

Priit Kulu, Jakob Kübarsepp,
Andres Laansoo, Renno Veinthal

MATERJALITEHNIKA I

Tehnomaterjalid

Õpik kõrgkoolidele

Ilmunud riikliku programmi
„Eestikeelsete kõrgkooliõpikute koostamine ja väljaandmine (2008–20012)“
toetusel

Käesoleva õpiku väljaandmist toetasid
Haridus- ja Teadusministeerium



Retsenseerinud Henn Hendre
Paul Treier

Keeleliselt toimetanud Mari-Ann Tamme

Küljendanud Antonina Andrijevskaia

Kaane kujundanud Tiia Eikholm

ISBN 978-9949-23-741-8

Autoriõigus: Priit Kulu, Jakob Kübarsepp, Andres Laansoo, Renno Veinthal, 2015

Eessõna

Täismahulist materjalitehnika aluskursust sisaldav raamat on kavandatud õpikuks kõrgkoolide bakalaureuseõppe kui rakenduskõrgharidusõppe tehnikaalade üliõpilastele, kelle õppekavas on materjalitehnika põhiõppe aineid (tehnomaterjalid, konstruksioonimaterjalide tehnoloogia või materjalitehnika).

Õpik on TTÜ kirjastuses aastatel 1998...2001 välja antud kolmeosalise kõrgkooliõpiku Metalliōpetus ja metallide tehnoloogia (I osa – Metalliōpetus ja metallurgia, II osa – Metallide tehnoloogia, III osa – Materjali ja tehnoloogia valik), aga ka Metalliōpetuse õpiku (2005) edasiarendus. Õpiku koostamisele eelnes kõnealuses valdkonnas terminoloogia paikapane (Materjalitehnika seletav sõnaraamat, 2013).

Kõnealuse kõrgkooliõpiku koostamisel on eeskujuks võetud selles valdkonnas rahvusvaheliselt tunnustatud J. T. Blacki ja K. A. Kosheri koostatud õpik *DeGarmo's Materials and Processes in Manufacturing* ja M. P. Grooveri õpik *Principles of Modern Manufacturing*, seda nii õpiku struktuuri, materjali esitust kui ka graafilist materjali silmas pidades.

Õpik koosneb kahest teineteisega haakuvast osast, mis üheskoos loovad aluse materjalide struktuuri ja omaduste ning nendes töötlemisel toimuvate protsesside mõistmisele.

Õpiku esimeses osas **Tehnomaterjalid** käsitletakse materjalide omadusi ja katsetamist, metallide ja sulamite struktuuri ja nendega seotud faasidiagramme, rauasüsinikusulameid (teraseid ja malme), nende saamist, materjali struktuuri ja omadusi mõjutavaid protsessitermotöötlust ja tugevdavat termotöötlust, mitterauasulameid (vasesulamid, alumiiniumsulamid jt), aga ka mittemetalseid materjale (plastid, keraamika ja komposiitmaterjalid) kui ka materjali valiku küsimusi.

Õpiku teises osas **Konstruksioonimaterjalide tehnoloogia** vaadeldakse põhilisi konstruksioonimaterjalide töötlemise ja toodete saamisega seotud protsesse: survetöötlus, valutehnoloogia, pulbermetallurgia, liitmisprotsessid, lõiketöötlus, mittetraditsioonilised töötlusmeetodid, pinnatehnika, plastide, keraamika ja komposiitide tehnoloogia.

Kummalgi osal on eraldi sisukord ja aineoetelu, mis võimaldab kumbagi osa teineteisest sõltumatult kasutada. Iga peatüki ees on ka sisukord, mis võimaldab õpiku lihtsamat käsitlemist. Iga peatükk lõpeb kordamisküsimustega, mis lihtsustavad üliõpilasel õppimist, aga ka valmistumist testideks ja eksamiks.

Õpiku I osa koostajaiks on metalliōpetuse professor Priit Kulu – metallidega seotud 1., 2., 3., 4., 5. ja 7. peatükid, v.a rauametallurgia (alajaotus 5.1.1) ja mitterauametallurgia (alajaotus 5.1.2), mille koostajaiks on metallide tehnoloogia professor

Jakob Kübarsepp ja komposiitmaterjalide tehnoloogia professor Renno Veinthal – mittemetallsete materjalide osa (6. peatükk).

Õpiku II osa koostajaiks on professor Jakob Kübarsepp – 8., 9., 10. ja osaliselt 11. ja 12. peatükid, lektor Andres Laansoo – 11. ja 12. peatükid, professor Priit Kulu – 13. peatükk ja professor Renno Veinthal – 14. peatükk.

Raamatu koostajad tänavad Sirje Roosmet ja Mariliis Treid abi eest tekstide arvutisse sisestamisel, Mart Viljust graafilise materjali vormistamisel, kirjastuse küljendajat Antonina Andrijevskaajat ja keeleteoimetajat Mari-Ann Tammet.

Raamatu koostajad tänavad retsenseente Enn Hendret ja Paul Treierit kasulike soovitude, märkuste ja tähelepanekute eest.

Raamatu autorid tänavad Eesti Haridus- ja Teadusministeeriumi ja Sihtasutust Archimedes õpiku koostamise toetamise eest riikliku programmi „Eestikeelsete kõrgkooliõpikute koostamine ja väljaandmine“ kaudu.

Raamatu koostajad on tänulikud kõigi õpiku kohta käivate kommentaaride, märkuste ja soovitude eest.

Õpiku koostajad

Priit Kulu, Jakob Kübarsepp, Andres Laansoo, Renno Veinthal

Sisukord

Eessõna	3
I TEHNOMATERJALID	
1. MATERJALIDE OMADUSED.....	8
1.1. FÜÜSIKALISED OMADUSED	8
1.1.1. Tihedus	8
1.1.2. Elastsusmoodul	9
1.1.3. Soojuslikud omadused	10
1.1.4. Elektrilised omadused.....	12
1.2. KEEMILISED OMADUSED.....	12
1.2.1. Metallide korrosioon.....	12
1.2.2. Plastide korrosioon	17
1.3. MEHAANILISED OMADUSED	17
1.3.1. Staatilisel koormamisel määratavad omadused	18
1.3.2. Dünaamilisel koormamisel määratavad omadused	28
1.3.3. Tsüklilisel koormamisel määratavad omadused	30
1.3.4. Kulumine	32
1.4. TEHNOLOOGILISED OMADUSED	37
1.5. KORDAMISKÜSIMUSED.....	37
2. METALLIDE JA SULAMITE STRUKTUUR	39
2.1. STRUKTUURI JA OMADUSTE SUHE.....	39
2.2. METALLIDE KRISTALNE STRUKTUUR	40
2.2.1. Aatomi struktuur	40
2.2.2. Kristallivõred ja kristallisatsioon	45
2.2.3. Elastne ja plastne deformatsioon	51
2.2.4. Kalestumine ja rekristallisatsioon	53
2.3. SULAMID.....	56
2.3.1. Metallisulamite faasid.....	56
2.3.2. Sulamite kristallisatsioon	60
2.4. KORDAMISKÜSIMUSED.....	61
3. TASAKAALULISED FAASIDIAGRAMMID JA RAUD-SÜSINIK SÜSTEEM	62
3.1. SISSEJUHATUS.....	62
3.2. KAHEKOMPONENTSED FAASIDIAGRAMMID	65
3.2.1. Faasidiagramm komponentide piiramatu lahustuvuse korral.....	65
3.2.2. Faasidiagramm komponentide piiratud lahustuvuse korral	66
3.2.3. Faasidiagramm komponentide mittelahustuvuse korral.....	68
3.2.4. Faasidiagrammid keemilise ühendi ja komponentide polümorfismi korral	68
3.2.5. Faasidiagrammide kasutus	71

3.3. KOLMEKOMPONENTSED FAASIDIAGRAMMID	74
3.4. RAUD-SÜSINIK FAASIDIAGRAMM.....	75
3.4.1. Raud ja süsinik.....	75
3.4.2. Faasid rauasüsinikusulameis	78
3.4.3. Fe-Fe ₃ C faasidiagramm	80
3.5. TERASED JA LIHTSUSTATUD Fe-Fe ₃ C FAASIDIAGRAMM.....	83
3.5.1. Lihtsustatud Fe-Fe ₃ C faasidiagramm.....	83
3.5.2. Faasimuutused terastes	85
3.6. MALMID	86
3.6.1. Malmide liigitus.....	86
3.6.2. Fe-C faasidiagramm.....	87
3.7. KORDAMISKÜSIMUSED.....	88
4. TERMOTÖÖTLUS	89
4.1. SISSEJUHATUS.....	89
4.2. PROTSESSITERMOTÖÖTLUS	90
4.2.1. Terase protsessitermotöötlus.....	90
4.2.2. Mitterauasulamite protsessitermotöötlus	96
4.3. TUGEVDÄV TERMOTÖÖTLUS.....	97
4.3.1. Terase tugevdäv termotöötlus.....	98
4.3.2. Mitterauasulamite tugevdäv termotöötlus	123
4.4. KORDAMISKÜSIMUSED.....	126
5. METALSED MATERJALID	128
5.1. RAUD JA RAUASULAMID.....	128
5.1.1. Rauametallurgia.....	129
5.1.2. Terased.....	150
5.1.3. Malmid.....	173
5.2. MITTERAUDMETALLID JA MITTERAUASULAMID	183
5.2.1. Mitterauametallurgia.....	184
5.2.2. Vask ja vasesulamid.....	192
5.2.3. Alumiinium ja alumiiniumisulamid.....	200
5.2.4. Muud metallid ja metallisulamid	210
5.3. KORDAMISKÜSIMUSED.....	223
6. MITTEMETALSED MATERJALID	226
6.1. SISSEJUHATUS.....	226
6.2. PLASTID.....	228
6.2.1. Plastide molekulstruktuur	228
6.2.2. Plastide liigitus ja omadused.....	232
6.2.3. Plastide ümbertöötlemine ja taaskasutus.....	255
6.3. ELASTOMEERID	258
6.3.1. Naturaalkummi	259
6.3.2. Sünteetilised elastomeerid	261

6.4. KERAAMIKA.....	264
6.4.1. Keraamika koostis, struktuur ja omadused	265
6.4.2. Keraamika liigitus.....	269
6.4.3. Tehnokeraamika	272
6.5. KOMPOSIITMATERJALID	282
6.5.1. Komposiitmaterjalide liigitus armatuuri järgi	282
6.5.2. Komposiitmaterjalide liigitus maatriksi järgi	290
6.5.3. Komposiitmaterjalide kasutus.....	296
6.6. KORDAMISKÜSIMUSED.....	298
7. MATERJALI JA TEHNOLOOGIA VALIK.....	301
7.1. LÄHENEMINE MATERJALI VALIKULE.....	301
7.2. TOOTEARENDEUS	303
7.3. MATERJALI VALIK LÄHTUDES KONSTRUKTSIOONITUGEVUSEST	305
7.3.1. Tugevusomadused	305
7.3.2. Kestvusomadused	312
7.4. DETAILI/TOOTE VALMISTUSTEHNOLOOGIA VALIK	315
7.4.1. Materjal ja valmistustehnoloogiate vahelised seosed	315
7.4.2. Tehnoloogia valiku põhimõtted	318
7.4.3. Koostamine	322
7.5. MATERJALIDE ASENDAMINE	326
7.6. MATERJALI FORMALISEERITUD VALIK	327
7.7. KORDAMISKÜSIMUSED.....	329
Soovitatav kirjandus.....	330
Aineregister.....	331
II KONSTRUKTSIOONIMATERJALIDE TEHNOLOOGIA	
8. SURVETÖÖTLUS	11
9. VALUTEHNOLOOGIA.....	106
10. PULBERMETALLURGIA	178
11. MATERJALIDE LIITMISPROTSESSID	211
12. LÕIKETÖÖTLUS	299
13. PINNATEHNIKA.....	407
14. PLASTIDE, KERAAMIKA JA KOMPOSIITMATERJALIDE TEHNOLOOGIA ...	435
Soovitatav kirjandus.....	493
Aineregister	494

1. MATERJALIDE OMADUSED

<p>1.1. FÜÜSIKALISED OMADUSED</p> <p>1.1.1. Tihedus</p> <p>1.1.2. Elastsusmoodul</p> <p>1.1.3. Soojuslikud omadused</p> <p>1.1.4. Elektrilised omadused</p> <p>1.2. KEEMILISED OMADUSED</p> <p>1.2.1. Metallide korrosioon</p> <p>1.2.2. Plastide korrosioon</p> <p>1.3. MEHAANILISED OMADUSED</p> <p>1.3.1. Staatilisel koormamisel määratavad omadused</p> <p>Tõmbeteim. Surveteim.</p> <p>Kõvaduskatse</p> <p>1.3.2. Dünaamilisel koormamisel määratavad omadused</p>	<p>Charpy löökpaindeteim</p> <p>Külmahaprus</p> <p>1.3.3. Tsüklilisel koormamisel määratavad omadused</p> <p>Väsimus.</p> <p>Väsimusteim</p> <p>1.3.4. Kulumine</p> <p>Kulumise liigid</p> <p>Metallide kulumiskindlus</p> <p>Plastide kulumiskindlus</p> <p>1.4. TEHNOLOOGILISED OMADUSED</p> <p>1.5. KORDAMISKÜSIMUSED</p>
--	--

Materjali valikul ja sobivusel tuleb arvestada väga paljude omadustega, mille hulka kuuluvad füüsilised, keemilised, mehaanilised, tehnoloogilised ja teised (majanduslikud, esteetilised) omadused.

Füüsilised	Tihedus, sulamistemperatuur, soojuspaisumine, eritakistus, juhtivus jm
Keemilised	Vastupanu korrosioonile, oksüdatsioonile, keskkonnamõjudele
Mehaanilised	Tugevus: voole- ja tugevuspiir, väsimus- ja roometugevus; kõvadus; plastsus, sitkus; kulumiskindlus
Tehnoloogilised	Vormitavus: valatavus, deformeeritavus, lõiketöödeldavus; liidetavus: keevitavus, liimitavus jm

1.1. FÜÜSIKALISED OMADUSED

1.1.1. Tihedus

Tihedus (*density*) on homogeenise aine mass ruumalaühiku kohta. Tiheduse ühikuks on kg/m^3 (ka g/cm^3). Eristatakse ka **puistetihedust** (*apparent density, bulk density*) pulbriliste materjalide korral, **rappetihedust** (*tap density*), eritihedust. Tihedus on ka

üks metallide liigituse alus (kergetallid tihedusega alla 5 g/cm³, raskmetallid üle 10 g/cm³ ja keskmetallid 5...10 g/cm³) (vt Tabel 1.1).

