudusteks on gaasileegi väike läbisulatusvõime ja sellest tulenev piiratud keevitatava materjali paksus (kuni 4...5 mm). Iseloomulik on väike tootlikkus ja suured kulutused keevitusgaasidele. Gaaskeevitamise osatähtsus on tänapäeval väike, seda kasutatakse peamiselt remonttöödel.

2.4.4. Jootmine

Sageli ei ole võimalik või otstarbekas kasutada liitetehnoloogiana keevitamist, seda näiteks halvast keevitatavusest tingituna. Jootmiseks nimetatakse lahtivõetamatu liite saamise sellist tehnoloogiat, kus ühendatavate materjalide vaheline pilu täidetakse sulametalliga liidetavaid materjale sulatamata. Pilu täitvat metallisulamit, mis on võimeline liidetavaid materjale märgama ning pärast tardumist moodustab jooteliite, nimetatakse *joodiseks*. Keevitamisega võrreldes on jootmisel mitmeid iseärasusi:

- joodise ja jooteõmbluse koostis erinevad liidetavate materjalide koostisest,
- joodise ja moodustunud jooteõmbluse tugevus on liidetavate materjalide tugevusest väiksem,
- joodise sulamistemperatuur on liidetavate materjalide sulamistemperatuurist madalam,
- jooteõmbluse moodustumine toimub enamasti kapillaarjõudude toimel.

Jootmise olulisemad eelised keevitamisega võrreldes on järgmised:

- kõik metallid, sh. halvasti keevituvad, on jootetavad;
- on võimalik liita erineva sulamistemperatuuriga materjale, sh. metalli mittemetallidega;
- liidetavate materjalide vähema kuumenemise tõttu on protsess keevitamisest kiirem; samal põhjusel on väiksemad keevitamisele iseloomulikud probleemid – toodete kõverdumine, metalli struktuurimuutused jms.

Jootmise puuduseks on jooteliite temperatuuritundlikkus, s.o. kuumus võib põhjustada liite tugevuse vähenemise või isegi jooteõmbluse sulamise.

Joodise sulamistemperatuuri järgi eristatakse *pehmejoodisjootmist*, kus kasutatakse pehmejoodiseid sulamistemperatuuriga kuni 450 °C, ning *kõvajoodisjootmist*, kus kasutatakse kõvajoodiseid sulamistemperatuuriga üle 450 °C. Pehmejoodisjootmist kasutatakse juhul, kui jooteliidet ei koormata nimeta-

misväärselt ja ta töötab madalatel temperatuuridel, näiteks elektroonikas ja elektrotehnikas.

Jootmisviise liigitatakse kõige sagedamini liigitamist jootekohta kuumutamise viisi järgi. *Jooteljootmisel* e. *tõlvikuga jootmisel* kuumutatakse joodist ja jooteliidet jootli e. jootetõlviku abil. *Gaasjootmisel* toimub kuumutamine gaasileegi abil nagu gaaskeevitamiselgi. *Ahijootmisel* kuumutatakse tooteid ja joodist ahjus. *Induktsioonjootmine* toimub kasutades induktsioon- e. kõrgsageduskuumutamist. *Sukeldusjootmine* on jootmine kuumutamise gaasileegi abil nagu gaaskeevitamise viisi järgi. *Kontaktjootmisel* e. *takistusjootmisel* kuumutatakse ühendatavaid tooteid nagu kontaktkeevitamiselgi liitekohta läbiva elektrivooluga.

Jootismaterjalideks on joodised ja rübustid. Sulamistemperatuuri järgi eristatakse *pehmejoodiseid* (sulamistemperatuur kuni 450 °C) ja *kõvajoodiseid* (sulamistemperatuuriga üle 450 °C). Toodetakse pehmejoodiseid sulamistemperatuuriga alates 11 °C (Ga-In-Sn) kuni 425 °C (Ge-Al). Enimkasutatavad on tina (Sn) ja plii (Pb) baasil pehmejoodised. Kõvajoodiseid toodetakse sulamistemperatuuriga 580...1240 °C. Tuntuimad on Cu-, Ag- ja Al-baasil kõvajoodised.

Jooterübusti on mittemetalne keemiline aine joodetavate metallide ja joodise puhastamiseks oksiididest, pindade jootmise ajal puhtana hoidmiseks ja sulajoodise pindpinevuse vähendamiseks. Jootmistemperatuuri järgi eristatakse pehmejoodisjootmisrübusteid ja kõvajoodisjootmisrübusteid.

Jootmistehnoloogia koosneb järgmistest etappidest:

- liidetavate pindade ettevalmistus – puhastamine mustusest ja oksiidikilest;
- liite koostamine – liidetavate detailide asendi fikseerimine selleks, et tagada ettenähtud *jootepilu*; selle suurus sõltub joodetavatest metallidest ja joodisest ning on 0,05...0,15 mm;
- joodise ja rübusti kandmine jootekohta;
- jootekohta või joodetavate detailide kuumutamine jootmistemperatuurini;
- õmbluse puhastamine ja korrosiooni põhjustavate rübustijääkide eemaldamine.

2.4.5. Termolõikamine ja -pindamine

Termolõikamine on metallide ja teiste materjalide lõikamisprotsess, millega kaasneb lõigatava materjali põlemine, sulamine või aurustumine. Termolõikamismeetodid liigitatakse lõiketsoonist materjali eemaldamise viisi ja kasutatava soojusallika järgi. Materjali lõiketsoonist eemaldamise viisi järgi eristatakse *hapniklõikamist* ja *sulatuslõikamist*. Lõikamisel kasutatava soojusallika järgi eristatakse gaaslõikamist, kaarlõikamist e. elektrikaarlõikamist, plasmalõikamist, laserlõikamist, elektronkiirlõikamist. Enamkasutatavad on kolm esimesena nimetatut.

Gaaslõikamise all mõistetakse hapniklõikamisprotsessi, mis põhineb lõigatava metalli põlemisel kõrgel temperatuuril, kusjuures lõigatava metalli süttimiseks vajalik temperatuur saavutatakse põlevgaasi (atsetüleen, vesinik, maagaas jms.) põlemisel

hapnikus. Gaaslõikamine põhineb mõne metalli omadusel põleda hapnikujoas ja sellega kaasneval soojuste eraldumisel. Raua põlemisel eraldub soojus reaktsiooni järgi:



Reaktsioon algab temperatuuril alates 870°C. Pärast metalli kuumutamist gaasileegiga kuni süttimistemperatuurini juhitakse lõikekohale hapnikujuga, mis süütab metalli. Põlemisel eraldub palju soojust ja põlemine levib materjali kogu paksuses. Tekkivad metallioksiidid eemaldatakse lõikekohast hapnikujoa toimetel.

Gaaslõikamisega saab lõigata vaid teatud metalle ja metallisulameid, mis rahuldavad kindlaid tingimusi: metalli hapnikus süttimise temperatuur ja moodustuvate oksiidide sulamistemperatuur peavad olema metalli sulamistemperatuurist madalamad. Cu, Al ja nende sulamid, samuti malm ja kõrglegeeritud kroom- ja kroomnikkelterased eelnimetatud tingimusi ei täida. Kõige paremini on lõigatavad konstruktsiooniterased, mille süsinikusisaldus on kuni 0,7%.

Kaarlõikamise meetodid liigitatakse kasutatava elektroodi materjali järgi. Eristatakse metall-elektroodkaarlõikamist, volframelektroodkaarlõikamist ning süsinikelektroodkaarlõikamist. *Metall-elektroodkaarlõikamine* on sulatuslõikamine metalli sulatamisega elektrikaare toimetel erikattega elektroode kasutades. Sulanud metall eemaldub lõiketsoonist raskusjõudude toimetel. Seda viisi kasutatakse metallkonstruktsioonide lammutamisel ja remonditöödel. *Volframelektroodkaarlõikamine* on sulatuslõikamine sulanud metalli eemaldamisega lõiketsoonist inertgaasi joaga. Kasutatakse peamiselt korrosioonikindlate teraste ja mitterauasulamite termolõikamisel.

Plasmalõikamine on sulatuslõikamine metalli sulatamisega plasmajoa toimetel (plasmajugalõikamine) või elektrikaare ja plasmajoa koosmõjul (plasmakaarlõikamine). Algselt kasutati seda moodust nende metallide ja sulamite lõikamisel, mida ei saa gaaslõikamisega lõigata, kuid praegu rakendatakse ka konstruktsiooniteraste lõikamisel.

Pindamise eesmärk on kulumis- või korrosioonikindlate pinnete saamine või metalltoodete taastamine. *Termopindamine* hõlmab tehnoloogiaid, mille korral metallsed või mittemetallsed pindmaterjalid kantakse aluspinnale pihustamise teel. Pindmaterjalid võivad olla traadi-, varda- või pulbri kujul. Pihustatav materjal viiakse gaasileegi (hapniku ja põlevgaasi segu), elektrikaare või plasmajoa abil poolvedelasse või vedelasse olekusse. Kuum pihustatav materjal suunatakse põletist gaasi- või plasmajoaga alusmaterjalile.

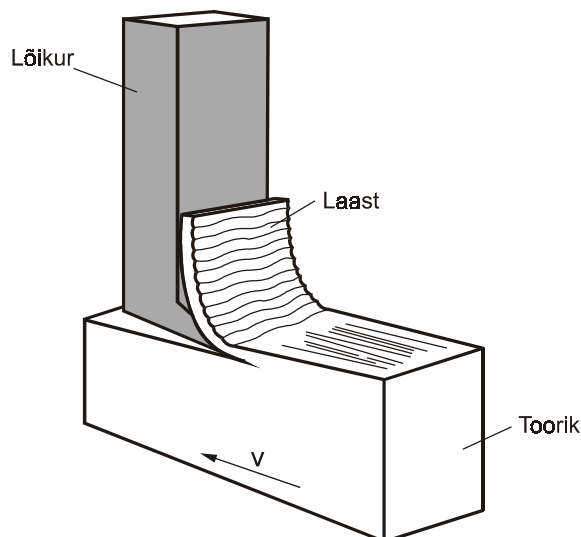
Termopindamise põhimeetoditeks soojusenergia saamise meetodi järgi on *leekpihustus*, *kaarpihustus*, *plasmapihustus* ning *induktsioonpihustus*. Leekpihustus liigitatakse omakorda allahelikiirusega ja ülehelikiirusega leekpihustuseks.

2.5. Lõiketöötlemine

2.5.1. Lõikeprotsessi üldpõhimõtted

Metallide lõiketöötlus seisneb eelneva töötlemisega (valamine, sepiamine jm.) saadud toorikult (pooltootelt) laastu eraldamises, et saada vajalik kuju, mõõtmed ja pinnakvaliteet. Kuna suurem osa masinaosi saab oma lõpliku kuju ja täpsed mõõtmed tooriku lõiketöötlusel, siis moodustab selle töömaht 45...60% nende valmistamise kogu töömahust.

Plastse metalli lõikamisel eralduva laastu tekkeprotsess on lihtsustatult järgmine (sele 2.32).



Sele 2.32. Kihlise laastu moodustumine

Materjali nihkele lõikuri ees ja laastu tekkele eelneb lõigatava materjali elastne ja plastne surve-deformatsioon, millega kaasneb materjali kalestumine (tugevnemine). Kui kalestumine on saavutanud oma piiri, siis materjalil ei ole muud väljapääsu kui nihkuda edasi – tekib laastu element. Protsess kordub järk-järguliste nihetena tooriku pikkuses, mis annab laastule kogu pikkuses kihlise struktuuri.

Töötlemisel on oluline, et tekkiv metallilaast eemalduks kergesti lõikekohast ega segaks lõikeprotsessi. See on seotud tekkiva laastu kujuga, mida mõjutab nii töödeldav materjal kui lõiketingimused. Plastsete metallide lõikamisel on laastu tekkel määrava tähtsusega plastsed deformatsioonid, habrastel (näiteks malm) need peaaegu puuduvad. Plastsete metallide lõikamisele on iseloomulik *voolav laast*, mis keerdub spiraali. Habraste metallide lõikamisel ei teki üldse korrapärast laastu, vaid tükikestena eralduv *murdelaast*.

Lõiketöötluse efektiivsus sõltub esmajoonel lõikuri teriku (lõikuri lõikava osa) materjali ja geometria valikust. Vaatleme lõikuri teriku geometriat treilõikuri (treimisel kasutatava lõikuri) näitel (sele 2.33). Lõikeprotsessist võtavad osa järgmised pinnad. *Esipind* kontakteerub lõikeprotsessis lõigatava materjalikihiga ja laastuga. *Peatagapind* on pööratud lõikepinna ja töötlemata pinna poole. *Abitagapind* on pööratud tooriku töödeldud pinna

poole. *Pealõikeserv* on teriku esi- ja peatagapinna lõikumisel tekkiv lõikejoon. *Abilõikeserv* tekib esi- ja abitagapinna lõikumisel.

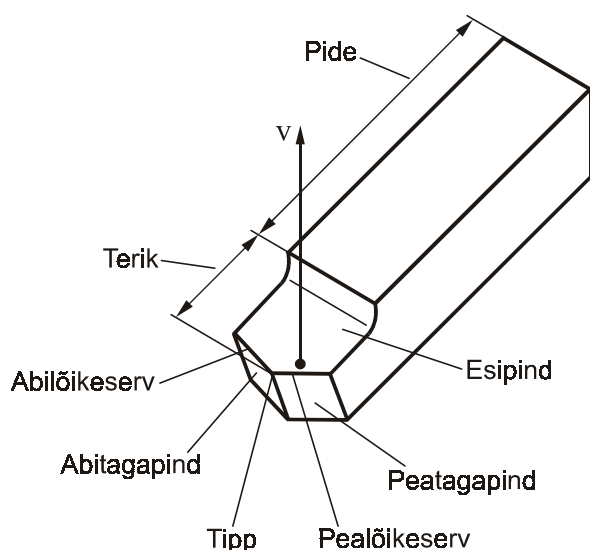
Normaalseks lõikamiseks peavad eelnimetatud pinnad ja servad asuma kindlate nurkade all.

Tänapäevane lõikurimaterjalide nomenklatuur on lai ja hõlmab kiirlõiketeraseid, karbiidkermiseid, pinnatud kermiseid, oksiidkermiseid, kuubilist boor-nitriidi, tehis- ja looduslikku teemanti. Enimkasutatavad terikumaterjalid on kiirlõiketerased ja kermised, sh. pinnatud kermised.

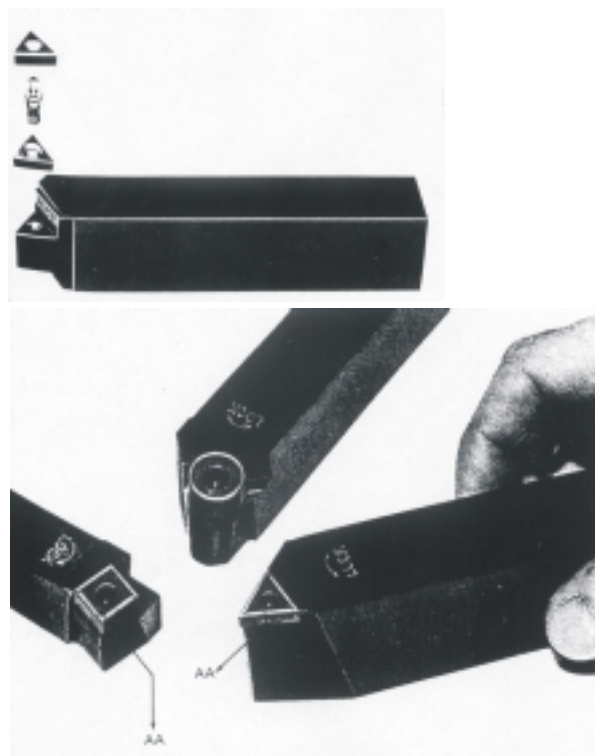
Kiirlõiketeras on kõrge volframi- ja vanaadiumisisaldusega tööriistateras. Kiirlõiketerasest lõikuri kõvadus pärast termotöötlust on HRC 62...65 ja *soojuskindlus* (kõvadustaseme säilitamise temperatuur) 600...650 °C. Kõvadustaseme säilitamine on väga oluline seoses soojuse eraldumisega laastu eemaldamisprotsessis, mis soodustab lõikuri kulumist ja vähendab *püsivusaega*.

Kermis on rasksulavate suure kõvadusega karbiidide, nitriidide, oksiidide, boriidide jt. alusel pulbermetallurgilisel teel (vt. p. 2.6) valmistatud komposiitmaterjal. Võrreldes kiirlõiketerastega on kermised kõvemad ja soojuskindlamad (850...1350 °C). Seetõttu võimaldavad kermistest terikutega lõikurid suuremaid lõikekiirusi ja seega tõstavad tootlikkust. Enimkasutatavad on volframkarbiidi baasil karbiidkermised, näiteks WC-Co ja WC-TiC-Co.

Lõikurite terikud varustatakse kiirlõiketerasest või karbiidkermistest erineva kujuga plaatidega (sele 2.34), mis joodetakse tera kehale või kinnitatakse sinna mehaaniliselt. Mehaaniline kinnitus võimaldab plaadi ühe lõikeserva nürinemisel kasutada teisi.



Sele 2.33. Treilõikur

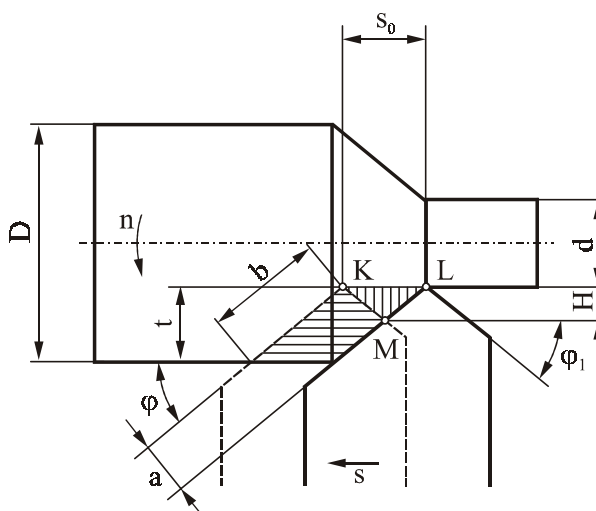


Sele 2.34. Treilõikuri kermisest terikud

2.5.2. Lõikamise põhiprotsessid

Lõikamise põhiprotsessid on treimine, freesimine, puurimine, hõõveldamine, kammlõikamine, hambalõikamine, lihvimine.

Lõikeprotsesse iseloomustavad tehnoloogilised karakteristikud. Vaatleme neid treimise näitel (sele 2.35).