Tabel 1.1. Mõningate materjalide tihedus

Materjal	Tihedus ρ , g/cm ³
Metallid	
Alumiinium	2,7
Hõbe	10,5
Kuld	19,3
Magneesium	1,7
Nikkel	8,9
Plaatina	21,4
Plii	11,3
Raud	7,9
Tina	7,3
Titaan	4,5
Tsink	7,1
Vask	9,0
Volfram	19,3
Plastid	
Polüetüleen (LDPE)	0,9
Naturaalkummi	1,2
Keraamika	
Klaas	2,5
Korund	3,8
Puit	
Kask	0,7
Mänd	0,5

1.1.2. Elastsusmoodul

Materjali elastsust või jäikust iseloomustavad elastsuskonstandid, milleks on

- elastsusmoodul (normaal-, kuju- ja mahtelastsusmoodul),
- Poissoni tegur.

Normaalelastsusmooduliks ehk **Youngi mooduliks** E (*Young's modulus, modulus of elasticity*) nimetatakse Hooke'i seaduse kehtimise ja joonpinguse korral normaalpinge σ ja sellele vastva suhtelise deformatsiooni ε suhet

$$E = \sigma/\varepsilon \quad (1.1)$$

Kuju- ehk **nihkeelastsusmoodul** (*Coulomb's modulus, modulus of elasticity in shear*) G iseloomustab materjali nihkejäikust

$$G = \tau/\gamma \quad (1.2)$$

kus τ – tangentsiaalpinge,

γ – nihkenurk.

Maht- ehk **ruumelastsusmoodul** (*bulk modulus*) K iseloomustab materjali jäikust mahumuutuse suhtes

$$K = \sigma/\Delta, \quad (1.3)$$

kus σ – rõhk,

Δ – suhteline mahumuutus.

Poissoni tegur (*Poisson's ratio*) μ iseloomustab suhteliste risti- ja pikideformatsioonide suhet tõmbel (survel). Enamikul metallidel on see piires 0,2...0,4.

Erinevate materjaligruppide elastsusmooduli ja Poissoni teguri väärtused on esitatud Tabelis 1.2.

Tabel 1.2. Mõningate materjalide elastsusmooduli ja Poissoni teguri väärtused

Materjal	Normaalelastsusmoodul E , $\text{N/mm}^2 \cdot 10^3$	Poissoni tegur ν
Metalsed materjalid		
Terased	190...220	0,25...0,30
Alumiiniumisulamid	70...75	0,34
Titaanisulamid	110...120	0,34
Plastid		
Polüetüleen (MDPE)	0,4...1,4	0,4
Polüvinüülkloriid (PVC)	2,4...4,1	0,4
Keraamika		
Korund	350	–
Puit		
Kuusk	9,5	0,45...0,50
Mänd	2,2	0,45...0,50

1.1.3. Soojuslikud omadused

Soojuspaisumine

Materjali tihedus oleneb temperatuurist, enamasti vähenedes temperatuuri tõusuga; teisiti öeldes massiühiku maht suureneb temperatuuri tõusuga. See väljendub üldjuhul **soojuspaisumisteguris** (*coefficient of thermal expansion, CTE*) ja väljendatakse seda mõõtmete muutumises temperatuuri tõusuga ühe kraadi võrra. Tavaliselt on selleks pikkuse muut (harvemini mahu muut), kuna pikkust on lihtsam mõõta. Pikkuse muut kõnealusel temperatuuril on arvatav järgmiselt:

$$L_2 - L_1 = \alpha \cdot L_1 (T_2 - T_1), \quad (1.4)$$

kus α – joonpaisumistegur,

L_1 ja L_2 – pikkused mm-s vastavalt temperatuuridel T_1 ja T_2 , K.

Põhiliste tehnomaterjalide joonpaisumistegurite väärtused on Tabelis 1.3.

Sulamistemperatuur

Puhaste elementide **sulamistemperatuur** (*melting point*) T_s on temperatuur, mille juures materjal läheb tahkest olekust üle vedelasse olekusse. Vastupidine muutus – üleminek vedelast tahkesse – leiab aset **kristallisatsioon-** ehk **tardumistemperatuuril** (*crystallization temperature, solidification temperature*) T_k . Kristalsete ainete, näiteks metallide korral on sulamis- ja tardumistemperatuur (kristallisatsioonitemperatuur) sama. Kindlat soojushulka, mis on vajalik muutuseks tahkest olekust vedelasse olekusse, nimetatakse **sulamisoojuseks** (*specific heat*). Tabelis 1.3. on esitatud mõningate materjalide sulamistemperatuurid.

Soojusjuhtivus (*thermal conductivity*) on üks oluline soojusülekanne protsess ja see väljendub materjalide korral soojusjuhtivusteguris (*coefficient of thermal conductivity, CTC*). Mõningate materjalide soojusjuhtivustegurid on Tabelis 1.3.

Tabel 1.3. Mõningate materjalide soojuslikud omadused

	Sulamis- temperatuur T_s , °C	Joonpaisumistegur α , $1/K \cdot 10^{-6}$	Soojusjuhtivustegur λ , $W/m \cdot K$
Metallid			
Alumiinium	660	24	204
Hõbe	962	19,3	407
Kuld	1064	14,2	310
Magneesium	649	25	172
Nikkel	1455	13	60
Plaatina	1769	9,1	70
Plii	327	29	35
Raud	1539	12	80 (46/14) ²⁾
Tina	232	23	65
Titaan	1660	8	16
Tsink	419	40	115
Vask	1083	17	390
Volfram	3410	4,4	130
Plastid			
Polüetüleen (LDPE)	– ¹⁾	180	0,34
Naturaalkummi	– ¹⁾	80	0,12
Keraamika			
Klaas	520...550	9	0,8...1,0
Korund	2050	9	29

¹⁾ Pehmenevad temperatuuri tõusuga ja ei määratleta

²⁾ Sulgudes madalsüsinikteras/ roostevaba teras

1.1.4. Elektrilised omadused

Eritakistus (*resistivity*) ρ on voolujuhtiva materjali omadus – materjali võime, mis on seotud laengukandjate – elektronide liikumisega. See on 1 meetri pikkuse ühtlase 1 mm² ristlõikega traadi takistus (ühikuks on $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$).

Sagedamini kasutatav ja mugavam on materjali **elektrijuhtivuse** (*electrical conductivity*) mõiste kui eritakistuse mõiste. Elektrijuhtivus on eritakistuse pöördväärtus ($1/\rho$), kusjuures elektrijuhtivuse ühikuks on $(\Omega \cdot \text{m})^{-1}$.

Tabelis 1.4 on esitatud mõningate materjalide eritakistus ja suhteline elektrijuhtivus võrrelduna lõõmutatud vase elektrijuhtivusega, % IACS (*International Annealed Copper Standard*).

Tabel 1.4. Mõningate materjalide elektrilised omadused

Materjaligrupp/ materjal	Eritakistus ρ , $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 20 °C	Suhteline elektrijuhtivus, % IACS, orienteeruvalt
Voolujuhid	$(10^{-6} \dots 10^{-8})$	
Alumiinium	$2,8 \cdot 10^{-8}$	60
Hõbe	$1,5 \cdot 10^{-8}$	110
Kuld	$2,2 \cdot 10^{-8}$	80
Magneesium	$4,4 \cdot 10^{-8}$	40
Nikkel	$9,5 \cdot 10^{-8}$	20
Plaatina	$9,8 \cdot 10^{-8}$	17
Plii	$2,1 \cdot 10^{-7}$	8
Raud	$13 \cdot 10^{-8}$	15 (17 /70) ¹⁾
Süsinik	$5000 \cdot 10^{-8}$	0,03
Tina	$1,2 \cdot 10^{-7}$	145
Titaan	$4,2 \cdot 10^{-7}$	40
Tsink	$5,8 \cdot 10^{-8}$	30
Vask	$1,8 \cdot 10^{-8}$	100
Volfram	$5,5 \cdot 10^{-8}$	30
Pooljuhid	$(10^1 \dots 10^5)$	
Räni	$1,0 \cdot 10^3$	–
Isolaatorid	$(10^1 \dots 10^{15})$	
Polüetüleen	$100 \cdot 10^{12}$	–
Naturaalkummi	$1,0 \cdot 10^{12}$	–

¹⁾ Sulgudes madalsüsinikteras/ roostevaba teras

1.2. KEEMILISED OMADUSED

1.2.1. Metallide korrosioon

Korrosiooniks (*corrosion*) nimetatakse metalli ja keskkonna (õhk, gaasid, pinnas, vesi, kemikaalid) vahelist reaktsiooni, milles metall hävineb. Metallide korrosioon

võib kulgeda keemilise või elektrokeemilise mehhanismi järgi. **Keemiline korrosioon** (*chemical corrosion*) toimub kuivades gaasides ja orgaanilistes vedelikes (nafta, bensiin). Metallid reageerivad keskkonna agressiivsete komponentidega, ilma et sellega kaasneks elektrivoolu teke. **Elektrokeemiline korrosioon** (*electrochemical corrosion*) toimub vettsisaldavas keskkonnas ja sulaelektrolüütides. Korrosiooni põhjustavad elektrokeemilised reaktsioonid (anoodi- ja katoodiprotsessid) metalli ja elektrolüüdilahuse kokkupuutepinnal. Elektrokeemilise korrosiooni tõttu hävinevad metallid merevees, hapete, aluste ja soolade lahustes, sulasoolades, niiskes õhus ja pinnases uitvoolude osavõtul.

Eristatakse üldist ja paikset ehk lokaalset korrosiooni. Üldise korrosiooni puhul korrodeerub metall ühtlaselt kogu pinna ulatuses, paikse puhul aga ebaühtlaselt. Paikne korrosioon on ohtlikum, sest võib detaile tugevasti kahjustada, jäädes ise mõnikord vaevu märgatavaks.

Paikne korrosioon jaguneb laiguliseks, rõugeliseks, täpiliseks (pitting), kristallidevaheliseks ja pinnaaluseks korrosiooniks. Kristallidevaheline korrosioon kui kõige ohtlikum korrosioonivorm esineb kõrgleegerterastel tugevalt oksüdeerivas keskkonnas kõrgel temperatuuril, põhjustades sageli avariisid.

Korrosioonikahjustuste hindamiseks on mitmesuguseid visuaalseid, kaalulisi, elektrilisi ja mehaanilisi meetodeid. Kõige enam iseloomustab korrosiooni korrosioonikiirus, s.o metalli massi kadu ajaühikus detaili pindalaühiku kohta.

Metallide keemiline korrosioon on metalli vahetu ühinemine keskkonna oksüdeeriva komponendiga. Näiteks $2 \text{Mg} + \text{O}_2 = 2 \text{MgO}$. Kõrgtemperatuurine gaaskorrosioon esineb metallurgiaprotsessides (sulatamine, valamine, kuumvaltsimine) ja seadmetes (kollete restid, aurukatelde küttepinnad, siseõlemismootorite klapid, silindrid, kolvid, gaasi väljalasketorud, elektriahjade kütteelemendid). Metallide vastupidavust kõrgtemperatuursele gaaskorrosioonile nimetatakse **kuumuspüsivuseks** (*heat resistance*) või ka **tagikindluseks** (*scale resistance*).

Gaaskorrosiooni puhul kattub metallipind enamasti korrosioonisaaduste kihiga, mis ei lase oksüdeerijat metalli pinnale ja korrosioon aeglustub. Kaitsetoime on ainult nendel kihtidel, mis katavad metalli pinna ühtlaselt ja tihedalt. Selleks peab korrosiooniproduktide maht (V_{oks}) ületama korrodeerunud metalli mahu (V_{met}). Korrosioonile hästi vastupidavad on tiheda oksiidikihiga kattuvad metallid (Cd, Al, Pb, Sn, Ti, Zr, Zn, Ni, Be, Cu, Cr, Fe), millel $V_{oks}/V_{met} = 1,21 \dots 2,14$. Suurte V_{oks}/V_{met} väärtuste puhul praguneb kaitsekiht sisepingete tõttu ning korrosioon oluliselt ei aeglustu.

Kõrgetel temperatuuridel ($T \geq 1000 \text{ }^\circ\text{C}$), mil oksiidikiht metalli pinnal muutub ioon-elektron-elektrijuhtivaks, võib gaaskorrosiooni vaadelda elektrokeemilise korrosiooni eri liigina. Metallipind kujutab endast anoodi, millest eralduvad metalliioonid ja

elektronid. Katoodiks on oksiidi väliskiht, kus hapniku molekulid seovad elektrone – tekib oksiid. Metallioksiidide elektrijuhtivus erineb mitme suurusjärgu võrra. Protsessi mõjutavad oluliselt ka metalli ja hapniku aatomi- ja ioniraadiused. Kuna metalliioonide raadiused on tunduvalt väiksemad hapnikuiooni raadiusest, siis difundeeruvad esimesed oksiidis kiiremini kui hapnikuioonid ja oksiid moodustub peamiselt oksiidikihi välispinna läheduses.

Metallide gaaskorrosiooni kiirust mõjutavad metalli omadused (struktuur, pinnatöötlus ja sisepinged), aga ka sellised välistegurid, nagu temperatuur, gaasi koostis ja liikumiskiirus ning kuumutusrežiim.

Kui temperatuur tõuseb, kiireneb metallide gaaskorrosioon, vaatamata sellele, et reaktsiooni termodünaamilised eeldused vähenevad.

Levinud gaasidest kiirendavad korrosiooni tugevasti hapnik, väävlit sisaldavad gaasilised ühendid, veeaur, süsihappegaas ja kloor. Oluline on hapniku osarõhk gaasis p_{O_2} . Kõrgel temperatuuril suurendab hapniku osarõhu tõstmine algul korrosiooni-kiirust, mis seejärel mingi kriitilise p_{O_2} väärtuse puhul väheneb järsult ning jääb siis rõhu edasisest tõstmisest hoolimata püsima. Seda nimetatakse metallide kõrgtemperatuurseks passiivimiseks. Passiivne olek tekib ülihea kaitsevõimega oksiidikihi moodustumise tõttu metallipinnal (kroomterased, vask, titaan). Kui hapniku osarõhku tõsta tunduvalt üle kriitilise väärtuse, kaob paljude kroomteraste passiivsus ja korrosioon kiireneb. Sellist nähtust nimetatakse ülepassiivimiseks.

Gaasi liikumiskiirus mõjutab korrosiooni ainult algstaadiumis, hiljem saab määravaks reageerivate komponentide difusioon oksiidikihis. Vahelduv kuumutamine ja jahutamine kiirendab terast korrosiooni, sest termopinged vähendavad oksiidi kaitsevõimet.

Gaaskorrosiooni erijuhtumiks on süsinikärastus – süsiniku väljapõlemine terasest. Süsiniku difusiooni kiirus metallipinnale ületab raua oksüdatsiooni kiiruse. Kõige kiiremat süsinikärastust põhjustab veeaur, järgnevad CO_2 , hapnik, õhk, H_2 .