Sele 2.35. Lõikeprotsessi karakteristikud treimisel

Pealiikumine määrab laastu eraldamise kiiruse. Treimiseks on selleks tooriku pöörlemine. Pealiikumise kiirus e. *lõikekiirus* v on teriku lõikeserva ja lõikepinna vahelise suhtelise liikumise kiirus: $v = \pi D n$, m/min, kus n – tooriku pöörlemissagedus, min⁻¹. *Ettenihkelikumis* toimub lõikuri serva liikumine ettenihke suunas, mis tagab lõikeprotsessi pide-

vuse. *Ettenihkekiirus* e. *ettenihe* antakse treimisel lõikeserva liikumisena tooriku ühe pöörde kohta (s_0 , mm/pööre) või ettenihkena minutis (s). *Lõikesügavus* t on töödeldava ja töödeldud pinna vaheline kaugus mõõdetuna risti ettenihkega. Välistreimisel $t=(D-d)/2$, mm.

Treimisega on võimalik saada silindrilisi, koonilisi ja tasaseid ning keerukaid välis- ja sisepindu (kujupindu), samuti lõigata keeret.

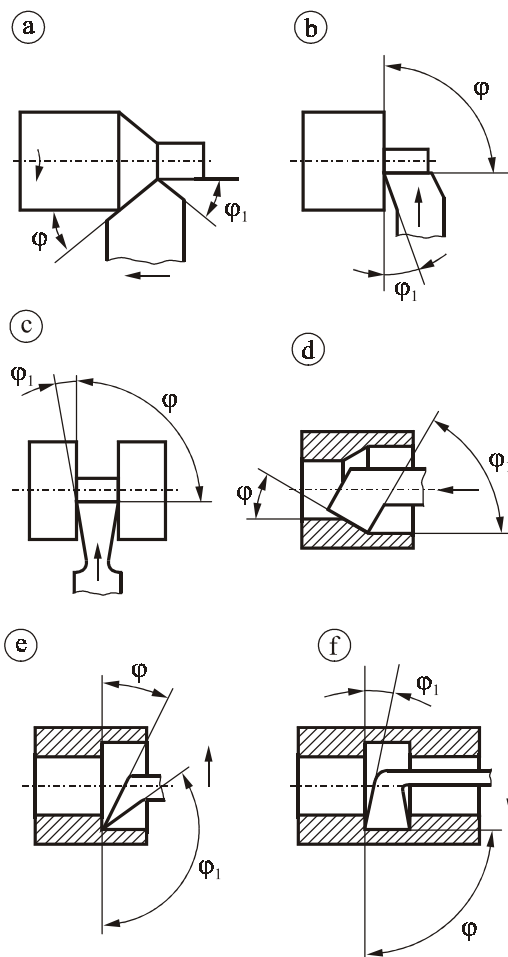
Silinderpinna treimine (sele 2.36a), otspinna treimine (b), soone treimine ja läbilõikamine (c), silindersisetreimine (d), tasase sisepinna sisetreimine (e), sisesoone treimine (f) on treimise põhioperatsioonid. Treipingil võib avasid töödelda ka keerdpuuri, avardi ja hõõritsaga (vt. Puurimine). Keerulisi kujupindu töödeldakse spetsiaalsete kujulõikuritega. Keermestatakse nii välis- kui sisepinda spetsiaalseid kerme treilõikureid kasutades.

Otstarbe järgi jagunevad metallilõikepingid üld- ja eriotstarbelisteks. Eriotstarbelised pingid on kitsa kasutusala, enamasti ühetüübiliste detailide töötlemiseks. Üldotstarbeliste lõikepinkide liigitamise aluseks on töötlemismeetod. Eristatakse trei-, puur-, lihv-, frees-, hambalõike jm. pinke.

Treipingid jagunevad universaaltreipinkideks, revolvertreipinkideks, karusselltreipinkideks ning automaattreipinkideks. Universaaltreipink on ette nähtud mitmesugusteks treimistöödeks, ka keermelõikamiseks.

Universaaltreipingi (sele 2.37) põhiosad on järgmised. *Sängile* toetuvad pingi osad. Sängi töövõlli poolsele alaossa on paigutatud pealiikumise (treimisel on selleks tooriku pöörlemine) ajami elektrimootor, tagaossa määride- ja jahutusvedeliku paak ja pump, mis juhib lõiketemperatuuri alandava jahutusvedeliku lõikealasse. Sängi vasakpoolsele otsale toetub *esipukk*, milles asub kiiruskast ja kust ulatub välja *töövõll* e. *spindel*. Kiiruskasti mehhanismid ja ülekanded võimaldavad töövõlli erinevaid pöörlemissagedusi ja -suundi. Töövõllile on paigaldatud tooriku kinnitusseade. Esipukist allpool paikneb ettenihkekast, kus on mehhanismid supordi erinevate liikumiskiiruste saamiseks. Liikumine kiiruskastist ettenihkekasti antakse ülekandemehhanismi abil.

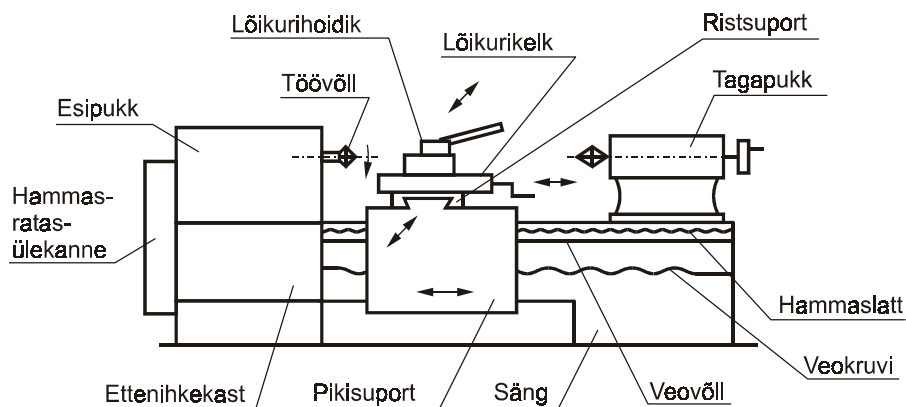
Pikisuport koos etteulatava supordipõllega toetub sängi juhtpindadele ja tagab lõikuri pikiettenihke. Supordipõlles on mehhanismid, mis muudavad veovõlli või veokruvi pöörleva liikumise supordi kulgliikumiseks. Pikisuporti juhtpindu mõõda liigub tooriku teljega ristsuhtes, millele toetub pööratav *lõikurikelk* ja *lõikurihoidik*. *Tagapukk* paikneb sängi parempoolses otsas juhtpindadel ja teda saab pikisuunas nihutada. Tagapukis olevasse *pinooli* paigutatakse pikkade toorikute otsast toetamiseks spetsiaalne tšenter, mida saab tooriku telje



Sele 2.36. Treimise põhioperatsioonid ja treilõikurid

suunas nihutada käsiratta abil. Pinooli võib kinnitada ka ava töötlemise lõikureid (puuri, hõõritsat, süvispuuri jt.). Tagapukki saab nihutada ka tooriku teljega ristsuhtes, mis on vajalik koonuse treimisel.

Revolvertreipink on pink, millel on lõikurite kinnitamiseks tagapuki asemel revolverpea. Revolvertreipinkide kasutamine on otstarbekas suurema detailipartii valmistamiseks paljude lõikurite järjestikulise kasutamisega. *Karusselltreipingis* töödeldakse suuregabariidilisi raskeid toorikuid, mille pikkuse ja läbimõõdu suhe on 0,3...0,5. Nende pinkide

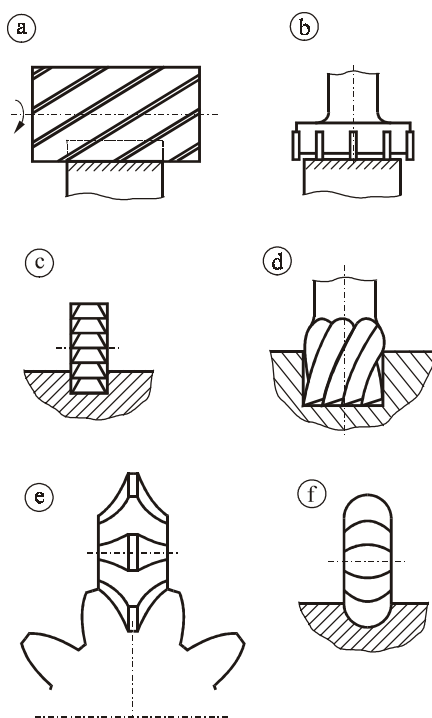


Sele 2.37. Universaaltreipingi skeem

iseärasuseks on vertikaaltelje ümber koos detailiga pöörlev töölaud. *Automaattreipinkideks* e. *treimisautomaatideks* nimetatakse niisuguseid pinke, mille pärast nende seadistamist ja häälestamist töödeldakse detaili inimese osavõtuta. Inimese ülesandeks on pingi perioodiline varustamine toorikmaterjaliga, töö jälgimine ja detailide mõõtmete kontrollimine.

Freemine on lõiketöötuse universaalsemaid tehnoloogilisi protsesse, mille puhul lõikuriks on *frees*. Freesimisega töödeldakse horisontaal-, vertikaal- ja kaldpindu, astmeid ja sooni, tükeldatakse metalli, samuti töödeldakse keerukaid kujupindu, näiteks hammasrataste sirg- ja kaldhambaid, liistusooni, keermeid jm. Freesimisel antakse pöörlev pealiikumine freesile, ettenihkeliikumine töödeldavale toorikule.

Frees on pöördkehakujuline lõikur, mille lõikehambaid võib vaadelda üksikute terikutena. Lõikehammastega varustatud tööpindade kuju järgi liigitatakse freese järgmiselt (sele 2.38): silinderfrees (a), otsfrees e. laupfrees (b), ketasfrees (c), sõrmfrees (d), kujufrees (e, f), mille kuju kopeeritakse osaliselt töödeldavale pinnale.

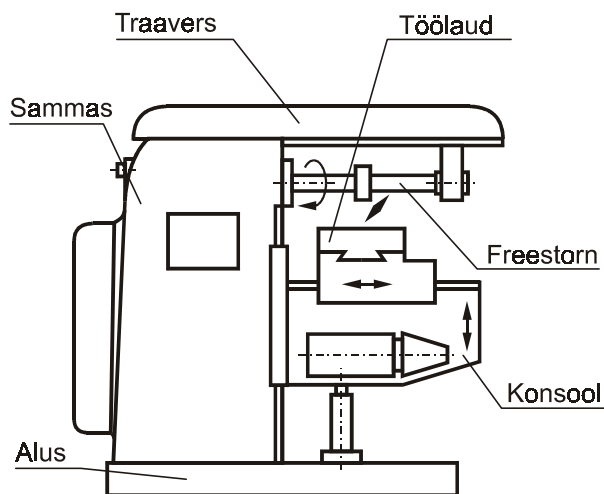


Sele 2.38. Freesimise põhioperatsioonid ja freeside tüübid

Nagu teisedki lõikepingid, liigitatakse ka freespingid üld- ja eriotstarbelisteks. Üldotstarbelised pingid on vastavalt töövõlli (spindli) asendile horisontaal-, vertikaal- ja universaalfreespingid. Eriotstarbelised pingid on ette nähtud mingi kindla funktsiooni jaoks – keermefreespingid, kopeerfreespingid jm.

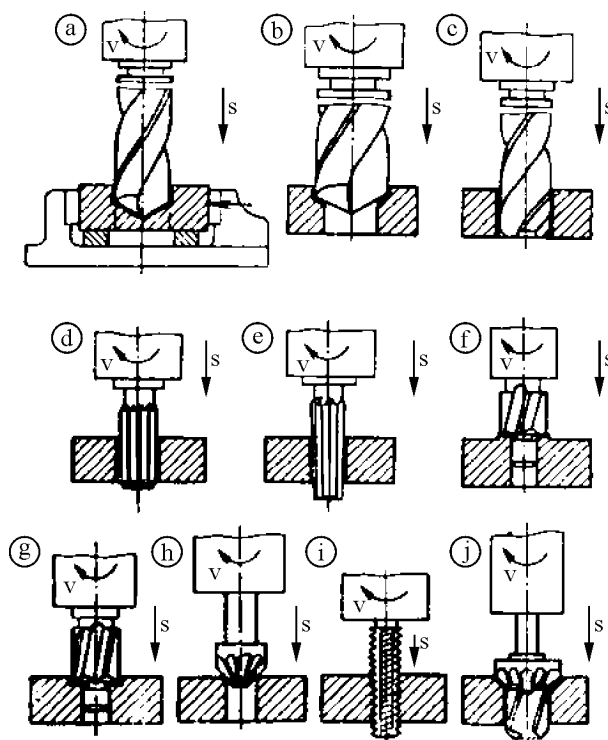
Horisontaalfreespinkidel (sele 2.39) on horisontaalselt paiknev töövõll, kuhu kinnitatakse freestorn ja kus toimub pealiikumine (freesi pöörlev liikumine). Toorik kinnitatakse töölauale, mis võib

saada piki-, risti- või vertikaallettenihke. *Vertikaalfreespinkidel* on vertikaalselt paiknev töövõll. *Universaalfreespink* on horisontaal- ja vertikaalfreespingi kombinatsioon. Lisaks sellele on tal ka pööratav töölaud.



Sele 2.39. Horisontaalfreespink

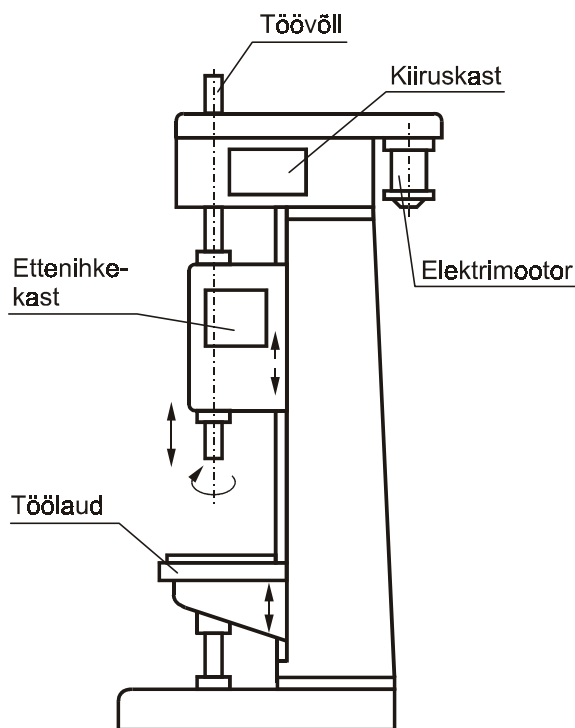
Puurimine on nii materjali läbivate kui ka umbavade saamise kõige levinumaid lõiketöötuse viise. Ülepuurimisega töödeldakse ka juba varem saadud avasid (valandites, stantsistes, sepistes), et vähendada pinnakaredust ja suurendada täpsust. Puuritakse puuri pöörlemise (pealiikumine) ja sirgjoonelise liikumise (ettenihkeliikumine) koostoiu tulemusena. Mõlemad liikumised annab tööriistale puurpink.



Sele 2.40. Puurpingil kasutatavad lõikurid ja teostatavad põhioperatsioonid

Puurimisel kasutatakse enamasti *keerdpuuri* e. spiraalpuuri (sele 2.40a, b), mis koosneb lõikeosast, spiraalse laastu ärajuhtimise kruvisoonega tööosast ja sabast puuri kinnitamiseks. Puurpinkidel kasutatakse peale puuride ka hulgaliselt teisi avalõikureid. *Avardit* (c) kasutatakse avardamiseks – puuritud ava läbimõõdu suurendamiseks (ülepuurimiseks). Võrreldes keerdpuuriga on avardil suurem hammaste (lõikeservade) arv. *Hõõritsat* (d,e) kasutatakse hõõritsemiseks – avade viimistlemiseks suurema täpsuse ning väiksema pinnakareduse saamiseks pärast avardamist. *Süvistiga* (f, g, h) töödeldakse puuritud avade otspindu avale ristpinna (näiteks poldi mutrialuseks pinnaks) või koonilise pinna saamiseks (peitpeaga kruvi tugi-pinnaks). *Keermepuur* (i) on puuritud ava keermestamiseks. Sageli kasutatakse ka avalõikureid, mis koosnevad eespool nimetatud lõikurite komplektist, näiteks kombineeritud avardisüvisti (j).

Puurpinkidel puuritakse, avardatakse, hõõritsetakse ja keermestatakse. Üldotstarbeliste puurpinkide hulka kuuluvad vertikaal- ja radiaalpuurpink, samuti horisontaalpuurpink e. sisetreipink. *Vertikaalpuurpingil* (sele 2.41) kinnitatakse töödeldav toorik töölauale, mis on vertikaalselt nihutatav. Avade vastastikuline asetus saadakse toorikut töölaual nihutades. Mitme ava üheaegseks töötlemiseks kasutatakse tootlikkuse suurendamiseks mitme töövõlli vertikaalpuurpinke.

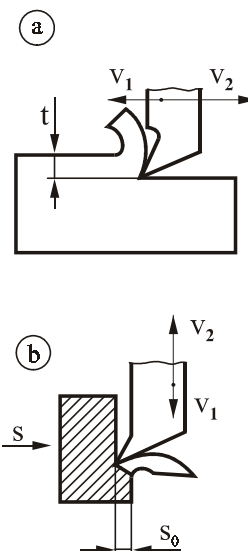


Sele 2.41. Vertikaalpuurpink

Radiaalpuurpinkidel töödeldakse suuremõõtmeliste ja suure massiga toorikute teineteisest kaugel asuvadi avasid. Nendel pinkidel, erinevalt vertikaalpuurpinkidest, kinnitatakse toorik töölaual liikumatult ning avade vastastikuline asetus saavutatakse töövõllile kinnitatud avalõikuri nihutamisega. *Sisetreipinkidel* e. *horisontaalpuurpinkidel* võib

lisaks avatööstlustööriistadega töötlemisele sooritada ka treimis- ja freesimisoperatsioone.

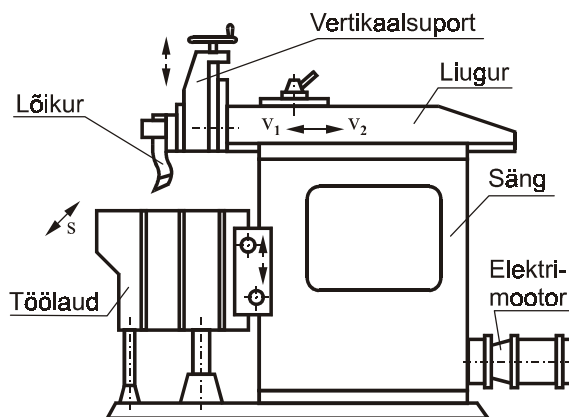
Hööveldamisel töödeldakse tasaseid või sirgjoonelise moodustajaga kujupindu ning mitmesuguse profiiliga sooni nagu freespinkidelgi. Eristatakse rist-, piki- ja vertikaalhööveldamist.