Gaaskorrosiooni kaitseks kasutatakse peamiselt järgmisi meetodeid: 1) legerimist, st sulamile lisatakse kuumuspüsivust tõstvaid legerivaid elemente; 2) kaitsepindamist; 3) kaitsegaasikeskkondade loomist (kasutatakse põhiliselt metallide kuumtöötlemisel).

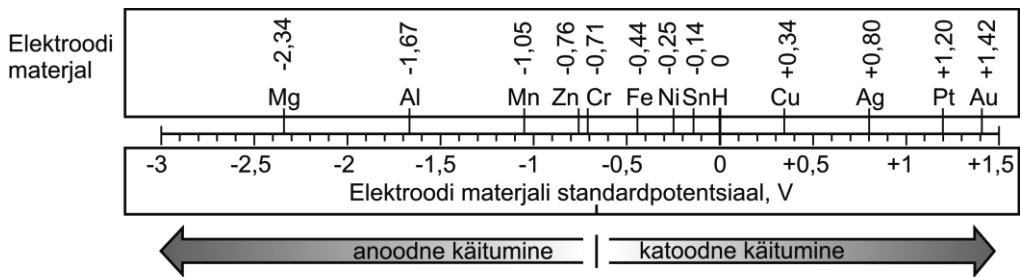
Metallide elektrokeemiline korrosioon on tingitud ca 80 % korrosioonikahjustustest. Korrodeeruva metalli pinnale kondenseerub niiskus, milles lahustub õhuhapnik. Tavaliselt muutub niiskus elektrolüüdiks, mis sisaldab õhus olevaid gaase (H_2S , CO_2 , SO_2) ning soola (NaCl). Teras (malmi) pind on elektrokeemiliselt ebahõltslane: tema struktuuris oleval ferriidil, tsementiidil ja grafiidil on erinevad elektrodipotentsiaalid. Tekkivates mikrogalvaanipaarides Fe-C, Fe- Fe_3C jt on raud

aktiivsemaks elektrodiks – anoodiks. Anoodiprotsessi väljendab võrrand $\text{Fe} - 2e \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ (raud, andes ära 2 elektroni, muutub kahevalentseks rauaks).

Keemiliselt puhta metalli puhul soodustab mikrogalvaanipaaride teket metallipinnale kondenseerunud niiskuskelme ebaühtlane koostis. Raudioonide üleminekul lahusesse tekivad anoodialadel vabad elektronid, mis liiguvad katoodialadele. Korrosiooni- protsessi pidevaks kulgemiseks on vaja katoodialadel saabunud elektronid siduda. Seda protsessi nimetatakse depolarisatsiooniks ja aineid, mis selles osalevad, depolarisaatoriteks.

Happelises keskkonnas on katoodiprotsessi depolarisaatoriks vesinikioonid: $2\text{H}^+ + 2e \rightarrow \text{H}_2$. Korrosioonil eraldub vesinik ja korrosioonisaadused – raud (II)-, raud(III)ioonid – jäävad lahusesse. Ka puhtas vees, kui see sisaldab lahustunud hapnikku, toimub raua ja rauast aktiivsemate metallide korrosioon vesinikdepolarisat- siooniga ning tekivad hüdroksiidsed korrosioonisaadused.

Metallide termodünaamilise püsivuse üle saab ligikaudselt otsustada nende normaal- potentsiaali alusel (Joonis 1.1): mida negatiivsem on metalli potentsiaali väärtus, seda väiksem on tema termodünaamiline püsivus. Paljude metallide (Al, Zn, Cr) pinnale tekib õhuke kaitsev oksiidikiht, mis takistab korrosiooni mitmesugustes kesk- kondades.



Näide: Cu normaalpotentsiaal on +0,34 V ja Al = -1,67 V, tekkiv potentsiaalide vahe $U = +0,34 \text{ V} - (-1,67 \text{ V}) = 2,01 \text{ V}$. Korrodeerub alumiinium (anood).

Joonis 1.1. Metallide normaalpotentsiaalid (standardvesinikelektroodi suhtes)

Elektrokeemiline korrosioon tekib välisallikast saabuva alalisvoolu (tramm, keevitus- seadmed) toimel. Katooditsoonis lähevad uitvoolud pinnasest torustikku. See tsoon pole otseselt korrosiooniohtlik torustikule, küll aga torude isolatsioonile. Ka tsoon, kus uitvoolud liiguvad mööda torustikku, pole ohtlik. Anooditsoonis siirduvad uitvoolud torustikust pinnasesse. Siin toimub intensiivne korrosioon. Selle välti- miseks kasutatavad kaitsemeetodid on järgmised: torustike sektsioneerimine (viib elektrijuhtivuse minimaalseks); elektrodrenaaž – trammirööbas ühendatakse torus- tikuga isoleeritud juhtme abil (kasutatav, kui torustiku potentsiaal on suurem

utivoolusid vastuvõtva süsteemi potentsiaalid); katoodkaitse; protektorkaitse; torustiku katmine isoleermaterjalidega (kõige paremini vastab nõuetele bituumen).

Elekrokeemilise korrosiooni kaitse viisideks on: 1) pindamine; 2) kaitsemäärdeid; 3) polarisatsioon; 4) korrosiooninhibiitorid; 5) vastava keskkonna loomine.

Pindamine

Metallpinded. Keemiliselt püsivama metalliga katmine on üks vanemaid ja levinumaid viise metallide kaitsmisel korrosiooni vastu. Kui pindemetall on põhimetallidest keemiliselt vähem aktiivne, siis on tegemist katoodpindega (Cu, Ni, Sn või Ag on rauale katoodpindeks). Zn ja Cd kui aktiivsemad metallid on raua suhtes anoodpindeks. Katoodpinne kaitseb seni, kuni kaitsekiht on vigastamata. Kui põhimetall paljastub, tekib galvaanielement, kus põhimetall on anoodiks. Kuna katodi pind on suur, siis väike anoodiala lahustub agressiivses keskkonnas kiiresti. Anoodpinne kaitseb metalli ka siis, kui selles on põhimetallini ulatuvaid vigastusi. Nii kaitseb tsinkpinne rauda praktiliselt seni, kuni kogu tsingikiht on lahustunud.

Oksiid- ja fosfaatpinded. Võrreldes metallpinnetega on oksiid- ja fosfaatpinnete keemiline vastupidavus väiksem, kuid nad sobivad hästi atmosfäärikorrosiooni tõrjeks ja on tihti heaks alusmaterjaliks (krundiks) värvpinnetele.

Värvpinded. Värvpindeid kasutatakse kõige enam elekrokeemilise korrosiooni tõrjeks. Kvaliteetse värvpinde saamisel on oluline pinna ettevalmistamine, kruntimine, pahteldamine, lihvimine-poleerimine ja värvimine.

Kaitsemäärdeid takistavad niiskuse juurdepääsu metallipinnale ja tõkestavad sellega korrosiooni. Konsistentsetest kaitsemääretest on tuntumad suurtükimääre, tehniline vaseliin ja autopõhjade kaitseks loodud mastiksid. Vedelatest kaitsemääretest kasutatakse mineraalõlide baasil valmistatud määrdeid, mis sisaldavad korrosiooni pidurdavaid aineid – inhibiitoreid sisaldavaid aineid.

Polarisatsioon kasutades pidurdub metallkonstruktsiooni elekrokeemiline korrosioon. Olenevalt metalltarindi polariseerimise viisist eristatakse protektor-, katood- ja anoodkaitsemeetodit.

Protektorkaitse korral ühendatakse metallkonstruktsioon isoleeritud juhtme abil temast aktiivsema metalliga, nn protektoriga, mis on moodustunud galvaanipaaris lahustuvaks anoodiks. Protektoriks kasutatakse Zn, Mg, Al. Kaitstav metall töötab katodina ja praktiliselt ei korrodeeru.

Katoodkaitse korral ühendatakse alalisvooluallika negatiivne poolus kaitstava metallkonstruktsiooniga, positiivne poolus abielektroodiga (vanad torud, rõõpatükid). Pinnases asetatakse anood eriuimbrisesse, mis koosneb kipsi, koksi ja keedusoola segust.

Anoodkaitse korral ühendatakse kaitstav objekt alalisvooluallika positiivse poolusega ja abielektrood negatiivse poolusega. Anoodkaitsega ei kaasne metalli lahustumist, seega jääb ära keskkonna saastumine metalliioonidega.

Korrosiooniinhibiitoriteks nimetatakse aineid, mille lisamisel agressiivsesse keskkonda korrosioonikiirus väheneb. Nende kasutamine on efektiivne, sest ei nõua kapitaal mahutusi ega põhimõttelisi muudatusi tehnoloogilistes protsessides.

Korrosiooni pidurdamiseks piisab, kui inhibiitori sisaldus agressiivses keskkonnas on 0,1...1 %. Enamasti on inhibiitorid kõrgmolekulaarsed ained, mille molekulid adsorbeeruvad metalli pinnale, ekraniseerides seda agressiivsest keskkonnast. Inhibiitori molekulid adsorbeeruvad ainult puhta, mitte aga roostes metalli pinnale. Korrosiooniinhibiitorid moodustavad terase pinnale tiheda passiivse oksiidikihi Fe_2O_3 .

Korrosioonitõrje vastava keskkonna loomise kaudu. Elektrokeemilise korrosiooni kulgemiseks vajalik silmale nähtamatu niiskuskihit tekib terase, vase, tsingi ja nikli pinnale, kui õhu suhteline niiskus on 50...70 %. See on korrosiooni kriitiline suhteline niiskus. Õhu suhteline niiskus väheneb, kui temperatuur tõuseb. Seetõttu on köetavad ruumid metallkonstruktsioonide ja -seadmete jaoks soodsad. Seadmete transportimisel, ladudes, aga ka allveelaevades, kasutatakse laialdaselt õhu kuivatamist silikageeliga – amorfse, niiskust aktiivselt imava ränihappega.

1.2.2. Plastide korrosioon

Keskkonna mõju plastidele on eelkõige polümeeride osaline või täielik keemilistest muutustest tingitud lagunemine, mida soodustavad keskkonnamõjurid ja mis on analoogne metallide korrosiooniga.

Polümeeride lagunemist mõjutavad kuumutustemperatuur, mehaanilised pinged, osoon ja kiirgus. Esimesed kaks on tavamõjurid, mida tuleb silmas pidada polümeeride termomehaanilisel töötlemisel. Kuumutamisel kiirendab kõrgem temperatuur oksüdatiivset degradatsiooni. Mehaanilistest pingetest on arvestatavad nii polümeeride töötlemisest jäänud sisepinged kui ka rakendatavast välisjõust tingitud pinged.

Kiirgusest tulenevast mõjust on oluline valguse, eelkõige selle lühilainelise osa mõju, mitte niivõrd ultraviolettkiirgus, mille toime vastu kaitstakse materjale sobivate UV-filtrite lisamisega plasti.

1.3. MEHAANILISED OMADUSED

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

Tugevus (*strength*) on materjali võime purunemata taluda koormust, ebahütlast temperatuuri vm. Metallide tugevusnäitajateks on tõmbetugevus, survetugevus, voolepiir tõmbel, voolepiir survele jm. Eristatakse eritugevust, konstruktsiooni-tugevust, väsimustugevust, roometugevust jm.

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

Elastsus (*elasticity*) on materjali (keha) võime taastada oma kuju ja ruumala (tahkised) või ainult ruumala (vedelikud, gaasid) pärast deformatsiooni esilekutsunud jõudude eemaldamist.

Sitkus (*toughness, ductility*) on materjali võime purunemata taluda dünaamilist koormust. Metallide sitkusnäitajaiks on löökteimil määratav purustustöö, aga ka eriteimiga määratav purunemissitkus.

Haprus (*brittleness*) on materjali omadus puruneda tühise deformatsiooni korral.

Kõvadus (*hardness*) on materjali võime vastu panna kohalikule plastsele deformatsioonile.

Olenevalt tööolukorrast (koormamise viisidest) eristatakse staatilisel, dünaamilisel ja tsüklilisel koormamisel määratavaid mehaanilisi omadusi.

1.3.1. Staatilisel koormamisel määratavad omadused

Põhilised staatilise katsetamise moodused on tõmbeteim, surveteim, paindeteim ja väändeteim kui ka põhilised kõvaduskatsed. Metallide puhul kasutatakse painde- ja väändeteimi harva, mistõttu metallide valiku ja tugevusarvutuste aluseks on eelkõige tõmbeteimil määratavad mehaanilised omadused.

Tõmbeteim

Staatilise **tõmbeteimiga** (*tensile test*) määratakse metallide korral järgmised tugevusnäitajad:

- voolepiir,
- tõmbetugevus.

Tugevusnäitajad antakse pingehükkides. Tavaliselt antakse tugevusnäitajad N/mm², ka MPa (varem oli kasutusel kgf/mm²; $1 \text{ kgf/mm}^2 = 9,8 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 \approx 10 \text{ N/mm}^2$).

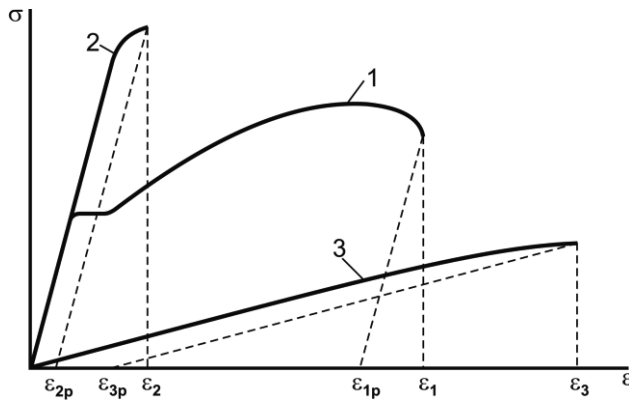
Tugevusnäitajate kõrval määratakse tõmbeteimiga ka materjali plastsusnäitajad, mis antakse suhtelise deformatsioonina purunemise hetkel:

- katkevenivus, s.o suhteline pikenemine pärast katkemist,
- katkeahenemine, s.o suhteline ahenemine pärast katkemist.

Tõmbeteimiga määratavad materjali põhilised mehaanilised omadused esitatakse teimi alusel koostatud toimiva jõu ja pikenemise või pinge ja deformatsiooni vahelise diagrammi – tõmbediagrammi najal. Joonisel 1.2 on metallide tüüpilised tõmbediagrammid koordinaadistikus pinge-deformatsioon erinevate materjalide korral.

Deformatsioonid ε_1 , ε_2 ja ε_3 vastavad kogudeformatsioonidele; ε_{1p} , ε_{2p} ja ε_{3p} – plastsetele (jäävatele) deformatsioonidele.

Tõmbediagrammi lõigus 01 (Joonis 1.3b) kehtib proportsionaalne seos jõu (pinge) ja pikenemise (deformatsiooni) vahel, s.t tegemist on elastse deformatsiooniga. Koormus üle proportsionaalsuspiiri kutsub esile teimiku jääva pikenemise. Plastsete metallide (puhas raud, vask) tõmbediagrammil esineb vooleplatvorm (Joonis 1.3a), millest järeldub, et metall voolab ilma jõudu suurendamata. Pinget, mis vastab voolejõule, nimetatakse **voolepiiriks** (*yield limit, proof strength*) σ_y .