Sele 2.42. Risthööveldamine (a) ja vertikaalhööveldamine (b)

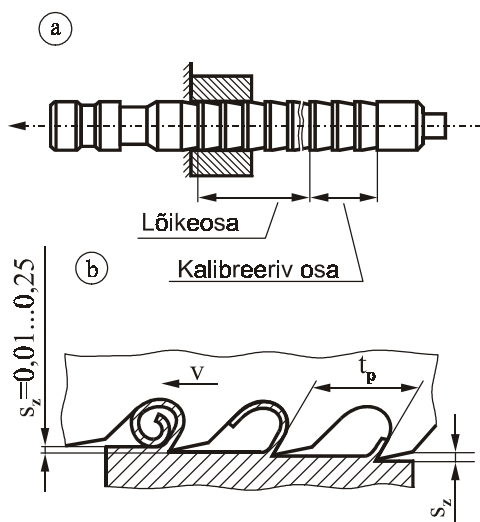
Risthööveldamisel (sele 2.42) ja *pikihööveldamisel* kasutatakse kahte lõikeliikumist – hõvelliikuri sirgjoonelist horisontaalset pealiikumist ja tooriku katkendlikku pealiikumist suhtes risti ettenihke-liikumist. *Vertikaalhööveldamisel* on hõvelliikuri sirgjooneline pealiikumine vertikaalne (sele 2.42b). Toorikule antakse pealiikumisele ristshis ettenihke-liikumine s.

Risthööveldamisel kasutatakse risthõvelpinke, pikihööveldamisel pikihõvelpinke ja vertikaalhööveldamisel vertikaalhõvelpinke. *Risthõvelpingil* (sele 2.43) teostab horisontaalpealiikumist lõikur. *Pikihõvelpingil*, vastupidi, antakse horisontaalne pealiikumine töölaual koos sinna kinnitatud toorikuga. Sellistel tööpinkidel on risthõvelpinkidega võrreldes märksa suurem käigu pikkus ja on võimalik töödelda pikemaid pindu (kuni 12 m). *Vertikaalhõvelpinkidel* on lõikuri käigu pikkus lühike.



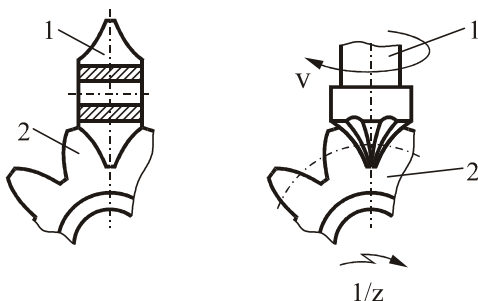
Sele 2.43. Risthõvelpink

Kammlõikamine on avade ja välispindade töötlemise kõrgtootlik meetod, mis tagab suure täpsuse ja minimaalse pinnakareduse. Tööriistaks on lõikehammastega varustatud *kammlõikur*, mis saab sirgjoonelise pealiikumise ja eraldab kogu töötlusvaru ühe töökäiguga. Lõikeprotsessis lõikavad kõik hambad laaste, kusjuures iga järgmine hammas on eelmisest kõrgem (sele 2.44). Kammlõikuri kinnitusosa ühendatakse kammlõikepingi padruniga, mis tõmbab lõikuri läbi töödeldava ava või välispinna. Kammlõikamist kasutatakse sari- ja masstootmisel.



Sele 2.44. Kammlõikamine. a – kammlõikur, b – lõikehambad

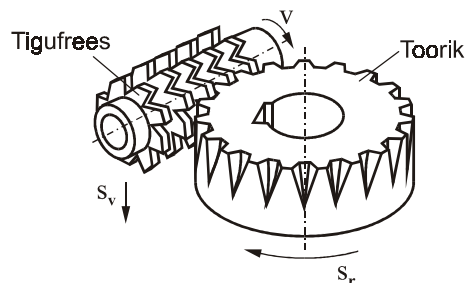
Hambalõikamisel kasutatakse kahte meetodit – kopeer- ja rullumismeetodit. *Kopeermeetod* põhineb hammaste profileerimisel lõikuriga, millel on hammastevaheline profiil. Üksiktootmisel lõigatakse hambad kopeermeetodil *ketasmoodulfreesiga* või *sõrmmoodulfreesiga* ühe hambavahe kaupa. Hambafreesimisel kopeermeetodil antakse freesile pöörlev pealiikumine, toorikule sirgjooneline ettenihkel liikumine (sele 2.45). Hambalõikamiseks kopeermeetodil kasutatakse üldotstarbelisi freespinke, näiteks horisontaal- või vertikaalfreespinke.



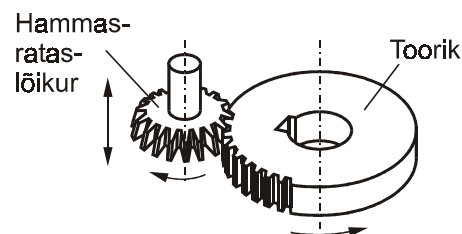
Sele 2.45. Hammaste freesimine kopeermeetodil moodulfreesiga (ketasfreesiga ja sõrmfreesiga)

Rullumismeetod põhineb lõikuri ja tooriku vastastikusel hambumisel koos lõikelikumistega. Lõikurina kasutatakse kas *tigufreesi* (sele 2.46), *hammasrataslõikurit* e. *hambatõukurit* (sele 2.47) või *hammaslattelõikurit*. Tooriku hamba külgpind kujuneb

lõikuri lõikeservade asendi pideval muutumisel tooriku ja lõikuri vastastikusel liikumisel. Hambalõikamine rullumismeetodil on universaalsem, kuna võimaldab lõigata antud lõikuriga erineva hammaste arvuga rattaid. Rullumismeetodil hambalõikamisel kasutatakse spetsiaalseid hambalõikepinke – hambafreespinke ja hambatõukepinke.

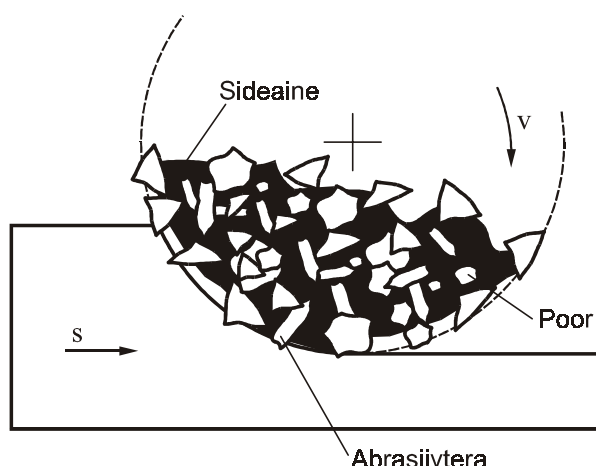


Sele 2.46. Hambalõikamine rullumismeetodil tigumoodulfreesiga



Sele 2.47. Hambalõikamine rullumismeetodil hammasrataslõikuriga

Lihvimine on lõiketötlusprotsess, kus abrasiivlõikuri abil (sele 2.48) saadakse sile pind ja mõõtmete suur täpsus. Abrasiivlõikur koosneb kõvade abrasiivteradest, mis on sideainega seotud abrasiivkettaks. Abrasiivketta pöörleva liikumisel lõikavad terad tooriku pinnalt mikrolaaste.

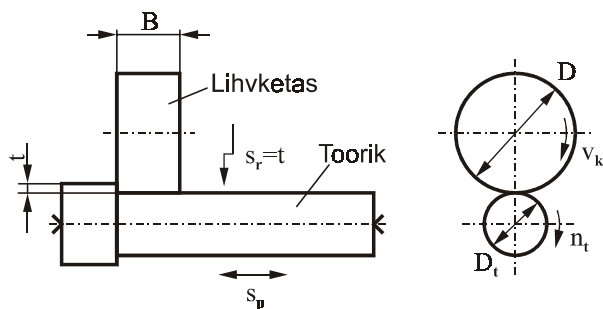


Sele 2.48. Abrasiivlõikuriga lihvimine

Abrasiivlõikurid valmistatakse enamasti erineva kujuga lihvketastena. Peale lihvketaste kasutatakse abrasiivlõikureid luiskudena, segmentidena, abrasiivlintidena, abrasiivpastadena. Lihvkettas on abrasiivterad seotud keraamiliste või orgaaniliste

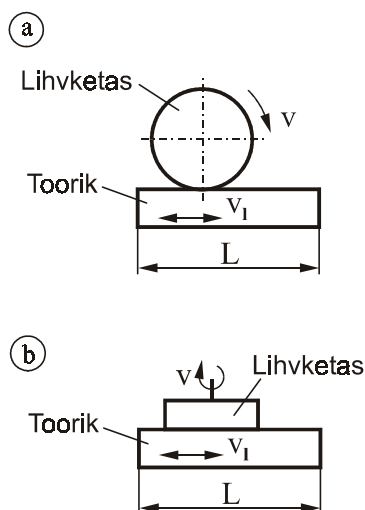
sideainete abil. Lihvketaste abrasiivaine (teemant, ränikarbiid (SiC), alumiiniumoksiid (Al_2O_3) jms.) mahuline sisaldus on 20...60%.

Tähtsamateks lihvimismeetoditeks on välisümarlihvimine, siseümarlihvimine ja tasalihvimine. Välisümarlihvimisel (sele 2.49) töödeldakse pöördekehade välispinda. Lihvimiseks kasutatakse ümarlihvipinki. Pöörlev pealiikumine v_k antakse lihvkettale. Ettenihkeliikumised – ringettenihe n_t ja pikiettenihe s_p – antakse toorikule. Perioodilist ristettenihet s_r sooritab lihvketas.



Sele 2.49. Välisümarlihvimine

Avade sisepindu lihvitakse – siseümarlihvitatekse – siselihvipinkidel. Tasalihvitatekse tasapindu kasutades selleks horisontaal- (a) või vertikaaltasalihvpinge (sele 2.50).



Sele 2.50. Tasalihvimine horisontaaltasalihvpingil (a), vertikaaltasalihvpingil (b)

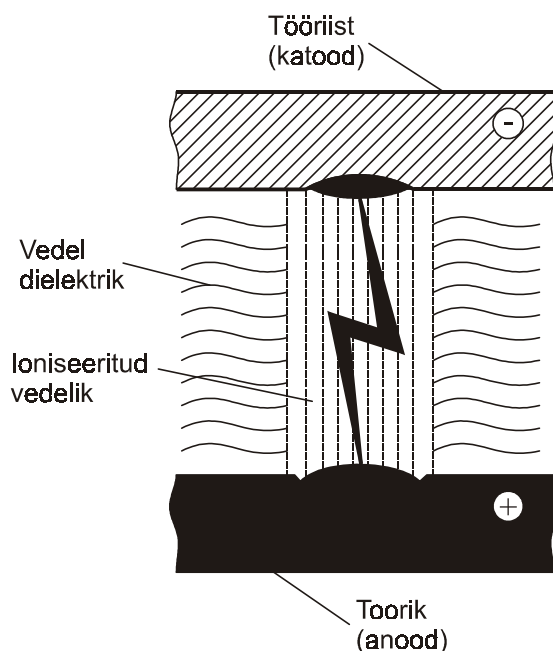
Sageli nõutakse siledamat pinda ja töötlemistäpsust, kui seda on võimalik saavutada lihvimisega. Sellistel juhtudel kasutatakse **abrasiivtöötlemise viimistlusmeetodeid**: hoonimine, superfiniš, plankimine, poleerimine. Hoonimine on viimistlusmeetod, mis võimaldab saada suure täpsusega siledaid, spetsiifilise mikroprofiiliga silindrilisi sisepindu. Niisugune profiil on näiteks vajalik õlikihi hoidmiseks hõõrdepinnal (mootori silinder). Abrasiivlõikuriks on pöörlevasse hoonpeasse kinnitatud luisud. Superfiniš on viimistlusmeetod, kus kasutatakse lõikuritena samuti luiske, kuid hoonimisest erinevalt saab

lisaks silindrilistele sisepindadele töödelda ka silindrilisi ja koonilisi välispindu ning tasapindu. Plankimine on abrasiivviimistlusprotsess, kus abrasiivosakesed on surutud töödeldava pinna ja suhteliselt pehmest materjalist (malm, vask) plankuri vahele. Meetodit kasutatakse tavaliselt suure täpsusega tasapinnalisuse saavutamiseks. Poleerimine on pinnakareduse vähendamise levinuim meetod. Lõikuriks on elastne abrasiivketas, -lint või abrasiivi suspensioon.

2.5.3. Mittetraditsioonilised töötlusmeetodid

Mittetraditsioonilisi töötlusmeetodeid kasutatakse juhul, kui detailide töötlemine mehaanilise lõikeprotsessi abil osutub vähetootlikuks või hoopiski võimatuks. Niisugused probleemid esinevad väga kõvade, sitkete ja habraste materjalide, kitsaste soonte ning peente avade töötlemisel või ka siis, kui on vaja saada väga siledat pinda. Sel juhul kasutatakse elektrofüüsikalisi ja elektrokeemilisi meetodeid, kus rakendatakse elektrienergiat ja selle poolt tekitatud heli-, soojus-, keemilist ja mehaanilist energiat.

Elektroerosioontöötlemine põhineb elektrikontaktikohtade purunemisel, mille põhjus on kontaktidevaheline sädelahendus. Meetod on rakendatav vaid elektrit juhtivate materjalide töötlemisel. Üks elektroodidest on tööriist, teine töödeldav ese (sele 2.51). Nende vahel on dielektriline vedelik. Vooluimpulsside toimel elektroodide materjal sulab ja aurustub. Kraatrist eemaldunud metall jahtub dielektrilises vedelikus, kus tekivad 0,01...0,005 mm suurused graanulid. Elektrilahendus kulgeb elektroodide vahel lühimat teed pidi, mistõttu kõigepealt purunevad elektroodilähedased kohad. Lõpptulemusena kopeeritakse toorikule tööriista kuju. Tööriist (katoode) valmistatakse tavaliselt messingist, vask-grafiit komposiitmaterjalist või grafiidist.

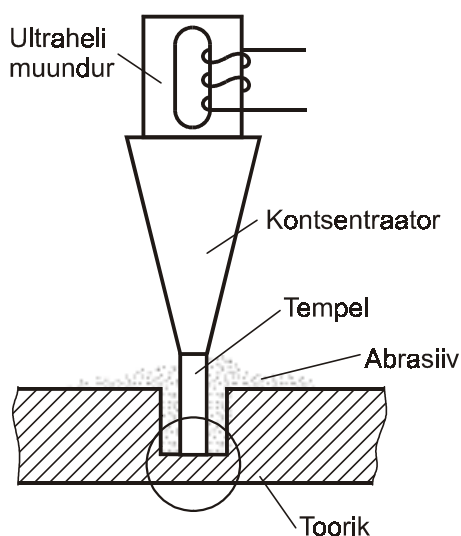


Sele 2.51 Elektroerosioontöötlemine

Elektrokeemiline töötlemine põhineb tooriku – anoodi – lagunemisel elektrolüüsil. Katoodina kasutatakse korrosioonikindlaid metalle (plii, vask jt.). *Elektrokeemilisel poleerimisel* e. anoodpoleerimisel lagunevad elektrolüüdis eelkõige tooriku anoodi pinna mikrokõrgendikud, mis muutuvad madalamaks ja siledamaks. Elektropoleerimisel eemaldatakse ühtlasi tooriku defektne pinnakiht, mis parandab detaili mehaanilisi omadusi ja korrosioonikindlust. Töödelda saab vaid elektrit juhtivaid materjale.

Ultrahelitäötlemine põhineb töödeldava materjali eemaldamisel abrasiivterade poolt, millele ultrahelisagedusega võnkuv tööriist annab kiirenduse (sele 2.52). Tööriist – tempel – pannakse võnkuma ultrahelimuunduri abil. Tööriista võnkeamplituudi suurendamiseks kinnitatakse ultrahelimuundurile akustiline kontsentraator. Tempeli ja tooriku vahele juhitakse vee ja abrasiivpulbri suspensioon. Ultrahelitäotlusega töödeldakse eelkõige kõvu ja hapraid elektrit mittejuhtivaid materjale. Pinnakvaliteet sõltub kasutatud abrasiivpulbri teralisusest.

Elektronkiir-, laser- ja plasmajugatöötlus kuuluvad **kontsentreeritud energiavooga töötlemis-meetodite** hulka. *Elektronkiirtöötlus* põhineb elektronide voo koondamisel töödeldavasse kohta. Energia suure tiheduse tõttu materjal sulab ja aurustub. Meetodit kasutatakse väikese läbimõõduga (10 µm...1 mm) avade tegemisel ja keeruka kontuuri lõikamisel metallist või mitmetallist detaili. *Laser-töötlus* põhineb kontsentreeritud ja võimendatud valguskiire energia soojuslikul toimel. Seda meetodit kasutatakse väikeste avade tegemisel ja materjali tükeldamisel. *Plasmajugatöötlusel* suunatakse kõrge temperatuuriga (10 000...30 000 °C) ioniseeritud gaasijuga (plasma) tooriku pinnale. Seda viisi kasutatakse metallilõikamisel näiteks materjali tükeldamiseks ja valuplokkide defektse pinnakihi eemaldamiseks.

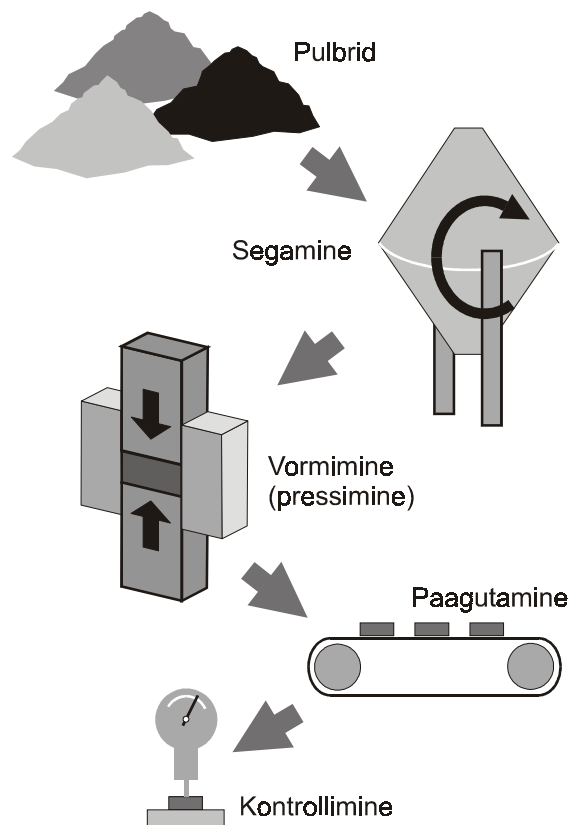


Sele 2.52 Ultrahelitäotlemine

2.6. Pulbermetallurgia

2.6.1. Pulbertoodete valmistamine

Pulbermetallurgia on materjalide ja toodete tootmise meetod pulbrilistest lähtematerjalidest. Pulbermaterjalide valmistamise tehnoloogia (sele 2.53) näeb ette pulbrite valmistamist (teostatakse metallurgia-tehastes), komponentide segamist, toodete vormimist, paagutamist ning vajadusel täiendavat töötlemist (lõiketöötlemine, immutamine õliga, pinnete pealekandmine jms.).



Sele 2.53. Pulbermaterjalide tehnoloogia

Pulbrite tootmisel rakendatakse peamiselt vedelmetalli pihustamist ja taandamist oksiidsetest lähtematerjalidest. Pulbriliste *lähtekomponentide segamisel* viiakse pulbrisegusse sageli pulbrite pressitavust parandavaid määrdeaineid.

Pulbrisegud *vormitakse* erinevaid vormimis-meetodeid kasutades. Enimkasutatav on külmpressimine pressvormis, kuid erijuhtudel rakendatakse pulbrite valtsimist, ekstrusiooni, kuumpressimist, isostaatvormimist jne. Viimasel juhul avaldatakse konteinerisse paigutatud pulbermaterjalile ruumilist survet gaasilist (gasostaatpressimine) või vedeliku keskkonda (hüdrostaatpressimine) kasutades.

Paagutamise eesmärgiks on vormitud toorikute tugevuse tõstmine. Eristatakse *tardfaaspaagutamist*, mis toimub temperatuuril, kui ükski pulbrisegu komponentidest ei sulab, ning *vedelfaaspaagutamist*, mil pulbrisegu üks komponentidest sulab. Enamik pulberkonstruktsioonmaterjalidest tooteid saadakse tardfaaspaagutamise teel temperatuuril,

mis on 70...80% põhimaterjali sulamistemperatuurist (raua baasil pulbermaterjale näit. temperatuuril 1100...1200 °C). Kermiseid (keraamilismetalseid komposiite) toodetakse reeglina vedelfaaspaagutust kasutades.

Pulbermetallurgia peamiseks eelisteks traditsiooniliste tehnoloogiatega võrreldes on materjalide kokkuhoid (pulbertooted ei vaja olulist mehaanilist töötlust sellega kaasneva laastueraldamisega) ning tehnoloogia lihtsustumine (ka keerukate toodete valmistamisel suhteliselt väike tehnoloogiliste etappide arv). Pulbermetallurgilisel teel on võimalik toota materjale ning nendest tooteid, mida teiste tehnoloogiatega ei ole võimalik, näiteks tooted rasksulavatest metallidest (W, Mo jt.), kermised, keraamilised materjalid, suure poorsusega materjalid jt.

2.6.2. Pulbermaterjalid

Pulbermaterjalide olulisema osa (massi järgi) moodustavad konstruktsioonimaterjalid, laagrimaterjalid e. antifriktsioonmaterjalid, hõõrdmaterjalid e. friktsioonmaterjalid, elektrikontaktmaterjalid, magnetmaterjalid, poorsed materjalid, kermised, rasksulavad materjalid. Pulbermaterjalide suurim tarbija on autotööstus (ca 2/3, sele 2.54).

Pulbermaterjalidest detaile on hulgaliselt olmetehnikas, arvutus- ja paljundusseadmetes. Pulbermaterjalidest on valmistatud suur osa lõikeriistadest ja kaevandustööriistadest.

Pulberkonstruktsioonmaterjalidel on tavaliste, valatud materjalidega võrreldes struktuurseks iseloomuks *poorsus*. Poorsus (ei tohi ületada 25%) määrab selliste materjalide omadused ja kasutusala. Materjale poorsusega 16...25% kasutatakse väikesel, poorsusega 10...15% kergetel, poorsusega 2...9% keskmistel ning poorsusega <2% suurtel koormustel. Enimkasutatavad on raua baasil pulbermaterjalid – *pulberterased*.

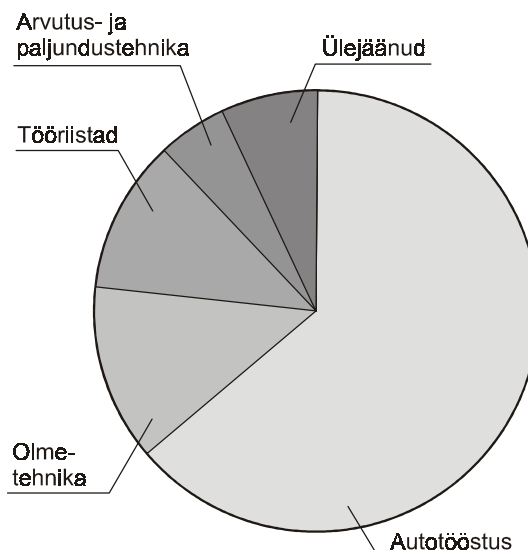
Pulberlaagrimaterjalid e. *pulberantifriktsioonmaterjalid* on väikese hõõrdeteguriga poorsed materjalid. Poorid on täidetud vedelate (õlid) või tahkete (grafiit, molübdeensulfiid MoS_2 jms.) määretega. Tuntuimad selle grupi materjalid on raudgrafiit, raud-vask, raud-vask-grafiit jt.

Pulberhõõrdmaterjalid e. *pulberfriktsioonmaterjalid* on suure hõõrdeteguriga materjalid kasutamiseks pidurdus- ja sidurdusseadmetes. Sellised, keerulise koostisega komposiidid sisaldavad lisaks metalsele tugevust tagavale põhimaterjalile (Cu, Fe, Ni) tahkeid määreid (grafiit, Pb, Sn jt.) ning suurt hõõrdetegurit tagavaid komponente (Al_2O_3 , SiC, SiO_2 jt.).

Poorseid pulbermaterjale kasutatakse filtreid, soojusisolatsiooni, pneumolaagrite, poorsete elektrootodide jt. toodete tootmisel. On võimalik saada poorseid materjale poorsusega kuni 90%.

Elektrikontaktmaterjalid on pulberkomposiidid, mis peavad samaaegselt omama väikest elektritakistust, suurt soojusjuhtivust, elektroerosioonikindlust (kontaktide lagunemiskindlust sädelahenduste toimel), keevitumiskindlust, samuti keemilist ja mehaanilist vastupidavust. Ükski metall ega kee-

miline ühend ei täida kõiki eelnimetatud nõudeid. Kõiki nõudeid on võimalik täita komposiitmaterjale, näiteks Ag-Mo, Ag-C, Cu-C jt., kasutades. Avatavate ja liugkontaktide valmistamiseks kasutatakse erinevaid materjale.



Sele 2.54. Pulbermaterjalide kasutusvaldkonnad

Magnetmaterjalid liigitatakse pehme- ja kõva-magnetmaterjalideks. Toodetakse nii traditsioonilise koostisega pulbermagnetmaterjale, mida saab toota tavatehnoloogiaid kasutades (valu, survega töötlemine), kui ka ainuüksi pulbermetallurgia iseloomulikke pulbermagnetmaterjale. Viimaste hulka kuuluvad näiteks *ferriidid* $\text{MeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, kus MeO tähistab eri metallide okside (NiO , MgO , BaO , ZnO jt.).

Rasksulavate materjalide all mõistetakse rasksulavaid metalle (W, Mo, Nb, Ta, V, Hf, Zr) ning rasksulavaid ühendeid: karbiidid (WC , TiC , TaC jt.), nitriidid (TiN , ZnN , TaN jt.), boriidid, silitsiidid. Sellistest materjalidest tooteid kasutatakse peamiselt kõrgetel töötemperatuuridel ja neid saab valmistada vaid pulbertehnoloogiat rakendades.

Kermised on keraamilis-metalsed komposiidid, kus keraamilise komponendina kasutatakse okside, karbiide, boriide, nitride. Kermiseid saab toota vaid pulbermetallurgia meetoditega. Tuntuimad ja enimkasutatavad on karbiidkermised, eelkõige volframkarbiidi (WC) baasil karbiidkermised, mida tuntakse ka *kõvasulamitena*. Kõvasulamitena kasutatakse WC-Co , WC-TiC-Co , WC-TiC-TaC-Co jt. kasutatakse tööriistade, kulumiskindlate ja kuumustugevate detailide valmistamisel.

3. ELEKTRIMATERJALID

3.1. Sissejuhatus

Elektrimaterjalideks nimetame materjale, millele eriomadused avalduvad elektri- ja magnetväljas.

Elektriseadmete ühikvõimsuse ja nimipingete pidev kasv energeetikas, seadmete mõõtmete ja massi vähenemine sides ja infotehnoloogias, töötamine raskendatud tingimustes (väga kõrge või väga madal temperatuur, suure energiaga kiirguse mõju, löökoormus jne.) esitavad järjest rangemaid nõudeid elektrimaterjalidele ja nõuavad uute materjalide väljatöötamist ning evitamist. Oluline on ka majanduslik külg, materjali valik, mis võimaldaks antud tehnilistele tingimustele vastava kõige optimaalsema lahenduse. Juba klassikaliseks muutunud liigituse järgi jagunevad elektrimaterjalid: dielektrikud (isoleermaterjalid), pooljuhid, elektrijuhid, magnetmaterjalid. Kolme esimese liigi määramisel on tavaliselt aluseks materjali eritakistus: dielektrikud $\rho = 10^7 \dots 10^{17} \Omega\text{m}$; pooljuhid $\rho = 10^{-6} \dots 10^{-8} \Omega\text{m}$; juhid $\rho = 10^{-8} \dots 10^{-5} \Omega\text{m}$.

Esitatud klassikaline liigitus ei vasta enam täielikult tänapäeva nõuetele, sest on olemas elektrimaterjale, mis omadustelt kuuluvad mitmesse liiki (ferriidid – pooljuhtivad magnetmaterjalid) või ei sobi üldse antud klassifikatsiooni (piesoelektrikud, elektreedid, vedelkristallid jne.).

Dielektrikutel (isoleermaterjalidel) peab olema suur elektritakistus, väikesed energiakaod, suur elektriline tugevus, küllaldane temperatuuri- ja niiskuskindlus, samuti mehaaniline tugevus.

Juhtidel peab olema sobiv eritakistus (väike – juhtmematerjalidel, suur – takistusmaterjalidel), piisav mehaaniline tugevus, temperatuuri- ja ilmastikukindlus.

Pooljuhtmaterjalidele esitatakse nõuded on väga mitmekesised, olenevad nende omaduste (takistuse, dielektrilise läbitavuse, elektromotoorse jõu jms.) sõltuvusest mõnest pooljuhile mõjuvast suurusest nagu temperatuur, elektriväljatugevus, valgustatus, niiskus jne. Väga oluline on lisandite mõju.

Magnetmaterjale kasutatakse peamiselt elektriseadmetes magnetjuhtidena (elektrimootorites, trafodes, aparaatides jm.). Neil materjalidel peab olema suur magnetiline läbitavus ja väikesed energiakaod.

3.2. Dielektrikud

3.2.1. Dielektrikute põhiomadused

Dielektrikud leiavad kasutamist peamiselt *elektriisoleermaterjalidena*; nendele pöörataksegi käesolevas peatükis põhitähelepanu. Mõiste dielektrik on siiski mõnevõrra laiem, kuna lisaks isoleer-

materjalidele kuuluvad sinna ka näiteks elektreedid ja piesoelektrikud.

Dielektrikutel on väga väike elektrijuhtivus ja nad polariseeruvad elektriväljas. Dielektrikute hulka kuuluvad kõik gaasid ning osa vedelikke ja tahkeid aineid. Aine ehituse poolest jagunevad dielektrikud neutraalseteks ja polaarseks. Neutraalsed dielektrikud koosnevad aatomitest ja molekulidest, mille positiivse ja negatiivse laengu keskmised ühtivad (näit. vesinik, inertgaasid, polüeteen). Polaarsed dielektrikud koosnevad molekulidest, mille positiivse ja negatiivse laengu keskmised ei ühti (näit. polüvinüülkloriid, tekstoliit). Polaarse aine molekul moodustab elektrilise dipooli, s.t. süsteemi, kus kaks võrdset vastasmärgilist laengut asuvad üksteisest teatud kaugusel.

Dielektrikut iseloomustavad järgmised elektrilised omadused: polarisatsioon, elektrijuhtivus, dielektrikuskood ja elektriline tugevus. Neid dielektriku omadusi iseloomustavad suhteline dielektriline läbitavus ϵ , eritakistus ρ , kaonurga tangens $\tan\delta$ ja läbilöögitugevus E_l . Nende näitajate sisuga tutvume järgmistest alapeatükkidest.

Dielektrikute polarisatsioon

Polarisatsioon on üks põhiline dielektrikus elektrivälja mõjul toimuv protsess. Polarisatsioon on seotud laengute piiratud nihkumine või dipoolide orienteerimine elektrivälja mõjul. Polariseeruvad nii neutraalsed kui ka polaarsed materjalid.

Neutraalsetes dielektrikutes nihkuvad erinimelised laengud aatomis ja molekulis vastasuundades ning positiivse ja negatiivse laengu keskmised enam ei ühti. Nihkumine on seda suurem, mida suurem on rakendatud elektrivälja tugevus. Polaares dielektrikus paiknevad dipoolid soojusliikumise tõttu kaootiliselt. Kui sellisele dielektrikule rakendada elektrivälja, siis see püüab pöörata dipoolid selliselt, et need oleksid orienteeritud mõjuva elektrivälja jõujoonte sihis. Elektrivälja eemaldamisel taastub endine olukord.

Igat elektroodidega varustatud ja elektriahelasse lülitatud dielektrikut võib vaadelda kondensaatorina. Sellise kondensaatori elektroodidel olev laeng on

$$Q = CU,$$

kus C on kondensaatori mahtuvus ja U kondensaatorile rakendatud pinge. Laengut Q võib vaadelda koosnevana kahest osast: laengust Q_0 , mis oleks kondensaatori elektroodidel, kui nende vahel oleks vaakum, ja tegelikult elektroodide vahel oleva dielektriku polarisatsioonist põhjustatud lisa-laengust Q_l . Seega

$$Q = Q_0 + Q_l.$$

Siit tuleneb peamine dielektriku polarisatsiooni iseloomustav näitaja – suhteline dielektriline läbitavus. *Suhteline dielektriline läbitavus* ϵ on laengute Q ja Q_0 suhe:

$$\epsilon = Q / Q_0 = (Q_0 + Q_l) / Q_0 = 1 + Q_l / Q_0.$$

Vaadeldes kondensaatorite mahtuvust, kui elektroodide vahel on vaakum ja kui elektroodide vahel on uuritav dielektrik, saame:

$$C_0 = Q_0 / U \quad \text{ja} \quad C = \varepsilon Q_0 / U = \varepsilon C_0.$$

Seega näitab ε seda, mitu korda suureneb samade mõõtmetega kondensaatori mahtuvus, kui asendada vaakum kondensaatori elektroodide vahel dielektrikuga, mille suhteline dielektriline läbitavus on ε .

Nagu nähtub ülaltoodud valemitest, on dielektrikute ε alati suurem kui üks. Gaaside ε erineb ühest niivõrd vähe, et gaaside ε võib võtta võrdseks ühega. Enamkasutatavatel neutraalsetel vedelatel dielektrikutel on ε tavaliselt vahemikus 2...3 ja polaarsetel 3,5...5 (aga näiteks destilleeritud vee ε on u. 80). Praktiliselt kasutatavatel neutraalsetel tahketel dielektrikutel on ε väärtus tavaliselt 2,0...4,0, polaarsetel orgaanilistel dielektrikutel ja klaasidel 4,0...10, kondensaatorkeraamikal võib ε väärtus ulatuda mõne tuhandeni. Teatud erilisel dielektrikute grupil, mida nimetatakse senjetelektrikuteks, on ε veelgi suurem, ulatudes mõnekümne tuhandeni.

Olgu siin nimetatud veel kaks erandlikku dielektrikute gruppi – piesoelektrikud ja elektreedid. Piesoelektrikutel tekib polarisatsioon mehhaanilise deformatsiooni toimel, elektreedid aga jäävad pärast elektrivälja eemaldamist polariseerituks (analoogselt püsimaagnetitele magnetväljas).

Dielektrikute elektrijuhtivus

Polarisatsioon on seotud laengute nihkumine. See põhjustab dielektrikus lühiajalise voolu, mida nimetatakse nihkevooluks. Alalispingel kestab see vool senikaua, kuni polarisatsioon jõuab välja kujuneda. See aeg on, olenevalt polarisatsiooni liigist, väga lühike, ulatudes 10^{-15} s kuni maksimaalselt mõne minutini. Vahelduvpingel kestab nihkevool kogu selle aja vältel, mil dielektrik asub elektriväljas. Tehnilistes dielektrikutes esineb alati ka väike hulk vabu laengukandjaid, enamasti ioone. Nende liikumine elektrivälja mõjul põhjustab juhtivusvoolu. Seega koosneb dielektrikut läbiv vool i kahest komponendist:

$$i = i_n + i_j;$$

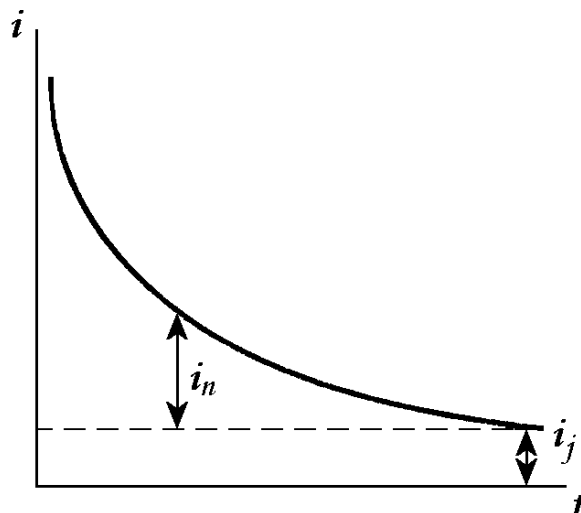
neist esimene on alalispingel kiirelt sumbu (sele 3.1).

Dielektriku takistus määratakse alalispingel, kasutades Ohmi seadust:

$$R = U / i_j,$$

kusjuures dielektrikut läbivat voolu mõõdetakse tavaliselt vähemalt 1 minut pärast voolu sisselülitamist, lugedes seda siis puhtaks juhtivusvooluks.