Joonis 1.2. Metallide tüüpilised tõmbediagrammid: 1 – plastne materjal, 2 – habras materjal, 3 – kõrgelastne materjal (võrdluseks näiteks elastomeer)

Enamiku sulamite tõmbediagrammil (Joonis 1.3b) vooleplatvorm puudub, mistõttu voolepiiri asemel kasutatakse **tinglikku voolepiiri** (*offset yield limit, proof strength at 0,2 % elongation*) $\sigma_{0,2}$. Tinglik voolepiir $\sigma_{0,2}$ määratakse jääva deformatsiooni $\varepsilon = 0,2\%$ juures, s.o jõu $F_{0,2}$ juures, mis kutsub esile teimiku jääva pikenemise $0,2\%$.

Tõmbetugevus (*ultimate tensile strength, tensile strength limit*) σ_u on maksimaalsele jõule F_{\max} vastav pinge (Joonis 1.3a ja b).

Haprad materjalid purunevad pärast tõmbetugevuse saavutamist. Plastsete materjalide korral koondub voolepiirist alates deformatsioon ühte lõiku: teimikul moodustub kael (ristlõike pindala väheneb).

Katkevenivuseks (*percentage elongation*) δ nimetatakse purunenud teimikul mõõdetud jääkpikenemist protsentides.

Katkeahenemine (*percentage reduction of area*) ψ väljendab tõmbeteimil teimikul moodustunud kaela ristlõikepindala vähenemist algpindala suhtes.

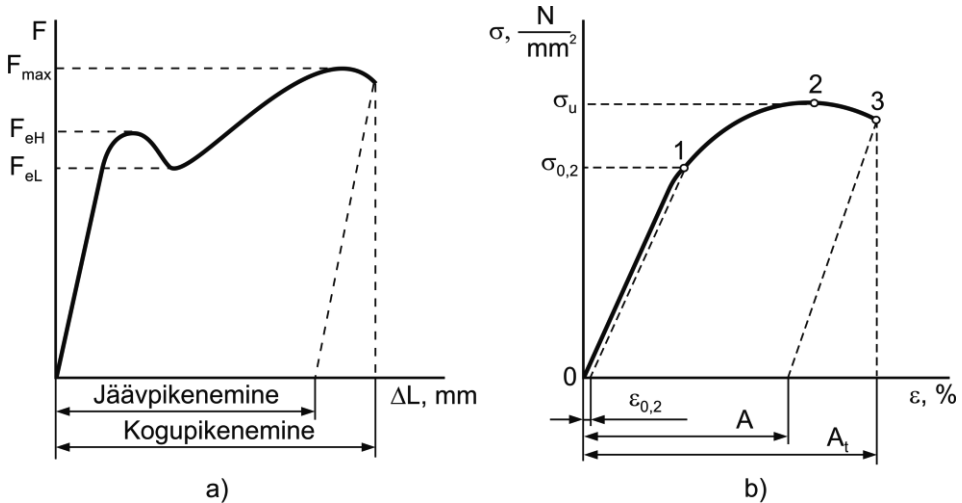
Mida suuremad on δ ja ψ , seda plastsem on materjal.

Eesti standardi EVS EN 10002-1 **Metallmaterjalid. Tõmbeteim** kohaselt määratakse tõmbeteimiga järgmised tugevusomadused:

- voolepiir (ülemine R_{eH} ja alumine voolepiir R_{eL} – jõududele F_{eH} ja F_{eL} vastavad pinged (Joonis 1.3a) või tinglik voolepiir $R_{p0,2}$

$$R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0} \quad (1.5)$$

$$R_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_0} \quad (1.6)$$



Joonis 1.3. Tõmbediagrammid: a – vooleplatvormiga tõmbediagramm koordinaadistikus jõud-pikenemine; b – vooleplatvormita tõmbediagramm koordinaadistikus pinge-deformatsioon

$$R_{p0,2} = \frac{F_{0,2}}{S_0} \quad (1.7)$$

- tõmbetugevus R_m (maksimaalsele jõule vastav)

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0}, \quad (1.8)$$

kus F_{max} – maksimaalne jõud,

F_{eH} ja F_{eL} – vooleplatvormi suurim (ülemine) ja vähim (alumine) jõud,

$F_{0,2}$ – teimiku 0,2 % pikenemisele vastav jõud,

S_0 – teimiku esialgne ristlõikepindala.

Teimikute kuju ja mõõtmed on määratud sama standardiga.

Peale tugevusnäitajate määratakse kooskõlas tõmbeteimi standardiga järgmised plastsusnäitajad:

– katkevenivus A

$$A = \left(\frac{L_u - L_0}{L_0} \right) \cdot 100\%, \quad (1.9)$$

kus L_0 – teimiku tööosa algmõõtepikkus mm,

L_u – teimiku tööosa pikkus pärast katkemist ehk lõppmõõtepikkus mm,

$L_u - L_0$ – mõõtepikkuse tööosa jäävpikenemine pärast teimiku purunemist mm.

(Proportsionaalsetel teimikutel, mille algmõõtepikkus L_0 erineb suuruselt $5,65 \sqrt{S_0}$, tuleb katkevenivuse tähisele A lisada arv, mis näitab kasutatud võrdetegurit, näiteks $A_{11,3}$ on katkevenivus teimikul, mille algmõõtepikkus L_0 on $11,3 \sqrt{S_0}$; mitteproportsionaalsete teimikute puhul tuleb tähisele lisada arv, mis näitab algmõõtepikkust mm, näiteks A_{80} on katkevenivus algmõõtepikkusel $L_0 = 80$ mm);

– katkeahenemine Z

$$Z = \left(\frac{S_0 - S_u}{S_0} \right) \cdot 100\%, \quad (1.10)$$

kus S_0 – teimiku tööosa ristlõike algpindala,

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

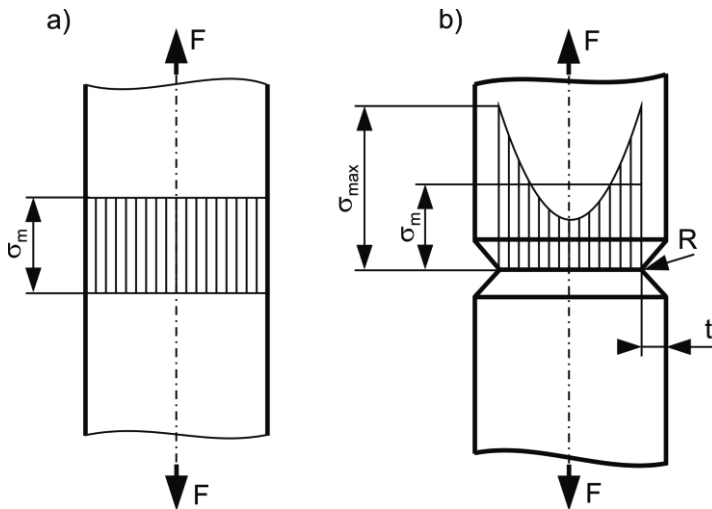
Staatilise koormamisega määratakse tavaliselt siledate teimikute mehaanilisi omadusi. Tegelikult on detailid soonelised, astmelised, avadega, keermetega jne, mis avaldab olulist mõju reaalsele omadustele, eriti plastsusnäitajatele. Seetõttu pole alati võimalik sileda teimiku tõmbeteimi andmeid üle kanda konkreetsele detailile, mil pole ühtlane ristlõige. Detailides esinevad **pingekontsentratsioonid** (*stress concentrators*) muudavad metallis pingelukorda ja tekitavad pingete kontsentratsiooni.

Joonisel 1.4 on pingepüürid sileda ja pingekontsentratsiooniga teimiku korral.

Pingekontsentratsiooniga teimiku katkemismomendi maksimaalse pinget σ_{max} arvutamiseks kasutatakse valemit

$$\sigma_{max} = 2 \sigma_m \sqrt{\frac{t}{R}}, \quad (1.11)$$

kus σ_m – keskmine pinge,
 R – ümardusraadius,
 t – sisselõike sügavus.



Joonis 1.4. Pingeepüürid sileda (a) ja pingekontsentraatoriga (b) teimiku korral

Eritugevus (*specific strength*) on materjali tugevusnäitaja, tavaliselt materjali tõmbe-
tugevuse või voolepiiri suhe materjali tihedusse (ka tugevuse ja massi suhe),
 N/mm^2 -le jagatud g/cm^3 -le (vt ka ptk 7, Tabel 7.3).

Materjali **konstruktsioonitugevus** (*structural strength*) on tugevusomaduste
kompleks, mis kõige enam vastab detaili talitluslikele omadustele. Siledade teimikute
peal määratud tugevus- ja plastusnäitajd on väga tähtsad (nad lähevad arvutus-
valemitesse), kuid paljudel juhtudel ei iseloomusta nad materjali tugevust konkreetses
olukorras. Deformatsioonitingimused siledade teimikute mehaanilisel katsetamisel
erinevad deformatsioonitingimustest tööolukorras.

Eriti ohtlik on materjalide habras purunemine. Üldjuhul algab see märkamatuult
pingetel, mis on tunduvalt madalamad tugevuspiirist σ_u ning voolepiirist σ_y , kulgeb
suure kiirusega ja on paljude avariide põhjuseks. Seetõttu on materjali vastupanu
haprale purunemisele üks tähtsamaid konstruktsiooni töökindluse näitajaid. Materjali
üleminek plastsest olekust haprasse oleneb arvukatest mõjuritest: olulised on sulami
koostis ja struktuur (kristallivõre tüüp, keemiline koostis, tera suurus, lisandid jm);
konstruktsiooni iseärasused ja töötingimused (pingekontsentraatorid, töötemperatuur
jt). Seepärast võivad konstruktsioonitugevuse kriteeriumideks olla σ_u ja $\sigma_{0,2}$ ainult
lihtsa kujuga detailide korral, mis on ette nähtud tööks staatilisel koormusel ja
toatemperatuuril.

Staatiliste koormuste korral on üheks konstruktsioonelementide arvutusmeetodiks tugevuse hindamine nn lubatavate pingete meetodil. Selle arvutusmeetodi põhimõtteks on konstruktsiooni töötamine elastsete deformatsioonide piirkonnas. Plastsetel materjalidel on lubatav pinge tugevusvaru (varutegur) korda väiksem, kui selle materjali voolepiir σ_y . Tavaliselt võetakse varuteguriks 1,3...15 olenevalt koormuse viisist. Detaili lubatava minimaalse ristlõikepinna saame

$$S_{\min} = \frac{F}{[\sigma]}, \quad (1.12)$$

kus S_{\min} – konstruktsioonelemendi minimaalne ristlõikepindala,

F – konstruktsioonelemendile mõjuv jõud,

$[\sigma]$ – lubatav pinge (plastsetel materjalidel $[\sigma] < \sigma_y$).

Habrastel materjalidel on lubatav pinge varuteguri korda väiksem tugevuspiirist (σ_u). Kui detailile mõjuvad surve- või väändejõud, võetakse detailide tugevusarvutustes aluseks plastsetel materjalidel voolepiir surve- või väändel ja habrastel materjalidel surve- või väändetugevus. Kui detailile mõjub tsükliline koormus, võetakse tugevusarvutustes aluseks väsimuspiir.

Purunemissitkus

Praoga detaili väsimust esineb paljudes konstruktsioonides (sh keeviskonstruktsioonides), milles on pragusid. Püsival koormusel prao arenedes ning töötava ristlõike vähenedes pingete intensiivsus kasvab. **Purunemissitkus** (*fracture toughness*) on materjali omadus, mis iseloomustab materjali vastupanu prao arenemisele. Selle näitajaks on **pingeintensiivsusfaktor** (*stress intensity factor*) K , mis arvutatakse valemiga

$$K = \sigma_m \sqrt{\pi a}, \quad (1.13)$$

kus σ_m – keskmine pinge,

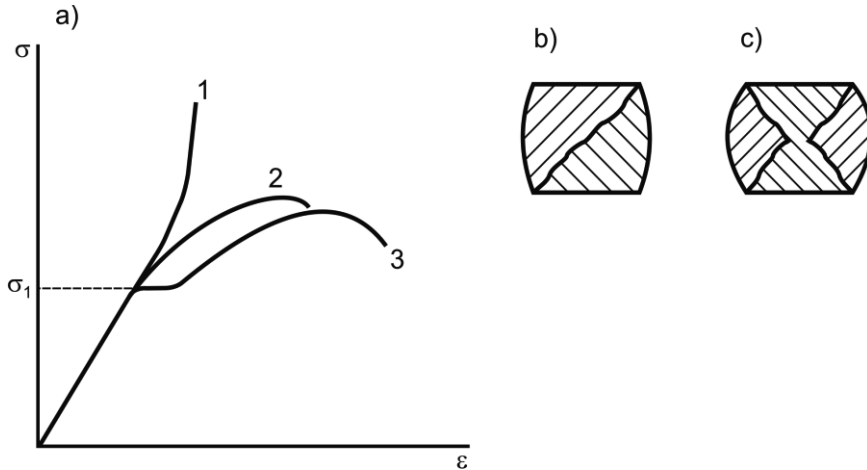
a – prao pikkus.

Sagedamini kasutatakse tõmbeteimiga määratavat purunemissitkuse näitajat (tähis K_{1C}). Ühikuks on $N/mm^2 \cdot m^{1/2}$.

Surveteim

Surveteimiga (*compression test*) määratakse metallide samad mehaanilised omadused nagu tõmbeteimi puhul. Survejõudude korral on tegemist pehmema koormamisviisiga valdavate tangentsiaal- ehk nihkepingete tõttu. Seetõttu paljud metallid (eelkõige plastsed) survejõudude toimel ei purune, vaid neist valmistatud teimikud lähevad laiaiks (jämenevad). Mida laiemaks on läinud teimik, seda suuremat jõudu tuleb rakendada selle edasiseks deformeerimiseks. Tõmbejõudude korral tekib plastsetel materjalidel teimiku ahenemine – moodustub kael – ja selle tulemusena väheneb tõmbejõud.

Survejõudude korral teimik jämeneb (muutub tünnikujuliseks) ja edasisel deformeerimisel jõud pidevalt kasvab. Plastsete materjalide pinge ja suhtelise deformatsiooni vahelist seost iseloomustavad vastavad diagrammid (Joonis 1.5).



Joonis 1.5. Pinge ja suhtelise deformatsiooni vaheline seos (a): 1 – plastse materjali survekõver; 2, 3 – tõmbekõverad; teimiku purunemise iseloom survel malmi (b) ja karastatud terase (c) korral

Tõmbe- ja survejõudude korral käituvad materjalid kuni plastse deformatsiooni alguseni samamoodi (Joonis 1.5, pinge σ_1). Seega on plastsetel materjalidel voolepiir survel (σ_y^c) võrdne voolepiiriga tõmbel (σ_y).