Tahketel materjalidel eristatakse mahu- ja pinnatakistust. Erinevate materjalide elektrijuhtivuse võrdlemiseks kasutatakse *mahueritakistuse* ρ ja *pinnaeritakistuse* ρ_s mõisteid. Nende pöördväärtused on mahu- ja pinnaerijuhtivused γ ja γ_s .



Sele 3.1. Voolud dielektrikus.

i_n – nihkevool, i_j – juhtivusvool

Mahueritakistuseks nimetatakse antud materjalist valmistatud 1 m servapikkusega kuubi takistust, kui elektroodideks on kuubi vastastahud ja vool piki kuubi pinda puudub. Mahueritakistuse ühikuks on Ωm . Kui on tegu suvaliste mõõtmetega dielektrikuga, siis tema mahueritakistus avaldub:

$$\rho = RS / h \quad [\Omega\text{m}^2 / \text{m} = \Omega\text{m}],$$

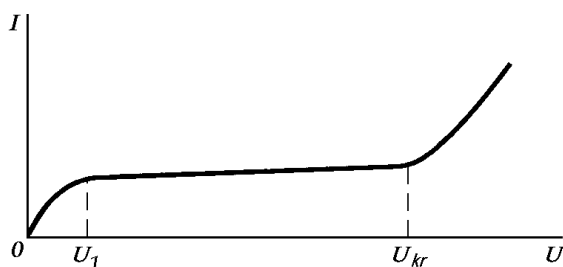
kus R on dielektriku mahutakistus, Ω , S – elektroodi pindala, m^2 ja h – dielektriku paksus, m .

Pinnaeritakistus on antud dielektriku pinnale kujundatud ruudu takistus, kui elektroodideks on ruudu vastasküljed. Ühikuks on Ω . Kui on tegu aga ristkülikuga, siis pinnaeritakistus avaldub:

$$\rho = R_s d / l \quad [\Omega\text{m} / \text{m} = \Omega],$$

kus R_s on dielektriku pinnatakistus, Ω , d – elektroodide pikkus, m ja l – elektroodide vaheline kaugus, m .

Gaaside elektrijuhtivus on väga väike. Laengukandjateks on enamasti kõrvalise ionisaatori (ultraviolettkiirgus, kosmiline kiirgus jms.) mõjul tekkinud ioonid. Sellist juhtivust nimetatakse sõltuvaks juhtivuseks. Suure rakendatud pinge puhul võivad ioonid tekkida ka gaasis endas pinge mõjul toimuva pörkeionisatsiooni tõttu. Pörkeionisatsiooni poolt põhjustatud juhtivust nimetatakse sõltumatuks juhtivuseks. Voolu sõltuvus rakendatud pingest on näidatud selel 3.2. Allpool kriitilist pinget U_{kr} on tegemist sõltuva juhtivusega. Kuni pingeni U_1 suureneb vool proportsionaalselt rakendatud pingega, osa kõrvalise ionisaatori poolt tekitatud ionidest osalevad juhtivuses, osa rekombineerub, pinge U_1 juures osalevad juhtivuses aga juba peaaegu kõik kõrvalise ionisaatori poolt tekitatud ioonid. Edasisel pinge tõstmisel jääb vool konstantseks, sest kusagilt ei ole täiendavaid laengukandjaid võtta. Pingest U_{kr} alates aga saab võimalikuks pörkeionisatsioon, tänu millele muutub juhtivus sõltumatuks, ionide arv kasvab järsult ja vool kasvab kiiresti.



Sele 3.2. Juhtivusvool gaasis sõltuvalt rakendatud pingest

Gaaside eritakistus on tavaliselt vahemikus $10^{16} \dots 10^{17} \Omega \text{m}$.

Vedelike juhtivus on gaaside omast suurem. Nende juhtivus sõltub molekuli ehitusest ja lisanditest. Neutraalsetes vedelike juhtivuses mängivad olulist rolli lisandite ioonid. Polaarsetel vedelikel lisanduvad veel vedeliku enda molekulide lagunemisel tekkivad ioonid (dissotsiatsioon). Temperatuuri tõustes vedelike juhtivus suureneb, kuna viskoossuse vähenemise tõttu suureneb ionide liikuvus.

Isoleermaterjalidena praktikas kasutatavate neutraalsete vedeldielektrikute eritakistus on tavaliselt vahemikus $10^{10} \dots 10^{13} \Omega \text{m}$, polaarsetel $10^8 \dots 10^{10} \Omega \text{m}$.

Tahkedielektriku mahujuhtivus on, sarnaselt vedelikega, põhjustatud lisandite ja ka dielektriku enda vabade ionide liikumisest. Isoleermaterjalidena kasutatavate neutraalsete tahkete dielektrikute eritakistus on tavaliselt vahemikus $10^{13} \dots 10^{16} \Omega \text{m}$, polaarsetel $10^9 \dots 10^{13} \Omega \text{m}$.

Tahkete dielektrikute pinnajuhtivus on suurel määral seotud saasta ja niiskusega dielektriku pinnal. Eriti kiiresti väheneb pinnaeritakistus, kui ümbritseva keskkonna niiskus ületab 70...80 %. Suurima pinnatakistusega on mittemärguvad materjalid (näiteks polüeteen, polüstürol). Tahkete dielektrikute pinnaeritakistus on tavaliselt vahemikus $10^8 \dots 10^{13} \Omega$.

Dielektrikuskadod

Dielektrikuskadudeks nimetatakse dielektrikus elektrivälja toimel ajaühikus hajuvat ja dielektriku soojenemist põhjustavat energiat.

Alalispingel on kaod põhjustatud ainult juhtivusest. Seega kõlbab alalispingel ka kadude iseloomustamiseks meile juba tuttav eritakistus ja dielektrikuskadusid saab avaldada dielektriku ekvivalentse takistuse R (mis arvestab nii mahu- kui ka pinnatakistust) kaudu:

$$P = I_j^2 R$$

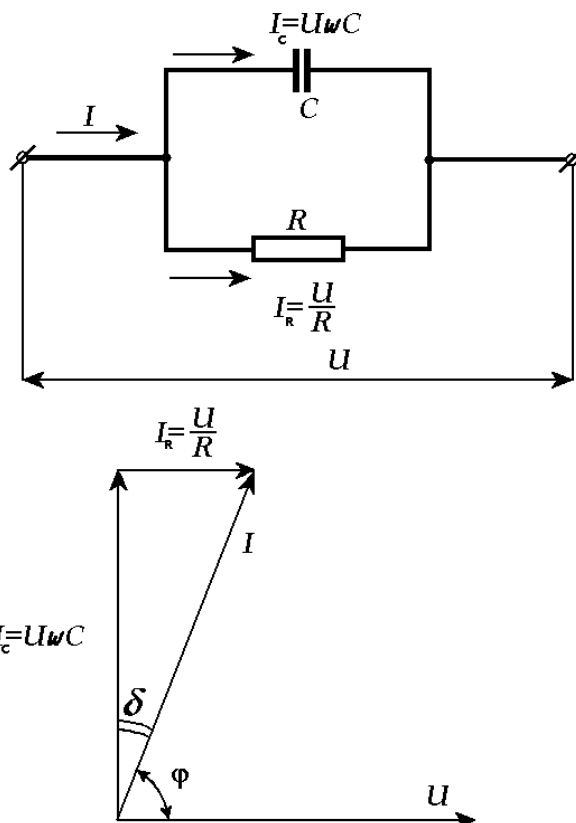
või, Ohmi seadust kasutades:

$$P = U^2 / R,$$

kus I_j on juhtivusvool ja U – dielektrikule rakendatud pinge.

Vahelduvpingel on olukord mõnevõrra keerulisem. Juhtivusest põhjustatud kadudele lisanduvad paljudel juhtudel ka polarisatsioonikaod. Polarisat-

siooni eri liikidest on suur osa seotud kadudega, seetõttu lisandub juhtivusvoolule veel nihkevoolu aktiivkomponent.



Sele 3.3. Ideaalse kondensaatori ja -takistiga asendatud dielektriku vektordiagramm vahelduvpingel.

Lisaks eelpooltoodule võib tehnilistes dielektrikutes olla veel mitmeid üsna suurte kadude allikaid. Nendeks on näiteks juhtivad või pooljuhtivad lisandid ja kihiliste materjalide ebaühtlane struktuur. Kõrgetel pingetel võivad kadude põhjuseks olla ka osalahendused (dielektriku osaline läbilöökk). Selliseid kadusid võivad põhjustada gaasilistes dielektrikutes korona ning tehnilistes tahketes dielektrikutes gaastühemikes tekkivad lahendused.

Kõige sagedamini iseloomustatakse dielektrikuskadusid kaonurgaga δ või kaonurga tangensiga $\tan \delta$. Kaonurgaks δ nimetatakse nurka, mis täiendab faasinihet φ voolu ja pinge vahel mahtuvuslikus ahelas kuni 90° . Ideaalsel, kadudeta dielektrikul on $\varphi = 90^\circ$ ja $\delta = 0^\circ$.

Kadude uurimiseks võib dielektrikuga kondensaatori asendada ideaalse kondensaatoriga C ja takistiga R (sele 3.3), mille põhjal saame avaldise dielektrikuskadude jaoks:

$$P = U I_R = U I_C \tan \delta = U^2 \omega C \tan \delta,$$

kus U on dielektrikule rakendatud pinge, I_R – voolu aktiivkomponent, I_C – voolu mahtuvuslik komponent, ω – rakendatud pinge nurksagedus ($\omega = 2\pi f$, kus f on sagedus hertsides) ja C – dielektriku mahtuvus. Nagu valemist näha, muutub kadude küsimus eriti teravaks kõrgel pingel ja suurel sagedusel.

Gaaside dielektrikuskaod on madalatel elektriväljatugevustel tühiselt väikesed. Kadude allikaks on elektrijuhtivus, kuna polarisatsioon gaasides pole kadudega seotud. Võrgusagedusel on kaonurga tangensi väärtus gaasides väga väike ($\tan\delta = 10^{-8}$). Kõrgetel pingetel ja ebaühtlases elektriväljas lisanduvad juhtivuskadudele koroonakaod.

Neutraalsetes vedelikes on dielektrikuskaod väikesed ($\tan\delta$ väärtus on suurusjärgus 10^{-4}) ja põhjustatud ainult juhtivusest. Polaarsetes vedelikes on kaod märgatavalt suuremad ($\tan\delta$ on suurusjärgus 10^{-2}). Seal esinevad peale juhtivuskadude veel polarisatsioonikaod.

Kaod tahketes dielektrikutes on seotud nende struktuuriga. Tahkete dielektrikute struktuur võib olla väga mitmesugune ja nendes esinevad kõik eespool vaadeldud kaoliigid. Ka $\tan\delta$ väärtused võivad kõikuda väga suurtes piirides: neutraalsetel materjalidel suurusjärgus $10^{-4} \dots 10^{-3}$, polaarsetel $10^{-3} \dots 10^{-2}$, senjetelektrikutel ja ebaühtlase struktuuriga dielektrikuil u. 10^{-2} . Viimaste materjalide suhteliselt suur $\tan\delta$ väärtus on tingitud polarisatsioonist ja osalahendustest.

Dielektrikute põhiomadused ja -parameetrid

- Polariseerimine – suhteline dielektriline läbitavus ϵ
- Elektrijuhtivus – eritakistus ρ
- Dielektrikuskaod – kaonurga tangens $\tan\delta$
- Elektriline tugevus – läbilöögi elektrivälja-tugevus E_i

Elektriline tugevus

Iga elektriväljas asetsev dielektrik kaotab oma isoleerivad omadused, kui elektriväljatugevus ületab teatud kriitilise väärtuse. Sel kriitilisel väljatugevusel tekib elektrootide vahele suure juhtivusega kanal, vool läbi dielektriku kasvab järsult. Seda nähtust nimetatakse dielektriku läbilöögiks. Väljatugevust, mil toimub läbilööki, nimetatakse läbilöögiväljatugevuseks ja sellele vastavat pinget läbilöögingepinge.

Dielektrikut iseloomustavaks suuruseks on elektriline tugevus, milleks loetakse dielektriku läbilöögiväljatugevust ühtlases elektriväljas:

$$E_i = U_i / d,$$

kus U_i on läbilööginge, V (enamasti kV) ja d on dielektriku paksus, m (vahel ka mm).

Dielektriku läbilöögingiprotsessi iseloom on gaasides, vedelikes ja tahketes ainetes erinev.

Gaaside läbilöögil mängivad olulist osa pörke- ja fotoionisatsioon. Gaaslahendus algab elektronide laviinide tekkega, misjärel moodustub elektrootide vahel suure juhtivusega plasmakanal (plasma koosneb negatiivsetest ja positiivsetest laengukandjatest), mida nimetatakse striimeriks. Nii tekib säde- lahendus, mis teatud tingimustel võib üle minna

võimsaks kaarlahenduseks. Gaaside elektriline tugevus normaaltingimustel (s.o. temperatuuril 200 °C ja rõhul 101,3 kPa) ei ole suur. Näiteks õhu läbilöögiväljatugevus ühtlases väljas on u. 30 kV_{max}/cm (s.o. u. 21 kV_{eff}/cm).

Gaaside elektriline tugevus sõltub eelkõige elektrivälja kujust ja rõhust. Mitteühtlases elektriväljas (väikese kõverusraadiusega elektrootid – juhtmed, vardad, teravikud) on gaaside läbilöögiväljatugevus ühtlase väljaga võrreldes mitmeid kordi madalam ja läbilöögile eelnevad lahendused väikese kõverusraadiusega elektrooti(de) lähedal, s.o. koroonalahendus. Gaaside elektrilise tugevuse sõltuvusele rõhust on iseloomulik suurem elektriline tugevus väga madalatel ja ka kõrgetel rõhkudel.

Vedeldielektrikute elektriline tugevus on tunduvalt suurem, kui gaasidel normaaltingimustel, kuid oleneb suurel määral lisandite olemasolust. Praktikas kasutatavates vedelikes on lisandid peaaegu alati olemas. Kõige tavalisemad lisandid on niiskus ja tahked osakesed, kuna vedeldielektrikuid kasutatakse tihti koos tahkete isoleermaterjalidega. Elektriväljas lisandid polariseeruvad ja kogunevad suurema väljatugevusega piirkondadesse, moodustades elektrootide vahel sillakesi, mis soodustavad vedeliku läbilööki.

Tahkete dielektrikute puhul võib sõltuvalt rakendatud elektrivälja iseloomust (alalis-, vahelduv- või impulsspinge), defektide olemasolust ja dielektriku jahutamistingimustest esineda kas elektriline, soojuslik või osalahendustest põhjustatud läbilööki.

Elektriline läbilööki on oma iseloomult sarnane läbilöögile gaasides, ka siin mängivad olulist rolli pörkeionisatsioon ja laviinid. Elektriline läbilööki on väga kiire protsess, läbilöögi aeg on suurusjärgus $10^{-6} \dots 10^{-8}$ s. Ühtlase struktuuriga tahkedielektrikute elektriline tugevus on elektrilise läbilöögi puhul väga suur, tavaliselt 100...300 kV/mm, ebaühtlase struktuuriga dielektrikuil on see näitaja suurusjärgu võrra väiksem.

Soojuslik läbilööki tekib siis, kui elektriväljas olevas dielektrikus kadude tõttu tekkiv soojushulk on suurem kui ümbritsevasse keskkonda üle kantav soojushulk. Siis materjali temperatuur tõuseb ja ta kas sulab, söestub või kaotab muul viisil oma isoleerivad omadused. Soojuslik läbilööki on pikaajaline protsess, läbilöögi aeg võib kesta minuteid.

Osalahendustest põhjustatud läbilööki esineb enamasti vahelduvpingel ebaühtlase struktuuriga dielektrikutes, kus esineb gaasitühemikke. Viimase võivad tekkida nii isolatsiooni valmistamisel kui ka isolatsiooni käituses. Neis gaasitühemikes võivad teatud elektriväljatugevuse puhul tekkida läbilöögid. Selliseid lahendusi nimetataksegi osalahendusteks. Osalahenduste käigus pommitatakse laengukandjatega tühemiku seinu, toimub materjali erosioon, tahke materjal laguneb, tühemik suureneb ja võib muutuda osaliselt juhtivaks. Kogu seda protsessi nimetatakse dielektriku vananemiseks osalahenduste mõjul. See on pikaajaline protsess, võib kesta minuteid, tunde või isegi aastaid ja lõppeda isolatsiooni läbilöögiga.

Mitteelektrilised omadused

Isoleermaterjali valikul mingi seadme jaoks ei piisa ainult selle elektriliste omaduste tundmisest normaalingimustel, vaid peab tähelepanu pöörama ka nende omaduste stabiilsusele kõrge ja madala temperatuuri, ümbritseva keskkonna erineva niiskuse ja muude eritingimuste puhul. Kuna isoleermaterjalid on tihti samaaegselt ka konstruktsioonimaterjalid, siis peab tähelepanu pöörama ka materjalide mehaanilistele omadustele: surve-, tõmbe- ja paindetugevusele, kõvadusele, elastsusele jne.

Isoleermaterjali kasutamise võimalus laias temperatuurivahemikus on tehnikas väga tähtis. Pikaajalisel soojenemisel halvenevad dielektriku omadused mitmesuguste protsesside tõttu. Seda nimetatakse dielektriku soojuslikuks vananemiseks. Soojuslikust seisukohast iseloomustavad dielektrikut peamiselt kuumusekindlus, külmakindlus, soojusjuhtivus.

Kuumusekindluse all mõistetakse dielektriku võimet taluda kõrget temperatuuri ilma, et tema omadused nimetamisväärselt halveneks. Suurima lubatud temperatuuri järgi on dielektrikud jagatud kuumuskindlusklassidesse (tabel 3.1).

Vedelate dielektrikute kuumuskindlust iseloomustatakse leektäpi, või ka süttimistemperatuuriga. Leektäpiks nimetatakse temperatuuri, mille juures vedeliku aurude ja õhu segu süttib tulega kokku puutumisel. Näiteks trafoõli leektäpp ei tohi olla alla 135 °C.

Külmakindlus võimaldab hinnata dielektrikute vastupidavust madalatele temperatuuridele. Paljud materjalid kaotavad madalatel temperatuuridel elastsuse ja pragunevad painutamisel. Viimast nähtust kasutatakse sageli materjalide külmakindluse määramisel.

Niiskuskindluse all mõistetakse dielektriku võimet pidevalt töötada niiskes keskkonnas ilma, et tema omadused nimetamisväärselt halveneks. Õhus esineb alati teatud kogus veeauru. Vesi on tugevalt polaarne madala eritakistusega vedelik, seega vedeldielektrikusse sattunud või tahke dielektriku pooridesse tunginud vesi halvendab tunduvalt dielektriku elektrilisi omadusi. Vee molekul on väga väike, seepärast võib vesi tungida väga väikese poorsusega materjalidesse. Niiskuskindluse parandamiseks kaetakse tahkete isoleermaterjalide pinnad mittemärguvate lakkide või glasuuriga, selleks kasutatakse ka vett imavate materjalide immutamist.

Tähtsad on ka isoleermaterjalide *mehaanilised omadused*, sest sageli kasutatakse neid samal ajal ka konstruktsioonelementidena. Isoleermaterjalide, eriti plastide, mehaanilisi omadusi on käsitletud esimeses peatükis.

Tabel 3.1. Isoleermaterjalide kuumuskindluse klassid

Klass	Lubatud temp. °C	Näiteid
Y	90	Polüeteen, polüstürool, immutamata paber ja papp
A	105	Immutatud paber ja papp, polüamiidkiled
E	120	Tekstoliit, getinaks, epoksü- ja polüuretaanvaigud
B	130	Orgaaniliste sidematerjalidega mikaniidid, klaastekstoliit
F	155	Mikaniidid ja klaaskiudmaterjalid koos kuumuskindlate sideainetega
H	180	Räniorgaanilised lakid ja nendega liimitud mikaniidid ja klaaskiudmaterjalid
C ¹⁾	> 180	Vilk ja klaaskiudmaterjalid, fluorplastid

¹⁾ Seoses uute kuumuskindlate materjalide kasutuselevõttuga on kuumuskindluse klasse laiendatud lubatud temperatuuride 25 °C intervallide kaupa. Klassi tähisena ei kasutata siis enam tähti, vaid lubatud maksimaalsele töötemperatuurile vastavaid numbreid (näit. 200, 225, 250, 275 jne.)

3.2.2. Isoleermaterjalid ja nende kasutusala

Gaasid

Isoleermaterjalidena leiavad kõige sagedamini kasutamist õhk, lämmastik ja elegaas (tabel 3.2). Tihti on isoleermaterjalina kasutatavatel gaasidel ka teisi funktsioone, nagu näiteks jahutamine, elektrikaare kustutamine. Kõige sagedamini on gaasiliseks dielektrikuks õhk. Õhk on isoleermaterjaliks näiteks õhuliini juhtmete ja mitmesuguste kõrge- ja madalpingeseadmete voolujuhtivate osade vahel. Sageli on õhk samal ajal ka jahutavaks keskkonnaks ja õhklülites elektrikaart kustutavaks keskkonnaks. Õhu elektriline tugevus ei ole suur, seepärast on kõrgepingeseadmetes voolujuhtivate osade vahekaugus suur ja õhkiisolatsiooniga seadmed suurte mõõtmetega.

Viimatinimetatud puudust leevendab elegaasi (väävelheksafluoriid SF₆) kasutamine. Elegaasi elektriline tugevus ületab õhu vastava näitaja u. 2,5 korda, ta ei ole mürgine, ei lagune alla 500 °C temperatuuril ja on suhteliselt odav. Seepärast leiab elegaas laialdast kasutamist gaasisolatsiooniga jaotlates (GIS – Gas Insulated Switchgear), trafodes, võimsuslülitites. Näiteks gaasisolatsiooniga 110 kV jaotla maht on ainult 10...20 % vastava õhkiisolatsiooniga jaotla mahust. Elegaasi üheks puuduseks on rõhu all oleva gaasi veeldumine suhteliselt kõrgel temperatuuril, näiteks 600 kPa rõhu all olev elegaas veeldub juba -30 °C juures. Veeldumist õnnestub vältida, kui kasutada elegaasi ja lämmastiku segu.

Tabel 3.2. Elektrotehnikas kasutatavate gaaside omadusi

Gaas	Tihedus kg / m ³	El. tugevus kV / mm	Soojus- mahtuvus kJ/kg °K	Veeldumis- temp. °K
Õhk	1,29	3,0	1,01	79
Lämmastik, N ₂	1,25	3,0	1,06	77
Elegaas, SF ₆	6,39	7,2	0,62	209
Vesinik, H ₂	0,09	1,8	14,2	20
Neon, Ne	0,90	0,4	1,03	27
Argoon, Ar	1,78	-	0,52	87
Krüptoon, Kr	3,47	-	0,25	120
Ksenoon, Xe	5,58	-	0,16	166
Heelium, He	0,18	0,4	5,20	4,2

Märkused:

1. Gaaside parameetrid on antud temperatuuril 20 °C ja normaalrõhul 101,3 kPa.
2. Veeldumistemperatuur on antud normaalrõhul.
3. Tabelis esitatud gaaside ϵ on vahemikus 1,000065 (heeliumil) kuni 1,002084 (elegaasil)

Veel võiks nimetada vesinikku ja inertgaase. Vesinikku kasutatakse tema väikese tiheduse ja suure soojusmahtuvuse tõttu laialdaselt suurte elektrimasinate jahutamisel. Inertgaase kasutatakse peamiselt hõõg- ja gaaslahenduslampide täitmiseks ja heeliumit enamasti vedelikuna ülijuhtivuse saavutamiseks vajaliku madalatemperatuurilise keskkonna loomiseks.

Vedelikud

Isolatsioonis kasutatavate vedelike ülesanne on lisaks isoleerimisele ka seadmete voolujuhtivate osade jahutamine. Vedeldielektrikuid kasutatakse ka poorsete tahkete ainete immutamiseks. Tavaliselt toimub immutamine vaakumis, mis garanteerib, et pooridesse ja tühemikesse ei jää õhku. Immutamine tõstab isoleermaterjali elektrilist tugevust märgatavalt. Mõnikord on vedeldielektriku ülesandeks ka elektrikaare kustutamise hõlbustamine.

Kõige sagedamini kasutatavad vedelikud on naftast valmistatud isoleerõlid. Traditsiooniliselt on neist kasutusel trafoõli, kondensaatoriõli ja kaabliõli. Kõige laiemalt on levinud trafoõli. Ta on jõutrafode õlibarjäärisolatsiooni põhiline koostisosa, samal ajal on trafoõli ka jahutavaks keskkonnaks. Trafoõli kasutatakse ka poorsete isoleermaterjalide immutamiseks ja õlilülitites elektrikaare kustutamiseks.

Trafoõli põhiomadused on:

- suhteline dielektriline läbitavus 2,1...2,3
- mahueritakistus $10^{10} \dots 10^{13} \Omega \text{m}$
- kaonurga tangens 0,001...0,02
- elektriline tugevus 20...40 kV / mm

Nagu näeme, on nende näitajatele antud väga suured vahemikud, mis on tingitud sellest, et vedeldielektrikute omadused sõltuvad suurel määral seal leiduvatest lisanditest. Trafoõli puudus on tema

tule- ja plahvatusohtlikkus, mistõttu peab alati rakedama vastavaid kaitsemeetmeid.

Kondensaatori- ja kaabliõlid on trafoõlist paremini puhastatud (seda eriti kondensaatoriõli). Seetõttu on nende põhiomadused mõnevõrra paremad, eriti eritakistus ja tan δ . Kondensaatoriõli kasutatakse paberõlisolatsiooniga kondensaatorites kondensaatoripaberi immutamiseks, et suurendada isolatsiooni elektrilist tugevust ja dielektrilist läbitavust. Kaabliõli kasutati kaabli-paberi immutamiseks ja õlikaablite täiteks. Nüüdisajal valmistatakse paberõlisolatsiooniga kaableid järjest vähem, aga neid on veel rohkesti kasutusel varasemast ajast.

Kasutamist leiavad ka sünteesilised vedelikud. 1930 ... 70. aastatel rakendati laialt kloreeritud difenüüle (firmanimetus: sovol, PCB, askarel). Need on aga mürgised ja keskkonnohtlikud, seepärast on nende kasutamisest loobutud. Räni- ja fluororgaanilistel vedelikel on kõrge töötemperatuur, väikesed kaod ja suhteline dielektriline läbitavus vahemikus 2...3, kuid nende kasutamist piirab küllaltki kõrge hind.

Tahked isoleermaterjalid

Tahked isoleermaterjalid moodustavad kõige suurema isoleermaterjalide grupi. Kasutatakse nii looduslikke ja tehismaterjale. Laiemalt on levinud tehismaterjalid, kuna neid saab valmistada ette antud elektriliste, mehaaniliste ja füüsikaliskeemiliste omadustega.

Keemilise koostise järgi jagatakse tahked isoleermaterjalid orgaanilisteks ja mitteorgaanilisteks materjalideks. Orgaaniliste materjalide hulka kuuluvad eelkõige looduslikud- (näit. kautšuk, paber) ja tehispõlümeeerid (näit. polüeteen, polüvinüülkloriid, polüstürool). Peamised mitteorgaanilised materjalid on vilk, klaas, keraamika.

Järgnevas vaadeldakse neid materjaligruppe eraldi. Enamlevinud tahkete isoleermaterjalide põhinäitajad on koondatud tabelisse 3.3.

Polümeerid

Polümeerid on kõrgmolekulaarsed orgaanilised materjalid. Elektrotehnikas leiavad kasutamist looduslikud ja tehispõlümeeerid. Polümeeride molekulid on moodustunud ühe või mitme madalmolekulaarse ühendi (monomeeri) liitumisel, mis võib toimuda kas polümerisatsiooni või polükondensatsiooni teel. Vananemise aeglustamiseks võidakse polümeeridele lisada mitmesuguseid stabilisatoreid.

Enamiku polümeeride molekulid on lineaarse struktuuriga, see tähendab, et molekulid moodustavad pikki (pikkus suurusjärgus 1 μm) peenikesi üksteisega läbipõimunud ahelaid, mille pikkuse ja läbimõõdu suhe on umbkaudu 1000. Viimasel ajal levivad aga üha laiemini võrkstruktuuriga polü-

meerid, kus pikkade lineaarsete molekulide vahel on põiksidemed. Need polümeerid on palju püsivamad, nende elektrilised omadused ja eriti töötemperatuur ületavad lineaarsete polümeeride vastavaid näitajaid.

Polümeerid võivad olla termoplastsed või termoreaktiivsed. Termoplastsed ained pehmenevad ja muutuvad temperatuuri tõustes voolavaks, temperatuuri langes tahkuvad taas ilma, et nende omadused muutuksid. Termoreaktiivsed polümeerid on tootmisprotsessis tavaliselt pehmed, kuid pärast tahkumist enam ei pehmene.

Looduslike polümeeride hulka kuuluvad kummi, paber, looduslikud vaigud.

Kummi valmistamisel on lähteaineks kautšuk. Kummi valmistamiseks ja kautšuki omaduste parandamiseks kautšuk vulkaniseeritakse. Vulkaniseerimisel lisatakse kautšukile väävlit ja kuumutatakse. Vulkaniseerimine muudab kautšuki struktuuri – kautšuki pikkade niitjate molekulide vahele tekivad põiksidemed ja struktuur muutub seega ruumiliseks. Vulkaniseerimisel paraneb kuuma- ja külmakindlus ja mehaaniline tugevus. Väävli väikese hulga (1...3%) puhul saadakse elastne kummi, suure väävlisisalduse (30...35%) puhul kõvakummi ehk eboniit. Peale väävli võidakse kummile lisada veel mitmesuguseid täite- (kriit, talk) ja värvaineid. Tänapäeval kasutatakse loodusliku kautšuki asemel üha rohkem eri koostisega sünteetilisi kautšukke ja nendest valmistatud tooted. Sõltuvalt koostisest on võimalik saada eriomadustega kumme: õlikindlaid, ilmastikukindlaid, kuumakindlaid jne. Kummitooteid kasutatakse elektrotehnikas juhtmete isoleerimiseks, kaitsekestadeks, isoleerkaitsevahendite (kindad, kalossid, matid) valmistamiseks.

Paber ja papp on tselluloosi baasil valmistatud materjalid. Tselluloosi valmistatakse puidust. Elektrotehnikas kasutatakse peamiselt kondensaatori- ja kaablipaberit. Mõlemad on tihedad paberid, kondensaatoripaber paksusega 4...20 µm, kaablipaber paksem: 20...240 µm. Kuiv paber on poorne ja kergesti niiskuv, mis halvendab tunduvalt paberi elektrilisi omadusi. Omaduste parandamiseks paber kuivatatakse ja immutatakse vaakumis mineraalõli või mõne sünteetilise vedeldielektrikuga. Kondensaatoripaberit kasutatakse immutatuna paberõliisolatsiooniga kõrgepinge kondensaatorite valmistamiseks. Viimasel ajal kasutatakse paberi asemel tihti paremate omadustega sünteetilist kilet (näit. polüpropüleen). Kaablipaberit kasutati varem laialdaselt paberõliisolatsiooniga kaablite valmistamiseks, nüüdisajal on paberõli isolatsiooni suures osas välja tõrjunud polüeteen.

Isoleerpapid erinevad isoleerpaberitest põhiliselt suurema paksuse (0,1...12 mm) poolest. Valmistatakse kaheksa tüüpi: õhus kasutamiseks (poolide karkassid, seibid jne.) ja õlis kasutamiseks (jõutrafode isolatsioon). Õlis kasutatavad papid on poorsemad, et tagada parem immutus.

Tehispolümeerid moodustavad laia ja mitmekesise isoleermaterjalide rühma. Enamlevinud tehispolümeer (e. sünteetiline polümeer) on polüeteen (tuntud ka polüetüleen nime all; tähis PE), mis on

lineaarse struktuuriga neutraalne termoplastne polümeer. Polüeteen on mehaaniliselt tugev ja seejuures elastne materjal ning tal on head elektrilised omadused (tabel 3.3). Teda kasutatakse laialt isoleermaterjalina ning torude, kile, tarbeesemete jms valmistamiseks. Lineaarsest polüeteenist palju kõrgema töötemperatuuriga on võrkstruktuuriga polüeteen (tähisted XLPE, PEX), mida kasutatakse peamiselt kõrgepingekaablite isolatsioonina (sele 3.4).

Polüstüreen (polüstürool; tähis PS) on termoplastne polümeer. Suhteliselt väikese kuumakindluse ja mehaanilise tugevusega, ent hea isoleermaterjal. Löögikindluse suurendamiseks kopolümeeritakse teda koos kautšukiga.

Fluororgaanilistest polümeeridest on enamlevinud polütetrafluoreteen (PTFE, teflon, fluorplast, Venemaal fluorplast-4 ja fluorlon-4). Teflon on mittepõlev libeda pinnaga termoplast. Ta on püsiv hapete, leeliste, õli ja bensiini suhtes ja heade isoleerivate omadustega ning väga kõrge töötemperatuuriga. Teflonist valmistatakse kõrgel temperatuuril ja agressiivses keskkonnas töötavaid seadmeid, isoleer- ja kattematerjale.

Polüvinüülkloriid (PVC) on lineaarse struktuuriga termoplastne polümeer, mida saadakse kloroeteeni polümeerides. Polüvinüülkloriid on heade elektriliste omadustega ja suure kloorisisalduse tõttu peaaegu ei põle. Kasutatakse juhtmete isolatsiooniks, kaablikestadeks, kilena kleeplindi, plastikaadi jms. valmistamiseks.

Orgaaniline klaas (pleksiklaas, polümetüülmetakrülaad) on läbipaistev polümeerne materjal, mida kasutatakse peamiselt konstruktsioonimaterjalina ja elektrikaart kustutavates seadmetes, sest ta eraldab elektrikaare mõjul suurtes kogustes gaase. Orgaanilist klaasi tarvitatakse nii elektrotehnikas kui ka lennuki-, auto- ja keemiatööstuses.

Polüamiid (PA) on heade mehaaniliste omadustega polümeer. Polüamiide kasutatakse sünteeskiudude, lakkide, värvide ja liimide tootmiseks. Nad on head konstruktsiooni- ja isoleermaterjalid. Kiudmaterjalina on ta tuntud nailoni (Venemaal kaproni, Saksamaal perloni) nime all.

Polükarbonaadid (PC, USAs lexan ja merlon, Saksamaal makrolon) on suure löögi- ja paindetugevusega head isoleermaterjalid, mida kasutatakse elektri ja raadiotööstuses isolatsiooni- ja konstruktsioonimaterjalidena (aparaatide ja välisvalgustite kered, torud jms.).

Polüuretaanid (PUR) on kõrgmolekulaarsed kulumis- ja ilmastikukindlad polümeerid. Nad on head heli-, soojus- ja elektrisolaatorid ning kergesti liimitavad.

Ränorgaanilised polümeerid ehk silikoonid on kõrgmolekulaarsed ühendid, mis olenevalt molekuli massist on kas vedelikud, elastomeerid või klaasjad polümeerid, mis taluvad kõrgeid temperatuure (300...400 °C) ja on sobivad kasutamiseks isoleermaterjalidena või kõrgetemperatuursete plastmasside sideainena.