Kuna plastsed materjalid käituvad kuni plastse deformatsiooni alguseni ühtemoodi tõmbe- ja survejõudude toimel, kasutatakse plastsetest materjalidest detailidele mõjuvate survejõudude puhul konstruktsioonidetailide arvutamisel tõmbeteimil saadud näitajaid – voolepiiri või tinglikku voolepiiri.

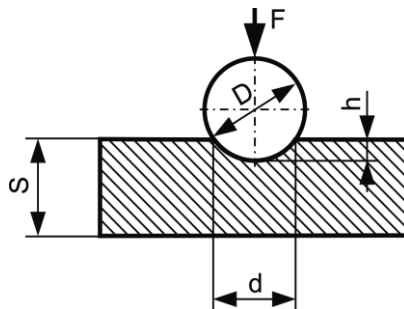
Hapraid materjale (kõrgtugevad terased, tööriistaterased, hallmalmid, ehitusmaterjalid: betoon, keraamika, klaas) kasutatakse eelkõige seal, kus mõjuvad põhiliselt survejõud ja seetõttu katsetatakse hapraid materjale surveteimil. Kui survejõudude toimel habras materjal puruneb, siis surveteimil saadud materjali tugevuspiir (σ_u^c) on üldiselt palju suurem sama materjali tugevuspiirist tõmbel (σ_u).

Kõvaduskatse

Kõvaduskatse (*hardness test*) põhineb materjali võimel vastu panna kohalikule plastsele deformatsioonile, kui tema pinda tungib suurema kõvadusega keha – indentor. Kõvadust määratakse tekkiva jälje järgi indentori tungimisel materjali pinnasse. Väheformeeruvast materjalist (teemant, kõvasulam, karastatud teras) indentoril on kuuli, koonuse või püramiidi kuju. Kõvadust mõõdetakse indenteerimise

teel (nn indenteerimiskõvadus). Indenteerimisel rakendatakse küllaltki suurt koormust, mille tagajärjel deformeerub plastselt materjali pind. Pärast koormuse kõrvaldamist jääb materjalisse jälg. Mida pehmem on materjal, seda sügavam (suurem) on jälg.

Brinelli kõvadus (*Brinell hardness*). Kõvaduse määramisel Brinelli meetodiga surutakse uuritava materjali pinda teras- või kõvasulamkuul (Joonis 1.6), kuuli läbimõõt D on 1 kuni 10 mm, jõud on 9,8...29 420 N (1...3 000 kgf). Brinelli kõvadus määratakse kuulile toimiva jõu ja tekkiva sfäärilise jälje pindala suhtena.



Joonis 1.6. Kõvaduse määramise skeem Brinelli meetodil

Brinelli kõvadus

$$HBW = const \cdot \frac{F}{A} = 0,102 \cdot \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1.14)$$

kus F – jõud N,

A – jälje pindala mm^2 ,

D – kuuli (W – kõvasulamkuul, S – teraskuul) läbimõõt mm,

d – jälje läbimõõt mm.

Brinelli kõvaduse tähistus: kõvaduse väärtusele järgneb tähis HBW, selle järel aga katsetingimused (kuuli läbimõõt, koormus ja koormamise kestus) näiteks 185 HBW 5/750/20, s.o Brinelli kõvadusarv, mis on määratud kõvasulamkuuliga $D = 5$ mm koormusel 7355 kN (750 kgf) 20 s kestel.

Nagu nähtub valemitest, oleneb kõvadus jõust F , kuuli läbimõõdust D ja jälje läbimõõdust d . Viimast mõõdetakse erimikroskoobi (eriluubi) abil. Jälje läbimõõt d määratakse kahes ristsuunas täpsusega 0,05 (0,1) mm. Arvutatakse keskmine. On koostatud tabel, mille põhjal jälje läbimõõdu järgi saadakse vahetult kõvaduse HBW väärtus.

Rockwelli kõvadus (*Rockwell hardness*). Rockwelli meetodiga määratakse materjali kõvadus indentori – kõvasulam/teraskuuli läbimõõd 1/16" (ca 1,6 mm) või 1/8" (ca 3,2 mm) või teemantkoonuse (tipunurk on 120°) materjali sissesurumise teel.

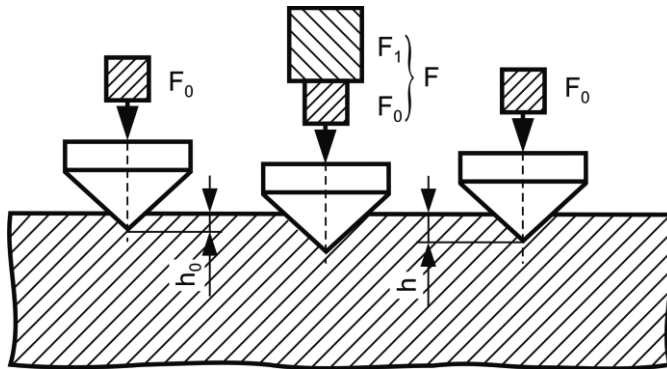
Katsetamisel surutakse indentor materjalisse eeljõuga $F_0 = 98 \text{ N}$ (10 kgf) või 29,4 N (3 kgf) ja fikseeritakse asend. Seejärel surutakse indentor materjalisse lisa-jõuga $F_1 = 1373...117,7 \text{ N}$ (140..12 kgf), kogujõud F vastavalt 1471...147,1 N (150...15 kgf) ja taastatakse esialgne survejõud F_0 . Rockwelli kõvadust iseloomustab kuuli või koonuse materjalisse tungimise sügavus (Joonis 1.7) ja Rockwelli kõvadus arvutatakse valemiga

$$HR = N - \frac{h}{S}, \quad (1.15)$$

kus h – indentori sissetungimise sügavus,

N – skaalale omane konstant (põhiskaalade A ja C korral $N = 100$, B skaala korral $N = 130$),

S – skaalajaotis.



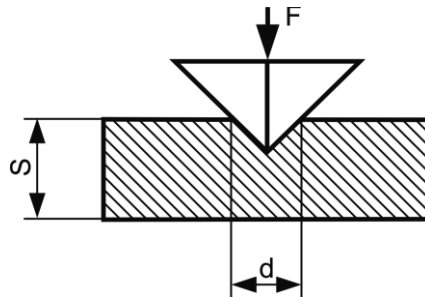
Joonis 1.7. Kõvaduse määramise skeem Rockwelli meetodil

Koonusindentori korral – skaalad A (jõud 588 N ehk 60 kgf) ja C (jõud 1471 N ehk 150 kgf) märgitakse kõvaduse väärtus tähttähise ees, näiteks 59 HRC, s.o Rockwelli kõvadus, mis määratud C skaala järgi. Skaala B (jõud 980 N ehk 100 kgf) korral tähistatakse kõvaduse väärtus tähttähise ees, mis sisaldab ka kasutatava kuuli materjali tähist (S – teraskuul, W – kõvasulamkuul), näiteks 60 HRBW, s.o Rockwelli kõvadus arv, mis on määratud B skaala järgi kõvasulamkuuliga. Rockwelli pinnakõvaduse määramisel (skaala N) on kõvadusarv tähttähise HR15N, HR30N või HR45N ees, näiteks 70 HR30N, s.o Rockwelli pinnakõvadus, mis on määratud N skaala järgi kogujõul 294,2 N (30 kgf).

Mittemetalsete materjalide korral kasutatakse ka teisi skaalasid (D, E, F, G, H, K).

Vickersi kõvadus (*Vickers hardness*). Vickersi meetod põhineb teemantpüramiidi surumisel uuritavasse materjalis. Meetod võimaldab määrata nii pehmete kui ka väga kõvade materjalide kõvadust ning sobib õhukeste pinnete kõvaduse määramiseks.

Materjalisse surutakse neljatahuline püramiid (Joonis 1.8), tahkudevaheline tipunurk 136° , jõud 4,9...980 N (5...100 kgf), mikrokõvaduse korral 0,098...1,96 N (0,001...0,2 kgf).



Joonis 1.8. Kõvaduse määramise skeem Vickersi meetodil

Kooskõlas standardiga ISO 6507-1 ja olenevalt rakendatavast jõust eristatakse kolme kõvaduse vahemikku (Tabel 1.5).

Tabel 1.5. Vickersi kõvaduse määrang

Jõud F , N	Kõvaduse tähis	Määrang
$F \geq 49$ N	HV5...HV100	Vickersi kõvadus
$1,96 \leq F < 49$	HV0,2...HV5	Väikejõuga Vickersi kõvadus
$0,098 \leq F \leq 1,96$	HV0,001...HV0,2	Vickersi mikrokõvadus

Vickersi kõvadus arvutatakse valemiga

$$HV = \frac{F}{A} = \frac{2F}{d^2} \sin \frac{\alpha}{2} = 0,1981 \frac{F}{d^2}, \quad (1.16)$$

kus F – jõud N,

A – jälje pindala mm^2 ,

α – püramiidi tahkudevaheline nurk 136° ,

d – jälje diagonaal mm.

Vickersi kõvadust tähistatakse $F = 294,2$ N (30 kgf) ja koormuse kestuse 10...15 s korral näiteks 500 HV30. Teistsugustel kestustel märgitakse peale kõvaduse tähist

koormamise kestus, näiteks 220 HV10/20, s.o Vickersi kõvadusarv 220, mis on määratud koormusel $F = 98 \text{ N}$ (10 kgf) ja kestusel 20 s.

Jälje diagonaal mõõdetakse optilise mikroskoobiga.

Seos kõvaduse ja tõmbetugevuse vahel

Metalsete materjalide, eelkõige teraste korral on kindel seos kõvaduse ja tõmbetugevuse vahel. Madalsüsinikeraste ja madallegeerteraste korral kehtib Brinelli kõvadusarvu ja tõmbetugevuse vahel ligikaudne seos

$$HB = 0,3\sigma_u \quad (1.17)$$

Eespool esitatut silmas pidades on võimalik odava ja kiire kõvaduskatse põhjal hinnata orienteeruvalt terase tõmbetugevust. Teistel metalsetel materjalidel on see seos erinev ja oleneb väga mitmetest asjaoludest.

1.3.2. Dünaamilisel koormamisel määratavad omadused

Dünaamilisel koormamisel muutub jõud (koormus) suure kiirusega (löögiga), kusjuures põhiline katsetamise moodus on löökpaindeteim. Nimetatud meetodil määratakse materjalide töökindlust iseloomustavad omadused dünaamilisel koormusel.

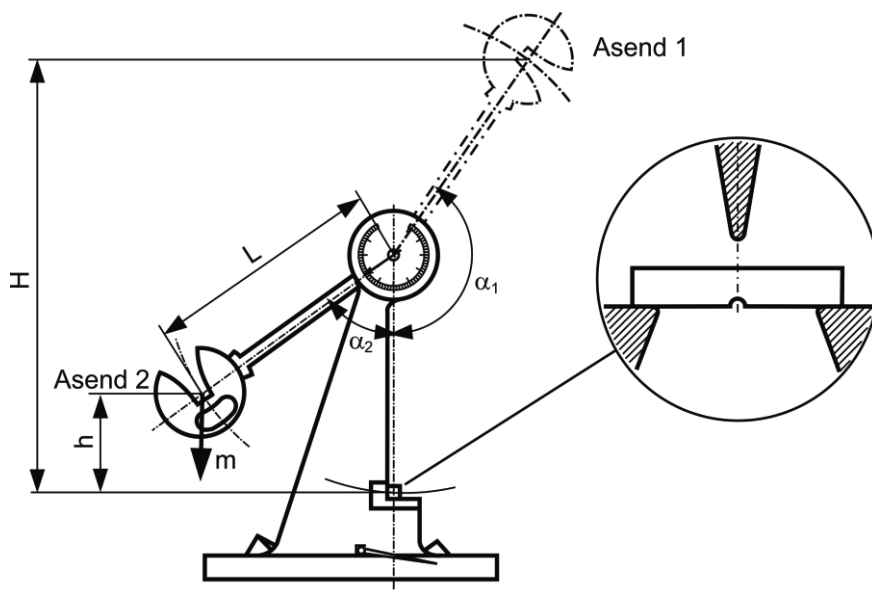
Charpy löökpaindeteim

Charpy löökpaindeteim (*Charpy impact test*) on materjali sitkuse määramise põhimooduseid, mille järgi hinnatakse, kas materjalil on kalduvust haprale puru nemisele. Löökpaindeteim seisneb sisselõikega teimiku purustamises pendellöömikuga ja purustustöö määramises. Teimiku purustamiseks kulutatud töö võrdub pendli massiga m potentsiaalsete energiatega vahel asendis 1 ja 2 (Joonis 1.9).

Eesti standard EVS-EN10045-1 **Metallmaterjalid. Löökpaindeteim Charpy meetodil** näeb ette kahe soone tüübiga teimikud:

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

Määratakse teimiku purustustöö KU või KV J vastavalt U-soonega või V-soonega teimiku puhul. Nii näiteks $KV = 121 \text{ J}$ tähendab standardse V-soonega teimiku purustustööd pendli nominaalse löögienergia 300 J korral. Teistsuguse löögienergiaga pendellöömiku korral lisatakse tähisele KU või KV pendli löögienergiat näitav arv, standardsest erineva (kitsama) V-soonega katsekeha teimimisel ka teimiku laius, näiteks $KV 150/7,5 = 83 \text{ J}$ tähendab purustustööd pendli nominaalse löögienergiaga 150 J ja vähendatud ristlõikega teimiku laiusega 7,5 mm korral.



Joonis 1.9. Pendellöömiku skeem Charpy löökpaindeteimil

Kasutatakse ka teisi löökpaindeteime, näiteks **Izod' löökpaindeteimi** (*Izod impact test*), mis seisneb konsoolselt vertikaalselt kinnitatud sisselõikega teimiku purustamises pendellöömikuga ja purustustöö määramises nagu Charpy löökpaindeteimi korral.

Külmahaprus

Purustustöö KU või KV pole materjali jääv suurus, vaid oleneb suuresti materjali struktuurist, teimitemperatuurist, pingekontsentratsioonidest, detaili mõõtmetest jm. Enim mõjub materjali struktuur – näiteks mida peeneteralisem on terase struktuur, seda sitkem on teras ja seda suurem purustustöö. Sama oluline on ka materjali katsetus/töötemperatuur.

Kui materjal peab töötama madalatel temperatuuridel, siis katsetatakse seda samuti madalatel temperatuuridel, sest mõne materjali sitkus väheneb järsult temperatuuri langedes. Materjali hapruse suurenemist (löögisitkuse vähenemist) madalatel temperatuuridel nimetatakse külmahaprumiseks ja omadust **külmahaprus**eks (*cold brittleness, cold embrittlement*).