Tabel 3.3. Tahkete isoleermaterjalide põhiomadusi

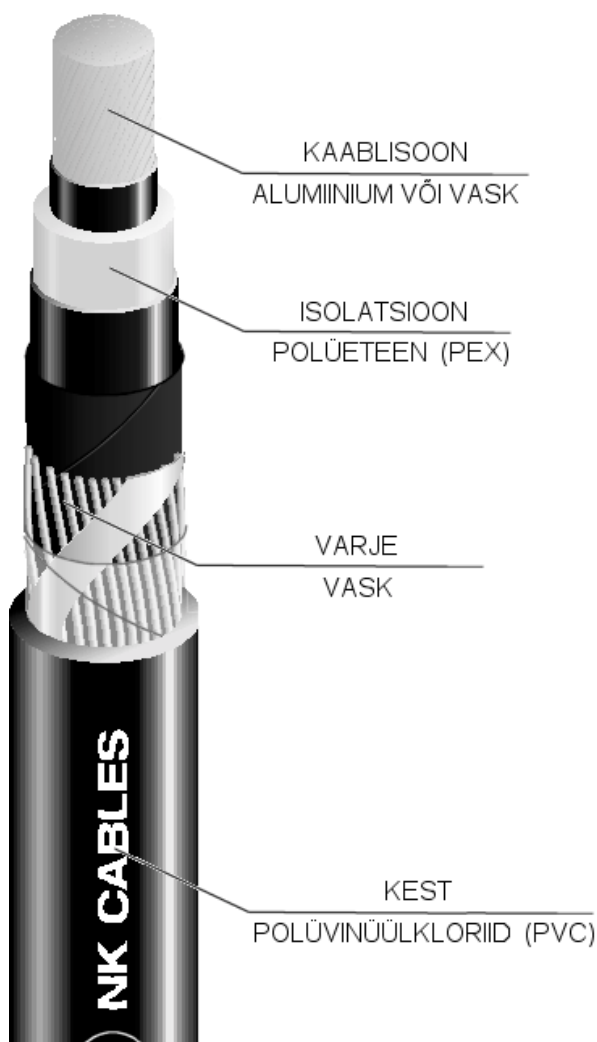
Nimetus	ε	$\rho, \Omega\text{m}$	$\tan\delta$	E_i kV/mm	Kuumus- kindlus, °C	Märkusi
Kautšuk	2,4	10^{14}	2×10^{-3}			Looduslikud polümeerid
Kummid	3...7	10^{13}	$10^{-1} \dots 10^{-2}$	10...25	55...250	
Paber, kuiv	2...3	$10^8 \dots 10^{13}$	5×10^{-3}	6	90	
Paber, immutatud	2...4		5×10^{-3}	40...75	105	
Presspapp	3		10^{-2}	6	90...120	
Polüeteen	2,2...2,4	$10^{13} \dots 10^{15}$	10^{-4}	15...20	80...90	Tehis- polümeerid ja plastid
Polüstüreen	2,4...2,6	$10^{14} \dots 10^{15}$	10^{-4}	100	80...90	
Tefloon	1,9...2,1	$10^{15} \dots 10^{16}$	10^{-4}	20...30	u. 250	
Plüvinüülkloriid	4,0...8,0	$10^{13} \dots 10^{14}$	10^{-2}	15...20	60...80	
Orgaaniline klaas	3,5...4,5	$10^{11} \dots 10^{12}$	10^{-2}	20...35	70...90	
Polüamiidid	3,0...6,0	$10^{11} \dots 10^{12}$	10^{-2}	40...60	100...120	
Getinaks	4,5...8,0	$10^9 \dots 10^{12}$	$10^{-1} \dots 10^{-2}$	15...35	100...120	
Tekstoliit	6,0...8,0	$10^7 \dots 10^{10}$	10^{-1}	5...15	100...120	
Klaastekstoliit	4,5...5,5	$10^{11} \dots 10^{12}$	10^{-2}	u. 20	120...150	
Räniorg. vaigud	3,5...5,0	$10^{12} \dots 10^{14}$	10^{-2}	15...25	180...220	
Epoksüvaigud	3,0...5,0	$10^{12} \dots 10^{13}$	10^{-2}	20...80	120...140	
Vilk, muskoviit	5...7	$10^{12} \dots 10^{14}$	$10^{-3} \dots 10^{-4}$	100...250	500...700	Vilgud
Vilk, flogopiit	5...7	$10^{10} \dots 10^{12}$	$10^{-2} \dots 10^{-3}$	70...150	u. 1000	
Mikaniit	6...7	$10^{10} \dots 10^{11}$	5×10^{-2}	15...30	130	
Mikaleks	7...9	$10^{10} \dots 10^{12}$	10^{-3}	10...20	350	
Leelisklaas	4...7	$10^6 \dots 10^8$	10^{-3}	10...20	400...600	Klaasid
Kvartsklaas	3,9	$10^{14} \dots 10^{15}$	10^{-4}	10...20	u. 1000	
BaO - klaas	7...11	$10^8 \dots 10^{11}$	10^{-4}	10...20	200...300	
Sitallid	5...7	$10^{10} \dots 10^{12}$	10^{-3}	20...80	800...1000	
Portselan	5...7	$10^{12} \dots 10^{13}$	$10^{-2} \dots 10^{-3}$	25...30	u. 1000	Portselanid
TiO - keraamika	30...200	$10^{10} \dots 10^{11}$	$10^{-3} \dots 10^{-4}$	u. 20		
Steatiit	6...7	$10^{10} \dots 10^{11}$	10^{-4}	10...25	u. 1000	
Senjettelektrikud	2000... 40000	ca 10^8	10^{-2}	2...3		

Fenoolformaldehüüdvaigud on metanaali ja fenoolide polükondensatsiooni saadused. Heade dielektriliste omadustega, taludes temperatuuri kuni 200 °C. Kasutatakse peamiselt sideainena *fenoolplastide* (PF) valmistamisel. Plastid sisaldavad täiteaineid, armeerivaid materjale. Fenoolplastidest tuntumateks plastmassideks on *getinaks*, kus täiteaineks on paber ning *tekstoliit* ja *klaastekstoliit*, kus täiteaineks on vastavalt riie ja klaasriie. Need on halvasti põlevad konstruktsiooni- ja isoleermaterjalid.

Epoksüvaigud (EP) on sünteetilised polümeerid, mis sisaldavad niinimetatud epoksürühma. Lisades vaigule kõvendit saadakse termoreaktiivsed epoksüplastid; neid kasutatakse soojus- ja elektrisolatsioonina (neist valmistatakse ka keskpinge isolaatoreid).

Vilk

Vilgukivi ehk vilk on üks levinum anorgaaniline dielektrik. Looduses leidub vilku kristallidena, mida saab lõhestada üksteisega paralleelseteks plaadikesteks. Elektrotehnikas kasutatakse peamiselt kahte liiki vilku; *muskoviiti* ja *flogopiiti*. Muskoviit on roosaka varjundiga läbipaistev vilk, mille põhilised leiukohad asuvad Indias ja USAs. Flogopiit on merevaikkollase varjundiga tume vilk, mille põhilised leiukohad on Madagaskaril ja Kanadas. Elektriliste omaduste poolest ületab muskoviit flogopiiti (tabel 3.3), lubatud suurimad temperatuurid on aga flogopiidil märgatavalt kõrgemad (flogopiidil ligi 1000 °C ja muskoviidil u. 500 °C).



Sele 3.4. Keskpinge kaabel

Turustatavat vilku toodetakse täisnurksete plaadikestena, mida võib vahetult isoleermaterjalina kasutada. Rohkem on kasutusel aga tooteid, milles viik on ainult koostisosa. Viikutooted saab valmistada suvaliste mõõtmetega ja kuigi nende elektrilised omadused jäävad tunduvalt naturaalsest viigust maha, rahuldavad nad siiski paljusid elektriseadmete isolatsioonile esitatavaid nõudeid.

Mikaniitideks nimetatakse leht- või rullmaterjale, mis saadakse lõhestatud viigulehekete kokkukleepimisel mitmesuguste lakkide abil. Mõnikord kleebitakse viik ühelt või kahelt küljelt paberile või klaasriidele. Alusele kleebitud lehekete materjali nimetatakse mikafooliumiks, kahe kihi vahele kleebitud viigulehekete materjali – mikalindiks.

Sõltuvalt kasutusalaast liigitatakse mikaniite:

- kommutaatormikaniit, mis on mõeldud kasutamiseks elektrimasinate kommutaatoris;
- vormitav mikaniit, mis on kuumalt hästi vormitav ja kasutatav mitmesuguste detailide pressimiseks;
- kuumakindel mikaniit, mis on valmistatud flogopiidist ja sisaldab eriti vähe (alla 3%) sideaineid.

Viigu töötlemisel jääb järele palju vilgu puru. Jahvatatud vilgu ja kergesti sulava klaasi kuum-

pressimisel saadakse üsna heade omadustega, suhteliselt kergesti töödeldav, kuumakindel materjal *mikaleks*.

Tänapäeval valmistatakse ka väga heade omadustega *sünteesilist vilku*. Selle struktuur sarnaneb flogopiidi struktuurile, suhteline dielektriline läbitavus on 6,5, eritakistus ja tanõ peaaegu samad, kui muskoviidil. Selline viik talub väga hästi kuumust (kuni 1100...1200 °C, kui on välistatud kokkupuude õhuniiskusega).

Klaas

Klaas on anorgaaniline termoplastne amorfne materjal, mis saadakse mitmesuguste oksiidide kiirel jahutamisel. Kiire jahutamine takistab kristalliseerumist. Kõikide klaaside põhikoostisosaks on kvartsiiv (SiO_2).

Klaaside omadused sõltuvad tema koostisesse lisatavatest oksiididest. Klaase, kus on suur leelismetallide oksiidide (Na_2O , K_2O) sisaldus, nimetatakse leelisklaasideks, nende erijuhtivus on suur ja neid kasutatakse elektrotehnikas harva. Leelisklaasile raskmetallide oksiidide (PbO , ZnO , BaO , TiO_2) lisamine parandab tunduvalt tema elektrilisi omadusi (tabel 3.3). Eriti heade elektriliste omadustega on leelisvabad *kvartsklaasid*.

Klaasi tootmise juurde kuulub termiline töötlemine. Enamus klaase lõõmutatakse, mis kõrvaldab klaasi kiirel ja ebaühtlasel jahtumisel tekkinud sisepinged. Lõõmutatakse ka keskpingetel kasutatavaid ühelehelilisi isolaatoreid, sest ka lõhenenult ei kaota selline isolaator oma isoleerivaid omadusi täielikult. Mõningaid klaase aga karastatakse; karastamisele kuuluvad ka kõrgepinge klaasrippisolaatorid, mida kasutatakse isolaatorketis. Karastatud klaas ei lõhene, vaid puruneb väikesteks kildudeks (tänu isolaatori kavalale konstruktsioonile ei kaota isolaator sel juhul aga oma mehaanilist tugevust). See võimaldab kergelt leida vigastatud isolaatoreid.

Mehaanilistest koormustest talub klaas hästi survet. Purustav pinge survele on piirides 6000...21000 N/mm², tõmbel aga ainult 100...300 N/mm². See on põhjus, miks klaasdetailid, sealhulgas ka klaasisolaatoreid püütakse konstrueerida nii, et nad ei töötaks tõmbeolukorras.

Sitallid ehk *keraamilised klaasid* on kristallilise struktuuriga. Viimane saavutatakse kristalliseerumissstimulaatorite lisamise ja termilise töötlemisega. Sitallid on heade elektriliste omadustega, taluvad kõrgeid temperatuure ja on tavalistest klaasidest mehaaniliselt tugevamad. Nad sobivad kasutamiseks koos metallidega, kuna nende joonpaisumistegur on metallide omale lähedane.

Klaaskiudmaterjalid on valmistatud sulaklaasi kiududest. Väga peened (3...10 µm) kiud on elastsed, suure mehaanilise tugevusega ja töödeldavad tekstiilitehnoloogia võtetega. Klaaskiududest valmistatakse klaasriiet, klaaslinti, klaastekstoliiti.

Valgusjuhe on klaasist kiud, milles valgus levib täieliku sisepeegelduse tulemusena. Selle saavutamiseks peab kiu südamikü murdumisnäitaja olema suurem, kui kiu välise osa oma. Valgus-

juhtmetest ning tugevdavatest ja kaitsvatest elementidest moodustatakse optiline sidekaabel, mille kaudu saab edastada automaatikasignaale, telefonikõnesid, luua andmesidevõrke. Muuhulgas paigutatakse optilisi sidekaableid ka õhuliini piksekaitsetrossidesse ja jõukaablitesse. Seega pole elektriliinid enam ainult energia edastamiseks, vaid neid mööda liigub ka info.

Keraamika

Keraamilisteks nimetatakse materjale, mida saadakse eelnevalt tooteks vormitud mineraalsete pulbrite paagutamisel. Elektrokeraamiliste toodete valmistamisel on toormaterjalideks kaoliin, savi, põldpagu, kvarts, kips, kriit. Peale savide kasutatakse raadiokeraamiliste materjalide valmistamisel baarium-, titaan-, strontsium- jt. oksiide. Viimased parandavad materjali elektrilisi ja mehaanilisi omadusi. Keraamilisi materjale kasutatakse laialdaselt nende heade elektriliste ja mehaaniliste omaduste tõttu. Keraamilised materjalid on vastupidavad kõrgetele temperatuuridele, ka on neil küllaldane surve-, tõmbe- ja paindetugevus. Kõige enam levinud keraamiliseks materjaliks on portselan.

Elektrotehnikas kasutatava *portselani* peamised lähteained on savi, kvarts ja põldpagu. Portselani põletatakse temperatuuril ca 1300 °C. Portselantoodete väliseks viimistlemiseks, niiskuskindluse ja mehaanilise tugevuse suurendamiseks kaetakse portselani pind glasuuriga. Glasuuri koostis sarnaneb portselani koostisele, ent sinna on lisatud klaasi moodustavaid kergesti sulavaid komponente. Portselani lõplikul põletamisel glasuur sulab ja katab kogu portselani pinna ühtlase kihina. Portselanist valmistatakse madal- ja kõrgepingeisolaatoreid ja elektriseadmete detaile.

Kõrgsagedusseadmetes kasutatav keraamika peab olema väikeste dielektrikuskadudega. Kõige sagedamini kasutatakse kõrgsagedustel steatiiti. *Steatiit* on keraamiline isoleermaterjal, mis saadakse paagutades talki koos kaoliini ja baariumkarbonaadiga. Steatiit sarnaneb portselaniga, kuid on sellest mehaaniliselt tugevam ja kuumuskindlam. Kasutatakse peamiselt madalpingeseadmeis ja kõrgsagedusisolaatorite valmistamisel.

Kondensaatorkeraamika erineb eelmistest suurema dielektrilise läbitavuse poolest, mis võimaldab valmistada väikeste gabariitidega suure mahtuvusega kondensaatoreid. Sellise keraamika koostises on tihti titaanoksiid (TiO₂), peale selle võidakse kondensaatorkeraamikale lisada kaltsiumtitanaati, baariumtitanaati, strontsiumtitanaati. Need komponendid suurendavad dielektrilist läbitavust.

Eriti suure dielektrilise läbitavusega materjalideks on *senjettelektrikud*. Senjettelektrikud on ilma välise elektrivälja mõjuta (spontaanselt) polariseerunud, enamasti keraamilised ained. Spontaanse polariseerumise piirkondades (domeenides) on kõik elementaarsed elektrilised momendid ühesuunalised. Domeenide ümberorienteerumine välises elektriväljas põhjustabki suurt dielektrilist läbitavust ja muudab selle ka sõltuvaks välise elektrivälja tugevusest. Teatud temperatuurist (Curie

punktist) kõrgemal temperatuuril kaovad senjettelektriku eriomadused. Senjettelektrikuid kasutatakse elektro-, raadio- ja mõõtetehnikas suure mahtuvusega kondensaatorite, sealhulgas pingest oleneva mahtuvusega mittelineaarsete kondensaatorite valmistamiseks.

Lõpuks veel mõnedest dielektrikutest, mis otseselt isoleermaterjalide hulka ei kuulu.

Elektreedid

Elektreedid on dielektrikud, mis elektrivälja mõju lakkamisel säilitavad polariseerituse, olles seega püsivmagneti analoogid. Elektreedi valmistamisel jahutatakse dielektrikut, näiteks baariumtitanaati, tugevas elektriväljas (nii tekib termoelektreet) või valgustatakse fotojuhtivat dielektrikut tugevas elektriväljas (nii tekib fotoelektreet). Elektreete rakendatakse fotograafias, sidetehnikas jm.

Piesoelektrikud

Piesoelektriline efekt on mõnede kristallidele (näit. kvartsile) omane deformatsiooni ja polarisatsiooni vaheline sõltuvus. Kui sellist kristalli, piesoelektrikut deformeerida, siis tekivad tema vastastahkudel vastasmärgilised laengud. Esineb ka vastupidine efekt: kristall deformeerub välise elektrivälja toimel. Piesoelektrikuid kasutatakse raadiotehnikas ja elektroakustikas.

Vedekristallid

Vedekristallid on saanud viimasel ajal üsna laialdase leviku. Vedelkristall on orgaaniline aine erilises olekus, kus tal on nii vedelike kui ka kristallide omadusi (molekulide korrastatud paigutus, omaduste sõltuvus suunast s.o. anisotropia). Sellises olekus on need materjalid teatud temperatuurivahemikus (tavaliselt -25...+100 °C). Elektriväljas vedelkristalli molekulide suund muutub, sellega koos muutuvad ka nende optilised omadused ja nad muutuvad nähtavaks. Seda vedelkristallide omadust kasutatakse vedelkristallindikaatoris ja -kuvareis. Indikaatorile ilmuv number, sümbol, tingmärk vms. kujutis sõltub elektroodide kujust ja paigutusest. Ühte positsiooni tekitavad märgid (näit. numbrid) koosnevad segmentidest. Esitatava märgi kuju sõltub segmentide pingestus kombinatsioonist. Vedelkristallindikaatoreid kasutatakse mõõteriistades, kalkulaatorites, elektronmängudes, liiklusmärkides. Keerulisemaid, sealhulgas laserergastusega vedelkristallindikaatoreid kasutatakse kuvarites, televiisorites, reklaampaneelides.

3.3. Pooljuhid

Pooljuhtideks nimetatakse elektrimaterjalide klassikalise liigituse alusel materjale, millede eritakistus on dielektrikute ja juhtide vahepealne, olles vahemikus 10⁻⁶...10⁸ Ωm. Pooljuhtmaterjalide eritakistus sõltub eelkõige koostisest (väga olulised on lisandid), valmistamise tehnoloogiast ja välismõjudest (temperatuur, elektriväljatugevus, valgustatus jne.).

Pooljuhid on kas *keemilised elemendid* või *keemilised ühendid*.

Pooljuhtelemente on üldse 13, kuid enam kasutatavad on germaanium, räni, seleen, telluur, arseen ja fosfor.

Germaanium (Ge) on perioodilisussüsteemi IV rühma element, välimuselt hõbehall, metalse läikega, raskesti töödeldav ja rabe, sulamistemperatuur 958,5 °C. Temast valmistatakse pooljuhtdioode ja transistore, mis võivad töötada temperatuuridel -60...+70 °C.

Räni (Si) on sama rühma element, hallikas, kõva, habras ja metalse läikega, sulamistemperatuur 1415 °C. Kasutatakse mitmesuguste pooljuhtseadiste (diodid, transistorid, türistorid, stabilisaatorid jne.) valmistamisel.

Seleen (Se) on VI rühma element, hall kristalne aine sulamistemperatuuriga 221 °C. Kasutatakse peamiselt valgustundlike pooljuhtseadiste (fotoelemendid, fototakistid jne.), varemalt ka aladite valmistamisel.

Enamkasutatavad keemilised ühendid on oksiidid, karbiidid, sulfiidid, seleniidid jne.

Oksiide Cu₂O, CuO, Mn₂O₃, Co₂O₃ kasutatakse tänapäeval põhiliselt temperatuuritundlike takistite (termistoride) valmistamiseks. Tsinkoksiidist (ZnO) aga valmistatakse liigpingepiirikuid nii madal kui ka kõrgepingele.

Karbiide (SiC) kasutatakse varistoride valmistamisel, varem ka ventiillahendite mittelineaarsete takistite valmistamisel.

Sulfiide (PbS, Bi₂S₃, CdS, ZnS) kasutatakse fototakistite, fotoelementide ja luminofooride valmistamisel.