Enamik konstruktsioonimaterjale (terased) kalduvad temperatuuri langedes haprale purunemisele. Nii on plastses olekus teraste purustustöö $KU > 27$ J, hapras olekus (s.o madalatel temperatuuridel) $KU < 27$ J. Purustustöö KU piirväärtusteks võetakse tavaliselt 27, 40 või 60 J temperatuuridel $+20\dots-60$ °C.

1.3.3. Tsüklilisel koormamisel määratavad omadused

Väsimus

Tegelikkuses esinevad sagedamini vahelduvad (tsüklilised) koormused, mille tagajärjel tekivad detailis märkimuutvad pinged (surve-tõmbepinged), mis on pragude põhjuseks. Tsüklilisel koormusel tekib ja areneb pragu ka pingetel, mis on allpool materjali tugevuspääri σ_u , sageli isegi allpool voolepääri σ_y . Seda protsessi, mis lõpeb purunemisega, nimetatakse **väsimuseks** (*fatigue*).

Eristatakse praoga ja praota detaili väsimust. Viimasel juhul tehakse vahet palju-tsüklilise (pingetel alla voolepääri) ja vähetsüklilise (pingetel üle voolepääri) väsimuse vahel.

Metallide **väsimus** on reglementeeritud tõmbe-surve, painde ja väände korral, sümmeetriliste pingetsüklite ja deformatsioonide korral, pingekontsentratsioonide puudumise ja olemasolu korral, palju- ja vähetsüklilise väsimuse korral.

Tsüklilist koormust iseloomustavad järgmised suurused (Joonis 1.10):

- maksimaalne pinge σ_{max} ,
- minimaalne pinge σ_{min} ,
- keskmine pinge σ_m .

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}, \quad (1.18)$$

- pingeamplituud σ_a

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}, \quad (1.19)$$

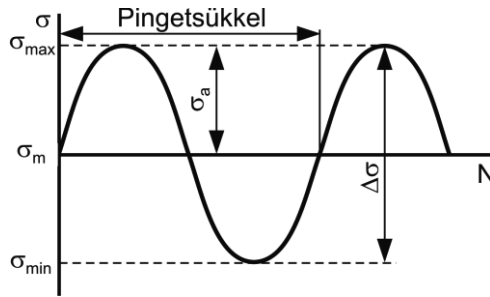
- koormuse asümmeetriategur R (sümmeetrilise koormuse korral $R = -1$),

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}, \quad (1.20)$$

- pingediapasoon $\Delta\sigma$ (võrdub $2\sigma_a$)

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}. \quad (1.21)$$

Väsimustugevust iseloomustab **väsimuspääri** (*fatigue limit, fatigue strength*) σ_R , sümmeetrilise koormuse korral σ_{-1} . Väsimuspääri σ_{-1} on suurim pinge, mida metall purunemata talub N korda (terastel võetakse tsüklite arvuks 10^7 , mitterauasulamitel 10^8).

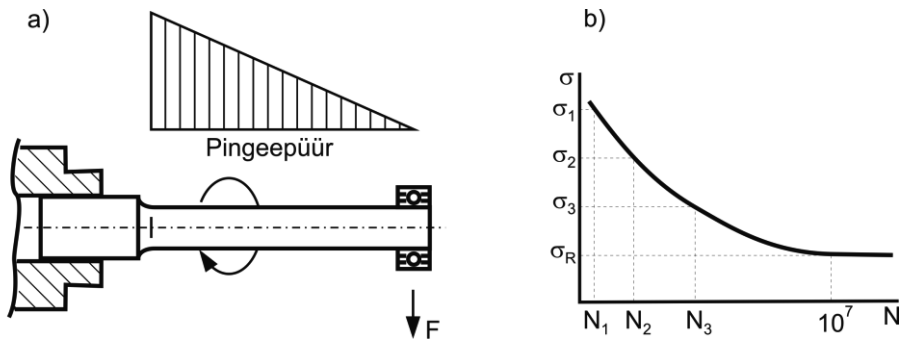


Joonis 1.10. Väsimusteimi pingetsükkel

Väsimusteim

Väsimusteimi (*fatigue test*) tehakse erimasinatega: tõmbel-survel vastava tõmbemasinaga, paindel vastava väsitusmasinaga, kus pöörlevat teimikut koormatakse korduva paindekoormusega (Joonis 1.11a, teimik kinnitatakse masinasse ühest või mõlemast otsast), või väändel vastava väändemasinaga.

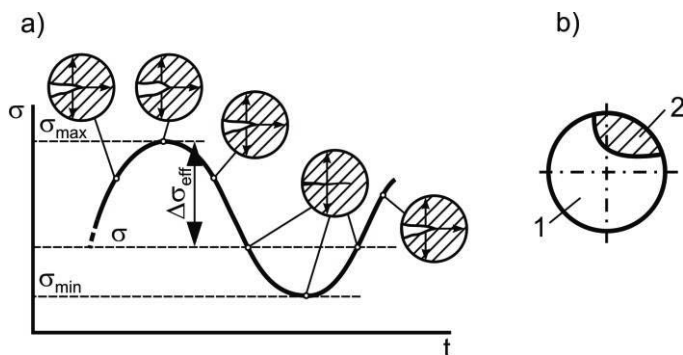
Erinevate pingetega ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) teimikute korral määratakse tsüklite arv (N_1, N_2, N_3) kuni purunemiseni. Saadud katsetulemuste põhjal konstrueeritakse väsimuskõver (Joonis 1.11b) ja määratakse väsimuspiir σ_R – puutuja väsimuskõverale.



Joonis 1.11. Väsimusteimi skeem pöörleva painde korral (a) ja madalsüsinikerase väsimuskõver b)

Metalli väsimuse põhjuseks on pingete kontsentratsioon kohtades, kus detailis on astmed, sooned, keermed jms ning materjalis mitmesugused defektid (tühikud, poorid, mikropraod).

Väsimuspurunemise murdepinnal on iseloomulik reljeef – kaks teravalt piiritletud ala: väsimuspurunemiseala 1, mille pind on plastselt deformeerunud ja sile, ning staatilise ehk lõpp-purunemise ala 2 (Joonis 1.12b), mis on kristalne või kiuline.



Joonis 1.12. Väsimusprao areng – avanemine-sulgumine koormuse vaheldumisel (a) ja teimiku väsimusmurdepind (b): 1 – väsimuspurunemise ala; 2 – staatilise purunemise ala

Mitteleeger- ja madalleegerteraste korral normaliseeritud olekus kehtib pöördpaindel väsimuspiiri ja tõmbetugevuse vahel ligikaudne seos $\sigma_{-1} = 0,5 \sigma_u$ (vt ka ptk 7, Tabel 7.5).

1.3.4. Kulumine

Kulumine (*wear*) on protsess, mis toimub masinate pindade hõõrdumisel, mille tagajärjel pinnalt eraldub materjali ja (või) suureneb ka keha jääkdeformatsioon. Seega muutuvad kulumisel pidevalt detailide mõõtmed, avarduvad lõtkud, suureneb detailide viskumine ja müra, tekib kloppimine ning masinat ei ole võimalik enam kasutada.

Kulumine on keerukas füüsikalis-keemiline protsess, millele lisandub tihti korrosioon. Reaalsed pinnad on keerulise reljeefiga, mida iseloomustab karedus ja lainelisus. Karedate kehade hõõrdumisel on kontakt diskreetne, tekivad üksikud friktsioonsidemed, mis määravad kulumise. Kulumine võib olla mitmesuguste protsesside tulemus, nimetagem hõõrdeväsimust, habrast ja sitket purunemist, mikrolõikamist, oksiidikile purunemist, materjali väljarebimist jne.

Kontakteeruvate kehade suhtelisel liikumisel teineteise suhtes tekib hõõrdejõud F_H , mis takistab liikumist. Hõõrdejõud F_H on seotud mõjuva normaaljõu F_N ja materjali **hõõrdeteguriga** (*coefficient of friction, CoF*) μ (vt Joonis 1.13 a)

$$F_H = F_N \cdot \mu, \quad (1.22)$$

kus F_N – kontaktpinnale mõjuva välisjõu normaalkomponent,
 μ – hõõrdetegur (hõõrdejõu ja normaaljõu suhe, ühikuta suurus).

Tabelis 1.6 on esitatud mõningate hõõrdepaaride hõõrdetegurid kuivhõõrde tingimustes.

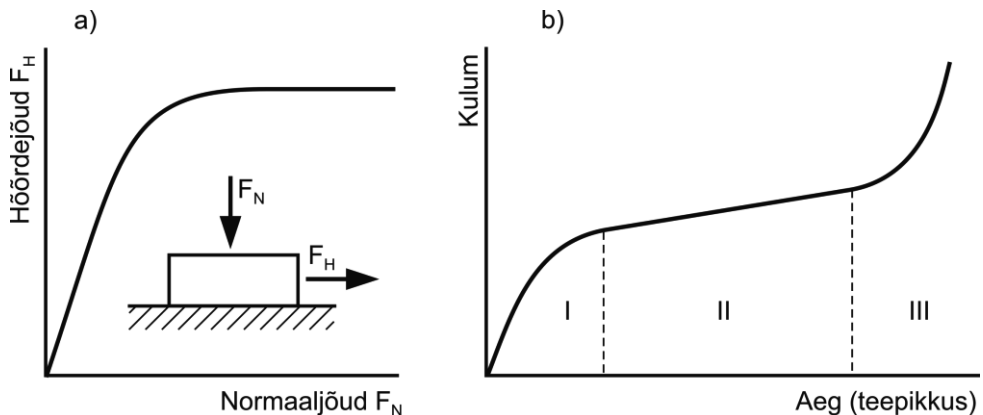
Tabel 1.6. Mõningate hõrddepaaride liughõrdetegurid (kuivhõdre)

Materjalipaar	Hõrdetegur μ
Teras/teras	0,15
Teras/malm	0,18
Teras/pronks	0,10
Teras/polüamiid	0,30
Teras/fluorplast	0,04
Teras/hõrdematerjal (piduriklotsid)	0,55
Teras/puit	0,35

Mida väiksem on hõrdetegur, seda vähem energiat kulub hõrdumise ületamiseks, seda väiksem on kulumine.

Tavaliselt on hõrduvad pinnad kaetud õhukese oksiidikihiga, mis eraldab kokku puutuvad kehad. Sügavas vaakumis, kus oksiidikile tekkimine on raskendatud, on puhastatud metallpindade vahel hõrdetegur 1...10, õhus ei ületa hõrdetegur 0,5...1. Kulumise mehhanism ja intensiivsus olenevad hõrddepaari materjalide omadustest, kontakteerumise tingimustest (libisemine, veeremine, normaaljõud F_N , liikumise kiirus v) ja keskkonna füüsikalise-keemilisest toimest.

Püsivatel hõrdetingimustel eristatakse kolme kulumise järku (Joonis 1.13b): 1 – sissetöötamine ehk kohandumine, mil toimub intensiivne kulumine; 2 – statsionaarne kulumine, mil kulumise intensiivsus on minimaalne antud hõrdetingimustes; 3 – progresseeruv ehk katastroofiline kulumine.



Joonis 1.13. Jõud liughõrdel (a) ja kulumise olenevus ajast (teepikkusest) (b)

Sissetöötamisel muutub pinna mikromeetria, materjal kalestub, saavutatakse elastne vastastikune mõju kokkupuutuvates kohtades ja tasakaaluline karedus, mis nendes töötingimustes pidevalt uueneb.

Eristatakse määrdega ja määrdeta hõõrdumist. Määrdeaine viiakse hõõrdepinnale, et vähendada hõõrdejõudu ja (või) kulumise intensiivsust. Määrdeta hõõrdumine esineb hõõrdeülekannetes, piduripaarides, kus määret pole lubatud kasutada. Piirhõõrdumisega on tegemist, kui õlikile paksusega kuni mõni kümnendik mikromeetrit absorbeerub detaili pinnale. Hõõrdetegur on siis 0,01...0,03. Vedelikumäärimisel on hõõrduvad pinnad eraldatud surve all oleva õlikilega, mis muutub kandvaks kihiks ja võtab vastu väliskoormuse. Õlikile on küllalt paks, hõõrdumine toimub õlikile sees, mis viib hõõrdeteguri vähenemisele kuni 0,001.

Kulumiskindluseks (*wear resistance*) nimetatakse materjali omadust osutada vastupanu kulumisele. Kindlates hõõrdetingimustes väljendatakse seda kulumise kiiruse või intensiivsuse pöördväärtusena. Suhteline kulumiskindlus on katsetatava materjali ja etaloniks võetud materjali kulumiskindluste suhe, kui nende kulumine toimub ühesugustes kulumistingimustes.

Kulumise liigid

Lähtudes kulumismehhanismist, eristatakse mehaanilist, korrosiivmehaanilist ja adhesioonkulumist.

Mehaaniline kulumine

Mehaanilise kulumise (*mechanical wear*) alaliigid on abrasiiv-, erosioon-, kavitatsioon- ja väsimuskulumine.

Abrasiivkulumist (*abrasive wear*) tekitab kõvade osakeste (abrasiivi) lõikav, kraapiv või paljukordne deformeeriv toime. Abrasiiv satub kontakteeruvate pindade vahele koos määrdega, sadeneb õhust või on teiste kulumise liikide saadus (väljamurenenud osakesed, purunenud oksiidikiht, sööbimise tagajärjel eraldunud osakesed). Abrasiiv kulumine kahjustab paljude mäemasinate, puurseadmete, ehitusmehhanismide, teede- ja põllumajandusmasinate detaile, mis töötavad abrasiivirikas keskkonnas või abrasiivis (pinnases).

Erosioonkulumist (*erosive wear*) tekitavad vedeliku-, gaasi- või tahkete osakeste löögid, näiteks hüdro- ja gaasiturbiinide labadel, löökveskite tööosadel jm. Kui abrasiivosakesed on vedelikus, siis selline segu põhjustab kulumist, mida nimetatakse hüdroerosioonkulumiseks. See esineb segistites, reaktorites, pumpades, hüdroturbiinides jm. Kui kulumist põhjustab gaasivool, milles on tahkeid osakesi, siis on tegemist gaaserosioonkulumisega (suitsukäigud, ventilaatorid, liivapritsid, pneumotransport, lennukipropellerid). Erosioonkulumisel on määravaks abrasiivosakeste

kohtumisnurk kuluva pinnaga: sitkete materjalide korral on kulumine maksimaalne väikestel nurkadel ($\sim 20^\circ$), habraste materjalide korral suuritel nurkadel (90°).

Kavitatsioonkulumine (*cavitative wear*) esineb vedelikus kohtades, kus vedeliku rõhk langeb allapoole temperatuurist sõltuvat küllastunud auru rõhku, mille tagajärjel vedelik aurustub ja sellesse tekivad mullid. Esineb sõukruvidel, hüdroturbiinides, mootorite vesijahutussüsteemides.

Väsimuskulumine (*fatigue wear*) on põhjustatud tsüklilistest kontaktkoorustest, mis vigastavad pinda, murendavad välja osakesi ja tekitavad auke; tundub ka kontaktväsimusena. Esineb nii veeremisel kui ka libisemisel. Väsimuskulumine kahjustab veerelaagreid, raudteerööpaid ja rattaid.

Korrosiivmehaaniline kulumine (*corrosive mechanical wear*) on selline kulumine, kus mehaaniliste mõjutustega kaasneb keemiline toime. Korrosiivmehaanilise kulumise alaliigid on oksüdeerumiskulumine ja frettingkorrosiivkulumine.

Oksüdeerumiskulumisel (*oxidative wear*) reageerib materjal hapnikuga või oksüdeeriva keskkonnaga, hõõrdumisel moodustub materjali pinnal eriline struktuur paksusega umbes $1 \mu\text{m}$, mis sisaldab paljuoksiide. Selle struktuuri alla jääb tugevasti deformeerunud metallikiht, mida iseloomustab suur dislokatsioonide tihedus. Normaalsel korrosiivmehaanilisel kulumisel puruneb ainult pinnastruktuur, mis pidevalt uueneb, tagades protsessi jätkuvuse. Selle kulumiskindluse tagamiseks on tekkiva struktuuri minimaalne paksus, suur tugevus ja hea side põhimetalliga.

Frettingkorrosiivkulumist (*fretting-corrosive wear*) põhjustavad kontakteeruvate pindade omavahelised väikseamplituudilised ($20 \dots 30 \mu\text{m}$) võnked. Tavaliselt kaasneb pindade suhtelise liikumisega korrosioon. Sellisel juhul nimetatakse protsessi frettingkorrosiooniks, mis on üks korrosiivmehaanilise kulumise liike. Kulumise põhjuseks on kontaktikohtades kaitsva oksiidikile purunemine ja uueningmine. Frettingkorrosiivkulumine esineb polt- ja neetühendustes, veerelaagrite, hammasrataste, sidurite istepindadel jm.

Adhesioonkulumine

Adhesioonkulumise ehk **sööbekulumise** (*adhesive wear*) tulemusel jäävad ühe pinna osakesed molekulaarjõudude tõttu teise pinna külge. Liikuvad detailid seiskuvad ja see võib põhjustada avariit. Eristatakse külmsööv- ja kuumsöövet. Külmsööve tekib, kui suhtelise liikumise kiirus on väike ($0,5 \dots 0,6 \text{ m/s}$), survepinge ületab voolepiiri ning puudub määre ja kaitsv oksiidikile. Kuumsööve tekib, kui hõõrdpinnad liiguvad kiiresti (üle $0,6 \text{ m/s}$), survepinge on suur ja kokkupuutealadel tõuseb temperatuur järsult kuni $500 \dots 1500 \text{ }^\circ\text{C}$.

Metallide kulumiskindlus

Kulumise vähendamise viis on kulumise liigist. Mehaanilise kulumise vähendamiseks kasutatakse kõvu tööpindu, mida võimaldavad saada karastamine, pealesulatamine, termokeemiline töötlemine. Korrosiivmehaanilise kulumise korral peab detaili materjal olema vastupidav ka korrosiooni põhjustava keskkonna toimele; kasutatakse eeskätt kõrgleegeritud kulumiskindlaid teraseid ja malme. Kulumiskindlate terastena on kasutusel eelkõige tsementiitavad ja suurema C-sisaldusega kroom-, mangaan- jt terased. Analoogselt korrosioonikindlusega on kulumiskindluse seisukohalt läbiclegerimine väheefektiivne moodus kulumiskindluse suurendamiseks – pinnakihi kulumiskindluse tagamiseks lisatavatest legerivatest elementidest kasutatakse ära ainult tühine osa.

Pindlegerimine ja -karastamine (*surface alloying, surface hardening*). Madal- ja kesksüsinikteraste pindlegerimise levinumaid mooduseid on termokeemiline tootlemine – tsementiitimine, nitritimine, nitrotsementiitimine, viimasel ajal ka plasmamoodused – plasmanitritimine jt. Vähemlevinud difuusse legerimise moodusteks on boorimine, kroomimine, vanaadimine, mis tagavad pinna suure kõvaduse. Suhteliselt suure C-sisaldusega teraste korral on lihtsaimaks mooduseks pindkarastamine kõrgsagedusvoolu või gaasileegiga kuumutamisel. Äärmiselt suure kiirusega pinna kuumutus tagatakse aga laserkarastusel (laserkiirega kuumutamisel).

Kõvapindamine (*hardfacing*). Kui põhimaterjaliks pole teras või kui on vaja terase võimalikust saavutatavast kõvadusest suuremat kõvadust, võib lahenduseks olla kõvapinnete kasutamine. Võimalikeks moodusteks on sulatuspindamine (stelliidiga, sormaidiga), kõvakroomimine, pihustuspindamine, aurustussadestamine (PVD-pind) ja teised pindamise moodused. Kõvapinnetest levinumaid on karbiid-, nitriid-, oksiid-, boriid- jt pind.

Pindlegerimine ja -karastamine kui ka pinnete kasutamine ei anna tulemusi suurte lokaalsete ja löökoormuste korral. Deformatsioonkahjustus võib toimuda allpool kaitsekihti, muutes pinnakihi profiili ja kutsudes esile kulumise, halvimal juhul pinnete pragunemise ja purunemise. Tsükliliste koormuste korral on seetõttu eelistatum pindlegerimine ja -karastamine, mida kasutatakse väsimustugevuse tõstmisel tänu pinnakihi tekkivatele survepingetele. Adhesioonkulumist vähendatakse eri tüüpi materjalide kasutamisega (näiteks terastapp vastu pronksist laagriliuda). Sama tüüpi materjalidest detailid (teras vastu terast, pronks vastu pronksi) on kõige sööbimisohtlikud.

Plastide kulumiskindlus

Kõikidest tehnomaterjalidest madalaima pinnaenergia ja hõõrdeteguriga on fluoro-plastid (PTFE). See on ka põhjus, miks neid kasutatakse laialdaselt antifriktsioon-pinnetena ja sobilike täiteainetega (grafiit, klaaskiud, molübeensulfiid) ka kergkoor-

matud laagrimaterjalina. Samuti mõned teised polümeerid, sh polüatsetaalid ja polüamiidid (nailon), on leidnud kasutamist kulumiskindlate laagrimaterjalidena, aga ka kergkoormatud keti- ja hammasrataste materjalidena, sageli kombinatsioonis metallhammasratastega.

1.4. TEHNOLOOGILISED OMADUSED

Materjali tehnoloogilised omadused on seotud eelkõige materjalist detaili/toote valmistusprotsessiga ja on materjali valikul sama olulised kui materjali mehaanilised omadused.

Valatavus (*castability*) – detaili vormitavus valamise teel. Head valuomadused on määratud eelkõige materjali madala sulamistemperatuuri ja hea vedelvoolavusega (viimane omakorda metallide ja sulamite korral kristallisatsioonintervalliga).

Survetöödeldavus (*forgeability, malleability*) – materjali võime elastselt või plastselt deformeeruda koormuse all purunemiseta. Survetöödeldavust mõjutavad eelkõige materjali elastsus- ja voolepiir ning plastsusnäitajad. Nende järgi on võimalik hinnata materjali sobilikkuse üle plastselt deformeerida.

Lõiketöödeldavus (*machinability*) – põhineb sagedamini tööriista suhtelisel tööeal, kuid tavakasutuses on pigem vaja teada, kui kerge on materjali lõigata. Lõiketöödeldavus ei olene ainult materjali omadustest, vaid ka lõikeprotsessist, selle kiirusest jpm.

Keevitatavus (*weldability*) – materjali omadus moodustada keevitamise teel konstruktsiooni- ja kasutamiskoetetele vastav liide. Keevitatavus oleneb eelkõige liiteprotsessidest ja keevitamise iseärasustest.

Termotöödeldavus (*heat-treatability*) – materjali omadus struktuuri- ja mehaaniliste omaduste muutusteks kuumutamisel ja jahutamisel. On seotud eelkõige struktuuri- ja faasimuutustega materjalides.

Põhjalikult käsitletakse metallide tehnoloogiaga seotud küsimusi õpiku II osas 8. ptk. Survetöötlus, 9. ptk. Valutehnoloogia, 11. ptk. Materjalide liitmisprotsessid ja 12. ptk. Lõiketöötlus.

1.5. KORDAMISKÜSIMUSED

1. Millised on materjali füüsikalised omadused?
2. Loetlege juhtusid, kus materjali tihedus on oluline.
3. Mille poolest on materjali elastsusmoodul oluline materjali omadus?

4. Miks on olulised materjali soojuslikud omadused (joonpaisumistegur, soojusjuhtivustegur)?
5. Millised metallsed materjalid on parima elektri juhtivusega?
6. Mis on elektrokeemiline korrosioon?
7. Loetlege elektrokeemilise korrosioonitõrje mooduseid.
8. Millised on materjalide põhilised mehaanilised omadused?
9. Millised on materjali staatilisel koormamisel määratavad omadused?
10. Milline on põhiline staatiline teim/katse mehaaniliste omaduste määramiseks?
11. Millised on tõmbeteimiga määratavad tugevusnäitajad?
12. Millised on tõmbeteimiga määratavad plastsusnäitajad?
13. Mis on pingekontsentratsioon ja milline on selle mõju pingeolukorrale detailis?
14. Mis on eritugevus?
15. Mis on materjali sitkus ja millised on selle näitajad?
16. Mille poolest sarnanevad ja erinevad Brinelli ja Rockwelli kõvaduskatsed?
17. Miks kasutatakse kõvaduse määramisel erinevaid Rockwelli skaalasisid?
18. Mis on Vickersi kõvaduskatse?
19. Mis on mikrokõvadus ja millal seda määratakse?
20. Milline on seos materjali kõvaduse ja tõmbetugevuse vahel?
21. Kirjeldage dünaamilisi teime/katseid.
22. Mis on materjali löögitugevuse näitajad? Kuidas need määratakse?
23. Mis on külmahaprus?
24. Mis on enamikul juhtudel (90 % juhtudel) purunemise põhjuseks?
25. Mis on väsimuspiir? Kuidas see määratakse?
26. Kuidas on omavahel seotud materjali tugevus- ja väsimusomadused?
27. Kuivõrd on materjali/detaili kulumine detaili rivist väljalangemise põhjuseks?
28. Millised on metallide kulumiskindluse tõstmise võimalused?
29. Miks on vaja materjalide omadusi määrata standarditud meetoditega ja nende korratavus?
30. Missugused on materjali põhilised tehnoloogilised omadused?

2. METALLIDE JA SULAMITE STRUKTUUR

2.1. STRUKTUURI JA OMADUSTE SUHE	2.2.4. Kalestumine ja rekristallsatsioon Kalestumine Rekristallsatsioon
2.2. METALLIDE KRISTALNE STRUKTUUR	2.3. SULAMID
2.2.1. Aatomi struktuur	2.3.1. Metallisulamite faasid Tardlahused Keemilised ühendid Mehaanilised segud
2.2.2. Kristallivõred ja kristallsatsioon Kristallivõre tüübid. Polümorfism Kristallivõre defektid	2.3.2. Sulamite kristallsatsioon
2.2.3. Elastne ja plastne deformatsioon	2.4. KORDAMISKÜSIMUSED

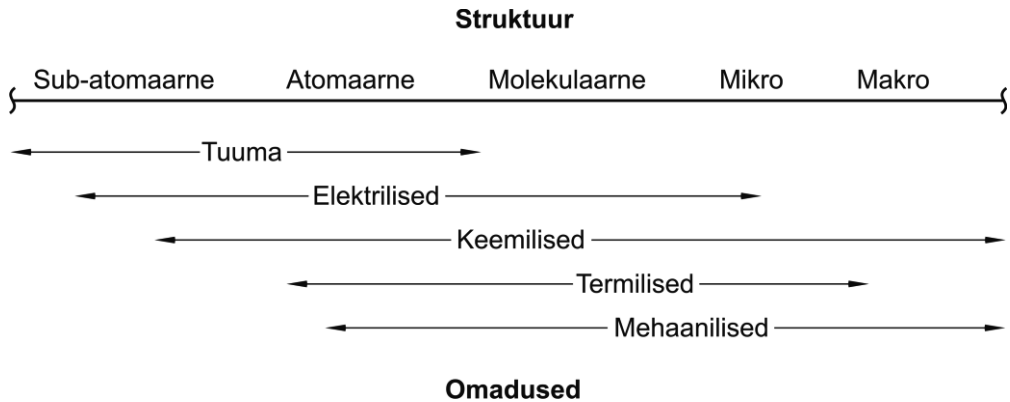
2.1. STRUKTUURI JA OMADUSTE SUHE

Tehnomaterjalide omadused on otseses seoses nende struktuuriga. Muutused materjali struktuuris toovad kaasa ka muutused materjali omadustes.

Vaatamata asjaolule, et kõik materjalid koosnevad samadest osistest – prootonitest, neutronitest ja elektronidest – on muljetavaldav, kui palju erinevaid laialt varieeruvate omadustega materjale eksisteerib. See on seletatav väga paljude võimalike kombinatsioonidega nimetatud osistest makrotasandil. Nimetatud aatomi osised, moodustades erinevates paigutustes erinevaid aatomeid, millest igaüks omab tuuma prootoneist ja neutroneist ja neid ümbritsevaist vastava arvu elektronidest tagamaks laengu neutraalsuse. Elektronide paigutusest ümber tuuma, aga ka sidemetest aatomite vahel olenevad elektrilised, magnet-, soojus- ja optilised omadused. Aatomsidemed omakorda põhjustavad kõrgema taseme struktuuri, mis väljendub molekulides, kristallides või amorfses olekus. See struktuur ja defektid kristallivõres avaldavad mõju mehaanilistele omadustele. Kristallide suurus, kuju ja paljusus või mitmete struktuuride segu materjalis annab meile järgneva taseme struktuuri – mikroskaalal struktuuri ehk **mikrostruktuuri** (*microstructure*), mille iseärasused omakorda mõjutavad materjali omadusi.

Võimaluse tõttu kontrollida struktuuri töötuse kaudu ja luua uusi struktuure, näiteks komposiitmaterjale, saavad insenerid olemasolevate võimaluste korral luua erinevaid materjale meid huvitavate omadustega. Materjalide omadused olenevad struktuurist, alates aatomsisest ja lõpetades makrostruktuuriga (Joonis 2.1). Siinjuures on insene-

rile oluline mõista kogu struktuuride spektrit, põhistruktuuri ja muutusi, mis mõjutavad omadusi.