Seleniide (PbSe, Bi₂Se₃, CdSe, HgSe) kasutatakse fototakistite, pooljuhttermoelementide ja laserite tootmisel.

3.4. Elektri juhid

Elektrijuhtideks nimetatakse neid elektrimaterjale, mille eritakistus on $10^{-8} \dots 10^{-5} \Omega \text{m}$.

Põhimõtteliselt võivad juhtideks olla tahked kehad, vedelikud (vesi, elektrolüüdid) ja teatud olekus ka gaasid (plasma). Kuid harilikult kasutatakse elektrijuhtidena metalle ja sulameid.

Juhid liigitatakse tavaliselt kahte liiki: *suure erijuhtivusega elektrijuhid* ja *suure eritakistusega elektrijuhid*.

Esimest liiki juhte kasutatakse peamiselt õhuliini juhtmete ja trafode ning elektrimasinate mähiste valmistamisel. Siia kuuluvad eelkõige vask ja alumiinium, erijuhtudel (kontaktide materjalina) ka hõbe, mis on parim elektrijuht.

Teist liiki juhte kasutatakse enamasti reostatide, täppistakistite, elektrikuttekehade, hõõglampide jne. valmistamisel. Tuntumad seda liiki materjalid on mangaanin, konstantaan ja nikroom.

Põhilised elektrijuhte iseloomustavad suurused on eritakistus ρ või selle pöördväärtus – erijuhtivus γ , eritakistuse temperatuuritegur TK_p, kontaktpotentsiaalid ja elektromotoorsed jõud, soojusjuht-

tivustegur, mehaaniline tugevus ja suhteline pikene mine tõmbel. Kuna elektrijuhte kasutatakse enamikel juhtudel traadi kujul, siis kasutatakse eritakistuse ühikuks ka ühe meetri pikkuse ja ühe ruutmillimeetrilise läbilõikega traadi takistust $\Omega \text{mm}^2/\text{m}$, kusjuures $1 \Omega \text{mm}^2/\text{m} = 1 \cdot 10^{-6} \Omega \text{m}$.

Metallsetele elektrijuhtidele on iseloomulik positiivne takistuse temperatuuritegur, st. temperatuuri tõustes eritakistus suureneb:

$$\rho_2 = \rho_1 [1 + TK_p (t_2 - t_1)] \quad [\mu\Omega \text{m}],$$

kus ρ_1 on eritakistus temperatuuril t_1 , ρ_2 eritakistus temperatuuril t_2 , TK_p takistuse temperatuuritegur temperatuuril t_1 .

Kahe erineva metalli kokkupuutel tekib *kontaktpotentsiaal*, mis kõigub mõnest kümnest dikust voldist kuni mõne voldini. Kui kahe juhtme kokkuühendamisel mõlemate kontaktide temperatuurid on võrdsed, siis potentsiaalide vahe kinnises ahelas on null. Kui aga temperatuurid on erinevad, tekib *termoelektromotoorne jõud*. Seda nähtust rakendatakse temperatuuri mõõtmisel termopaaride abil.

Hõbe (Ag) on valge läikiv metall väga hea peegeldumisvõime, elektri- ja soojusjuhtivusega. Puhtalt kasutatakse teda väiksemates kontaktides ning ta on mitmete metallkeraamiliste kontaktide põhiline koostisosa. Dielektriku pinnale kantuna võib hõbe olla kondensaatorite elektroodideks. Teda kasutatakse ka suure mahutavusega keemiliste vooluallikate, näit. hõbetsink-akumulaatorite elektroodidena.

Vask (Cu) on roosakas punane hästi töödeldav metall. Vask oli kaua aega põhiline elektrotehnikas kasutatav juhtmematerjal ja tänapäevalgi kasutatakse teda laialdaselt väikese eritakistuse, elastsuse, küllaldase mehaanilise tugevuse, korrosioonikindluse, hea joodetavuse jms. tõttu. Vasevarude piiratus (teda leidub maakoores vähem kui 0,01%) on sundinud otsima vähemdefitsiitseid juhtmematerjale (milleks on eelkõige alumiinium). Vask on keemiliselt väheaktiivne, reageerib lämmastik- ja kontsentreeritud väävelhappega. Õhus kattub vase pind oksiidi õhukese kihiga, mis kaitseb edasise oksüdeerumise eest. Juhtmevask võib olla kahesuguse töötlusega. Külmtöötlusel saadakse nn. *kõva vask*, mille tõmbetugevus on kuni 360...390 N/mm². Pisut suureneb ka eritakistus. Kõva vaske kasutatakse õhuliini juhtmete, elektrimasinate kommutaatori lamellide jne. valmistamisel. Lõõmutamisel 400...650 °C juures saadakse *pehme vask*, mille tõmbetugevus on piirides 240...280 N/mm². Pehmet vaske kasutatakse elektrimasinate ja aparaatide mähisteks, kaabli soonteks jne. (sele 3.5).

Alumiinium (Al) on hall pehme metall. Tema eritakistus on umbes 1,64 korda vase eritakistusest suurem. Kuna aga alumiiniumi tihedus on vase tihedusest 3,3 korda väiksem, siis sama takistusega alumiiniumjuhe on vaskjuhtmest enam kui kaks korda kergem. Teiseks alumiiniumi eeliseks on tema küllaldased varud (maakoores umbes 8,8%).

Tabel 3.4. Elektrijuhtide põhiandmed

Materjal	Eritakistus temperatuuril +15°C, $\mu\Omega\text{m}$	Takistuse temperatuuritegur temperatuuril +15°C, K^{-1}	Tihedus, g/cm^3	Sulamis- temperatuur, °C
Hõbe (Ag)	0,016	0,0040	10,5	961
Vask (Cu)	0,0172	0,0040	8,89	1083
Alumiinium (Al)	0,028	0,0039	2,7	660
Raud (Fe)	0,098	0,0060	7,87	1535
Plaatina (Pt)	0,105	0,0039	21,45	1770
Manganiin	0,45	0,00002	8,4	960
Konstantaan	0,50	0,000015	8,9	≈1300

Alumiiniumitootmine on aga üks energia-
mahukamaid tootmisharusid. Analooiliselt vasega
liigitatakse ka alumiiniumi *kõvaks* ja *pehmeks* alu-
miiniumiks. Külmtöötlemisel saadakse kõva, kuum-
töötlemisel aga pehme alumiinium. Alumiiniumi
üheks puuduseks vasega võrreldes on tema väik-
sem tõmbetugevus. Kõval alumiiniumil on see kuni
180 N/mm², pehmel 75...90 N/mm². Õhuhapnikuga
kokku puutudes oksüdeerub alumiinium inten-
siivselt, tekitades suure elektritakistusega oksiidi
kihi, võib esineda ka galvaaniline korrosioon,
seetõttu on alumiiniumjuhtmete ühendamisel teisest
metallist juhtmetega vaja kasutada spetsiaalseid
üleminekuklemme, keeviliidet või ühenduskohtade
ülejoetmist. Alumiiniumi joetmisel tuleb kasutada
spetsiaalseid rübusteid või ultrahelitolvikuid, mis
lagundavad alumiiniumi pinnale tekkiva oksiidikihi.
Alumiiniumi kasutatakse eelkõige juhtmete, mähiste
ja kaabliisoonite valmistamisel. (sele 3.4).

Raud (Fe) ja raua alusel sulamid (peam.
terasid) leiavad oma suhteliselt suure eritakistuse ja
(vahelduvvoolu korral) ka induktiivtakistuse tõttu
juhtmematerjalina vähe kasutamist. Kuid oma suure
tugevuse tõttu (terastel tõmbetugevus kuni
1500 N/mm²) rakendatakse terast tugevdusena
alumiiniumjuhtmete südamikus, saades nõnda
terasalumiiniumjuhtme. Elektriraudteel, metros ja
trammiliinidel on terasrööpad ühtlasi ka voolujuhid.
Rauda kasutatakse ka elektrodumaterjalina keemi-
listes vooluallikates (raudnikkelakud).

Plaatina (Pt) on hallikasvalge, keemiliselt
vastupidav, hästi töödeldav metall. Elektrotehnikas
valmistatakse plaatinast kõrgetemperatuurilisi (kuni
1500 °C) termopaare ja takistustermomeetreid.

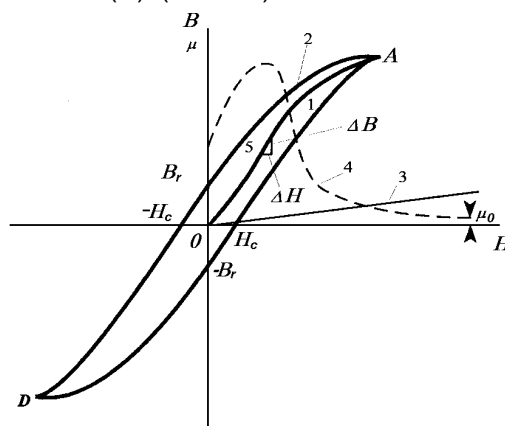
Manganiin (85%Cu,12%Mn,13%Ni) on väga
väikese eritakistuse temperatuuriteguriga sulam
(tabel 3.4.). Kasutatakse eelkõige täppistakistite
valmistamisel.

Konstantaan (60%Cu,40%Ni) on samuti väga
väikese eritakistuse temperatuuriteguriga sulam,
kasutatakse reostaatide, küttekehade ja termo-
paaride valmistamiseks.

3.5. Magnetmaterjalid

Aine magnetiliste omaduste põhjustajateks on
laengute liikumised aine elementaarosakestes
(elementaarvoolud, ka elementaarosakeste pöörle-
mine oma telje ümber), mis tekitavad neis osakestes
magnetmomente.

Praktikas kasutatakse magnetmaterjalidena
ferro- ja *ferrimagneetikuid* (*ferriite*), mis koosnevad
spontaanselt magneetunud piirkondadest – domee-
nidest, kus kõik magnetmomendid on orienteerunud
paralleelselt. Kuid välise magnetvälja puudumise
korral on need domeenid orienteerunud kaootiliselt.
Välise magnetvälja rakendamisel need materjalid
magneetuvad, st. et väikestel magnetväljatugevustel
välise välja suhtes väiksemat nurka omavad domee-
nid kasvavad (nende piirid nihkuvad suurenemise
suunas), väljatugevuse suurenedes aga hakkavad
pöörduma ka teiste domeenide magnetmomendid
välise välja suunas. Sõltuvalt materjali koostisest ja
struktuurist on domeenide pööramiseks vajalik
teatud tugevusega väline magnetväli. Magnet-
materjalides tekkiva *magnetilise induktsiooni* B
(magnetvälja tiheduse) sõltuvust rakendatud välise
magnetvälja tugevusest H iseloomustab *magneeti-
miskõver* $B=f(H)$. (sele 3.5).


Sele 3.5. Magneetimiskõver ja hüstereesisilmus.

1 – algmagneetimiskõver, 2 – hüstereesisilmus,
3 – vaakumi $B=f(H)$, 4 – magnetilise läbitavuse kõver,
5 – magneetimiskõvera maksimaalse tõusu (materjali
maksimaalse magnetilise läbitavuse) punkt.

Magneetumise intensiivsust sõltuvalt raken-
datud magnetvälja tugevusest iseloomustab abso-
luutse magnetilise läbitavuse μ_a kõver (sele 3X,
kõver 4), mis näitab, kui suuri magnetilise indukt-
siooni B muutusi (ΔB) tekitab teatud väljatugevuse
muutus (ΔH).

$$\mu_a = \Delta B / \Delta H \quad [H/m]$$

Vaadeldes magneetimiskõverat, näeme, et
magnetväljatugevuse suurenedes kasvab indukt-
sioon esialgu aeglasemalt, edasi aga kasv kiireneb.
See kasvu kiirus ongi materjali magnetiline läbi-
tavus. Magnetväljatugevuse suurendamisel vähe-
neb pidevalt uute pöördumate domeenide hulk, sest
suurem osa neist on juba välise välja sihis pöördu-
nud. Magneetimiskõvera punktis A on pöördunud
juba kõik võimalikud domeenid. Sellist olukorda
nimetatakse materjali magnetiliseks küllastuseks.
Vaakumis on sõltuvus $B=f(H)$ sirge, tõusuga
 $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} = 1,25 \cdot 10^{-6} \text{ H/m}$, (sele 3X), mida nimeta-
takse magnetiliseks konstandiks. Praktikas kasu-
tatakse materjali magnetilise läbitavuse hindamiseks
tavaliselt suhtelist magnetilist läbitavust:

$$\mu = \mu_a / \mu_0.$$

Kui hakata küllastusolukorras väljatugevust
vähendada, ei vähene induktatsioon almagneetimis-
kõverat mööda, vaid kulgeb sellest kõrgemal, st.
domeenide tagasipöördumine algolukorda toimub
aeglasemalt. Kui väljatugevus on muutunud nulliks,
on säilinud teatud jääkinduktsioon (*remanents*) B_r ,
mille kaotamiseks on vajalik teatud vastassuunaline
magnetväli tugevusega H_c , mida nimetatakse
koertsitiivjõuks. Vastassuunaline magneetumine
toimub kõvera 2 järgi kuni vastassuunalise küllastu-
miseni punktis D. Materjali korduval ümbermag-
neetimisel saadakse nn. hüstereesisilmus, mille
pindala on võrdeline ümbermagneetimisel tekkivate
energiakadudega, *hüstereesisikadudega*. Vahelduvas
magnetväljas tekivad lisaks hüstereesisikadudele ka
pöörisvoolukaod, mis tekivad magnetmaterjalis
indutseeritud pöörisvooludest. Mida suurem on
materjali elektriline eritakistus, seda väiksemad on
pöörisvoolukaod.

Teatud temperatuurist, nn. Curie täpist kõrge-
mal temperatuuril domeenid kaovad ja aine kaotab
oma ferromagnetilised omadused.

Magnetmaterjale võib liigitada põhiliselt kahte
gruppi: pehmemagnetmaterjalid ja kõvamagnet-
materjalid.

Pehmemagnetmaterjale iseloomustab kitsas
hüstereesisilmus (väike koertsitiivjõud $H_c < 400 \text{ A/m}$),
suur magnetiline läbitavus μ (magneetimiskõvera
suur tõus) ja neid kasutatakse peamiselt trafode,
pöörleva rootoriga masinate ja elektriaparaatide
magnetsüdamike valmistamiseks.

Pehmemagnetmaterjalidest on tähtsaim
puhas raud, mida kasutatakse ka lähtematerjalina
mitmesuguste teiste magnetmaterjalide valmista-
misel. Raua magnetilised omadused sõltuvad raua
puhtusest ja töötlemisviisist (tabel 3.5.). Puhta raua
kasutamist vahelduvvoolusüdamikes piirab tema
suhteliselt väike eritakistus, mis põhjustab suuri

pöörisvoolukadusid. Seetõttu vahelduvvoolusüda-
mikud (elektrimasinad, trafod, kontaktorid jne.)
valmistatakse pöörisvoolukadude vähendamiseks
elektrotehnilisest lehtterasest (trafoplekist). Materjali
eritakistuse suurendamiseks kasutatakse legeeri-
vaid lisandeid – räni, (tabel 3.6), molübdeeni,
kroomi.

Elektrotehnilist terast toodetakse üksiklehtedena,
rullidena, lintidena paksusega enamalt 0,15...1mm.
Et suurendada magnetahela takistust, on lehtterase
pind kaetud oksiidi, emaili, laki või mõne keemilise
töötlemise tulemusel tekitatud isoleeriva (näit.
fosfaadi) kihiga. Seadmetes, kus on vaja suurema
magnetilise läbitavusega, väiksemate kadudega jne.
materjale (voolutrafad, väiketrafad, helisagedus-
trafad, impulsseadmed, magnetvõimendid jne.)
kasutatakse südamiku materjalina laialdaselt nikli ja
raua sulameid – permalloisid (Ni 70...80% ja Fe
30...20%).

**Tabel 3.5. Erineva puhtuse ja töötlemisviisiga raua
magnetilisi omadusi**

Materjal	$\mu_{\max}$	Koertsitiivjõud H_c , A/m
Tehniliselt puhas raud	7000	64
Elektrolüütraud	15000	28
Karbonüülraud	21000	6,4
Vesinikus töödeldud raud	200000	3,2
Puhta raua monokristall	1430000	0,8

Tabel 3.6. Raua omaduste sõltuvus ränisisaldusest

Raua ränisisaldus %	Keskmine tihedus kg/dm^3	Keskmine eritakistus $\mu\Omega\text{m}$
...0,4	7,85	0,14
0,4...0,8	7,82	0,17
0,8...1,8	7,80	0,25
1,8...2,8	7,75	0,40
2,8...3,8	7,65	0,50
3,8...4,8	7,55	0,60

Väliste elektromagnetväljade mõju eest kaitsvate
magnetvarjete (ekraanide) valmistamisel kasu-
tatakse ka *alsiferi* (raua, räni ja alumiiniumi sulamit),
mille suhteline magnetiline läbitavus on kuni
120 000.

Kõvamagnetmaterjale iseloomustab suur
jääkinduktsioon B_r (*remanents*) ja suur koertsitiiv-
jõud H_c (lai hüstereesisilmus).

Vanimaks kõvamagnetmaterjaliks on marten-
siidiks karastatud (nõelja kristallstruktuuriga)
süsinik- ja legeeritud terased. Selline struktuur tekib
kiirel jahutamisel pärast kuumutamist. Legeerivateks

elementideks võivad olla nt. kroom, koobalt, volfram, mölübdeen, vask jne.

Valamise teel toodetavatest kõvamagnetsulamitest on tuntumad *alni* (koostises alumiinium, nikkel, raud), *alniko* (alumiinium, nikkel, koobalt, raud), *alnisi* (alumiinium, nikkel, räni, raud). Suure koobaldisisaldusega (24%) alniko sulamit nimetatakse ka *magnikoks*.

Tehnikas leiavad ka veel kasutamist mõned eriomadustega magnetmaterjalid nagu magnetostrikt-sioonmaterjalid ja termomagnetmaterjalid.

Magnetostrikt-sioonmaterjalidel muutuvad magnetvälja toimetel geomeetrilised mõõtmised ja neid kasutatakse elektroakustika- ja ultraheliseadmes, samuti side-, automaatika ja mõõteseadmes (magnetlindid, magnetkelmed).

Termomagnetmaterjalide magnetilised omadused sõltuvad suuresti temperatuurist, neid kasutatakse temperatuuriregulaatorite ja temperatuurikompensaatorite valmistamisel.

Magnetmaterjalide liigitus ja kasutusala

- Pehmemagnetmaterjalid – trafode ja elektrimasinate magnetahelad
- Kõvamagnetmaterjalid – püsimagnetid