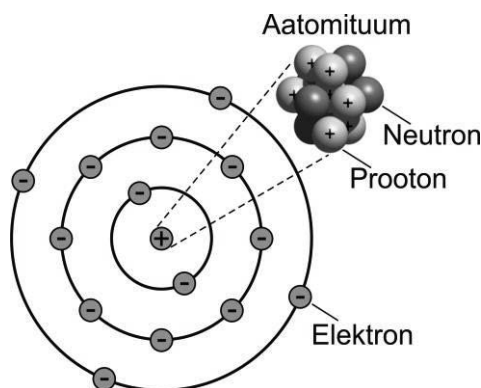


Joonis 2.1. Seos erinevate struktuuritasemete ja tehnomaterjalide omaduste vahel

2.2. METALLIDE KRISTALNE STRUKTUUR

2.2.1. Aatomi struktuur

Kõikide tehnomaterjalide põhiline struktuuriühik on aatom, mis koosneb suhteliselt tihedast tuumast ja seda ümbritsevast elektronkattest (Joonis 2.2). Aatomituum koosneb ligikaudu sama massiga neutraalsetest osakestest – prootonitest ja positiivselt laetud neutronitest, mille arv võrdub aatomnumbriga. Aatomituuma ümbritsevad negatiivselt laetud elektronid, mille mass on ainult 1/1840 prootoni (neutroni) massist ja arv võrdne prootonite arvuga. Seega **aatommass** (*atomic mass*) on määratud prootonite ja neutronite arvu ning massiga.



Joonis 2.2. Aatomi ehitus

Aatommass määrab tahkise tiheduse, elektrijuhtivuse, soojusmahtuvuse, mõjub aga vähe selle tugevusomadustele.

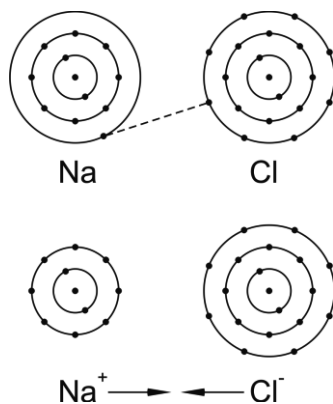
Aatomituuma ümbritsev **elektronkate** (*electron shell*) koosneb reast kihtidest, mille esimeses elektronkihis on maksimaalselt 2, teises 8, kolmandas 18, neljandas 32 jne elektroni. Mistahes elektronkiht on seda stabiilsem, mida täielikumalt on see täidetud. Aatomid on suhteliselt stabiilsed, kui kolmandas või sellest väljaspoolsetes elektronkihtides on vähemalt 8 elektroni.

Kui aatomi välimises elektronkihis on vähem elektrone kui on vaja stabiilsuseks, näiteks seitse, siis aatomid on valmis elektrone ära andma. Nii käituvad metalliaatomid, moodustades positiivselt laetud ioone ehk **katioone** (*cations*). Teised aatomid tõmbavad elektrone külge, näiteks halogeniidid ja neile lähedased elemendid, moodustades negatiivseid ioone ehk **anioone** (*anions*).

Kuna anioon omandab täiendavaid elektrone, suureneb selle aatomiraadius (sama võrra väheneb katiooni aatomiraadius). Aatomi välimises elektronkihis olevad elektronid on tuntud valentsielektronidena ja nendest olenevad aatomitevahelised sidemed, aatomi suurus, keemilised omadused, elektrijuhtivus, mõningad mehaanilised omadused ja optilised näitajad. Elementaarosakeste vahel kristallis olevad sidemed (vastastikjõud) olenevad koosmõjuvate aatomite elektronehitusest, aatomi struktuur omakorda avaldab olulist mõju aatomsidemete olemusele.

Aatomsidemed

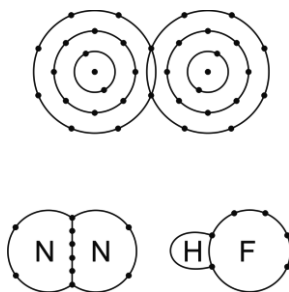
Ioonside (*ion bond, ionic bond*). Elektropositiivsed ained pürgivad moodustama koos elektronegatiivsete ainetega keemilisi ühendeid, mille kristallivõre aatomeid hoiavad koos elektrostaatiliselt jõud. Elektropositiivse aine aatomid loovutavad oma välisest elektronkihist üksikuid elektrone elektronegatiivsete aatomite mittetäielikule väliskihile, kusjuures esimesed moodustavad positiivseid, teised negatiivseid ioone. Selline naaberaatomite elektronide vahetus on pidev. Elektronid rühmituvad kristallivõres selliselt, et igat positiivset iooni ümbritsevad lähimad naaberioonid on negatiivsed ja vastupidi. Sellistest kristallivõredest tuntumad on NaCl- ja CaF₂-tüüpi kuupvõred, mis esinevad ka paljudel metallidevahelistel ühenditel (intermetalliididel) (Joonis 2.3).



Joonis 2.3. Na ja Cl korral moodustuv ioonide

Ioonsidemetega intermetalliididel on eranditult **stõhhiomeetriline koostis** (*stoichiometric composition*) (keemilisele valemile vastava koostisega keemiline ühend, näiteks stõhhiomeetrilise koostisega titaankarbiid TiC sisaldab nii 50 aatomiprotsenti Ti kui ka C). Nad on tavaliselt püsivad – seda püsivamad, mida rohkem erinevad komponentide elektrokeemilised omadused. Ioonsidemetega ühendatud materjale iseloomustab keskmine tugevus (mõõdukast kuni suureni), suur kõvadus ja haprus, kõrge sulamistemperatuur, halb elektrijuhtivus.

Kovalentside (*covalent bond, homeopolar bond*). Kui keemiliselt samalaadsed aatomid ühinevad ja naaberaatomite valentselektronide kihid tavaliselt kattuvad, siis pääsevad valentselektronid ühest aatomist teise. Kovalentsideme korral jagab aatom ühte või mitut valentselektroni naaberaatomiga, mille tulemusena iga aatomiväline valentselektronide kiht on täidetud. Selle tulemusena moodustub kaheaatomiline molekul (Joonis 2.4).

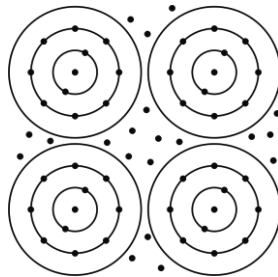


Joonis 2.4. Kovalentside: a – valentselektronide kihtide kattuvus; b – näited N₂ ja HF korral

Analoogselt ionsidemetega materjalidega iseloomustab kovalentsidemetega materjale suur tugevus ja kõrge sulamistemperatuur. Aatomite liikumine materjali sees (nt plastsel deformeerimisel) kutsub esile sidemete purunemise ja muudab materjali

hapramaks. Elektri juhtivus oleneb kovalentsideme tugevusest, olles pooljuhtränist kuni isolatsioonimaterjali teemandini (süsinik). Ioon- ja kovalentsidemetega tehnomaterjalide töötlemisel moodustuvad olemuselt keraamilised (kuumuskindlad) või polümeersed materjalid.

Metallside (*metallic bond*). Tüüpiliste metallide aatomeis on üsna vähe valents-elektrone – 1, 2 või 3. Nende arv võib olla ebapiisav kovalentsideme moodustamiseks. Metallide aatomeis võib laheneda see nii, et valentselektronid eralduvad aatomeist, moodustades selle ümber **elektronpilve** ehk **elektrongaasi** (*electron cloud*) (Joonis 2.5).



Joonis 2.5. Elektronpilv metallisideme korral

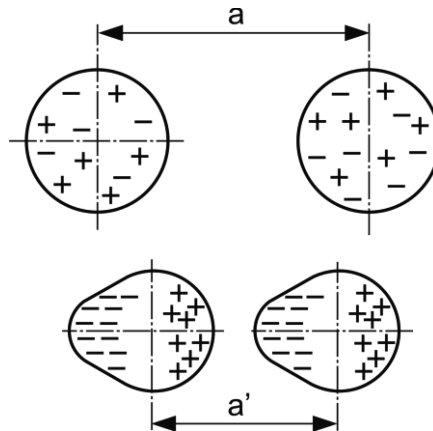
Vabade elektronide olemasoluga ja võimega siirduda ionide vahele on seletatav metallide hea elektri juhtivus.

Eespool esitatud silmas pidades käsitleb metalliõpetus metalli kui ainet, mis koosneb positiivselt laetud ionidest, mis on ümbritsetud tuumaga nõrgalt seotud negatiivselt laetud osakestega. Viimased paigutuvad metalli sisemuses pidevalt ümber ega kuulu seega mitte mingile kindlale tuumale.

Elektronide ümberpaigutumine metalli sisemuses ja nende nõrk side aatomitega põhjustavad metallidel esinevaid kindlaid omadusi (hea elektri- ja soojusjuhtivus, metalne läige, plastsus jm). Metallid aatomite (ioonide) püües asetuda üksteisele võimalikult lähedale, s.o paigutuda tihedamalt (metallidel on palju suurem tihedus kui mittemetallidel), põhjustab seda, et kristallides on metalli aatomite omavahelise paigutuse võimalike kombinatsioonide arv väike.

Molekulaarside (*molecular bond*). Vääriskaasides (inertgaasides), näiteks argoonis, heeliumis jt, on nii molekulid kui ka aatomid tasakaalus – nende vahel valitsevad nõrgad sidemed, mis on tuntud **van der Waals'i sidemetena** (*van der Waals bonds*). See sidemetüüp tekib erinevate elementaarosakeste (ioonide, aatomite, molekulide) vahel, kuid võrreldes teiste sidemetüüpidega on nõrk. Inertgaasides on *van der Waals*'i sidemed ainsad ning määravad gaasi omadused. Inertgaaside aatomitel on täielikult täidetud energeetilised nivood, mistõttu aatomite lähenemisel pole

elektronide vahetus võimalik. Tõmbejõudude teke aatomite vahel on tingitud hetkelisest aatomite polarisatsioonist (Joonis 2.6). Analoogsed jõud toimivad ka H_2 , N_2 ja Cl_2 molekulides, eelkõige madalatel temperatuuridel ja suurtel rõhkudel; H_2O , CO_2 ja CH_4 korral ka normaaltingimustes. Metallidest esinevad *van der Waals*'i sidemed arseeni, antimoni ja vismuti aatomite vahel, mistõttu nende elementide metallidele iseloomulikud omadused (elektrijuhtivus, plastsus jt) on ka tagasihoidlikud.



Joonis 2.6. Aatomite polarisatsioon Ar molekulis

Aatomite paigutus ja vahekaugus materjalides

Aatomite paigutusel on määrav roll materjali omadustele. Olenevalt aatomite rühmitamisest liigitatakse materjalid (struktuurid) **molekulaarseteks, kristalseteks ja amorfseteks**.

Molekulaarstruktuuri korral hoiavad määratud arvu aatomeid koos primaarsed sidemed, kusjuures molekulide vahel on nõrk side. Tüüpilisteks näideteks on hapnik (O_2), vesi (H_2O) ja etüleen (C_2H_4). Iga molekul on võimeline suuremal või vähemal määral tegutsema iseseisvalt, seega iseloomustab neid materjale madal sulamis- ja keemistemperatuur.

Tahkistele (metallidele ja mineraalidele) on omane kristalne struktuur. Siin moodustavad aatomid korrapärase geomeetrilise kujundi, mis on tuntud kristallivõrena. Kristallivõret iseloomustab elementaarkristallivõre, mis kordub ruumis lõpmatu arv kordi.

Põhiliselt on amorfne struktuur näiteks klaasil, kus aatomitel on korrapärane paigutus naaberaatomi(te) suhtes vaid lokaalselt. Materjali koguulatuses perioodiliselt korduvat aatomite paigutust ei ole.

Aatomitevahelised kaugused ja aatomi suurus materjalis pole püsivad suurused.

Aatomi elektronkihtide poolt hõivatud maht on kaugelt suurem kui elektronide mõõtmed; suurem kui aatomi poolt hõivatud maht. Aatomid pole tahkised, mistõttu aatomi suurus on midagi ebamäärast. Erinevad aatomsidemed püüavad hoida aatomeid koos, aga positiivses tuumas eksisteerivad tõukejõud. Tasakaaluline paigutus viitab tõuke- ja tõmbejõudude tasakaalule.

Kui aatomid kujutaksid endast jäika sfääri, siis võrduks aatomitevaheline kaugus aatomiraadiuste summaga ja aatomitevaheline kaugus oleks kindel suurus. Aatomiraadius pole aga konstantne. Termiline mõju põhjustab aatomite pendeldamist (kõikumist) oma tasakaaluasendi ümber. Kui tõukejõud ületavad tõmbejõude, toimub aatomite eraldumine. Aatomite paigutusel on keskmine vahekaugus suurem kui normaalne vahekaugus, mille tulemuseks on materjali makroskoopiline paisumine. Välimisest elektronkihist aatomite eraldumisel väheneb aatomiraadius ja elektronide lisandumisel see aga suureneb. Järelikult negatiivne ioon (anioon) on suurem kui baasaatom ja positiivne ioon (katioon) – väiksem. Aatomiraadius on muutuv ka tulenevalt ümbritsevate või naaberaatomite paigutusest. Suurema naaberaatomite arvu korral on väiksem mõju igale üksikule naaberaatomile ja aatomitevaheline kaugus suureneb. Näiteks Fe aatomiraadius kaheksa naaberaatomi korral (ruumkesendatud kuupvõre K8) on võrdne 0,124 nm, 12 naaberaatomi korral (tahkkesendatud kuupvõre K12) aga 0,127 nm.

2.2.2. Kristallivõred ja kristallisatsioon

Aatomkristalse või lihtsalt kristalse struktuuri all mõeldakse aatomite (ioonide) omavahelist paigutust kristallis realselt esinevas metallis.

Metallis paiknevad aatomid kindla seaduspärasuse kohaselt, moodustades korrapärase kristallivõre. Samas aatomite paigutus vastab aatomite omavahelise mõju minimaalsete energiaga.

Kristallivõre tüübid

Erinevatest võreelementidest ja paigutuse motiividest lähtudes võivad aatomid paigutuda regulaarselt – teatud korra kohaselt, mille tulemusena tekib kristalne struktuur. On ka võimalik, et tavaline aatomite või aatomirühmade korduvus kristallis on piiratud.

Kristallivõred (*crystal lattices*) (võreelemendid) võivad olla:

- a) **primitiivsed** ehk **lihtsad** (*primitive, simple*) – aatomid paiknevad ainult võreelemendi sõlmpunktides (tippudes);
- b) **ruumkesendatud** (*body-centred*) – lisaks võreelemendi tippudes olevaile aatomeile paikneb üks aatom võreelemendi sees diagonaalide sõlmpunktis;
- c) **tahkkesendatud** (*face-centred*) – lisaks võreelemendi tippudes olevaile aatomeile paiknevad aatomid iga tahu keskel diagonaalide sõlmpunktides;

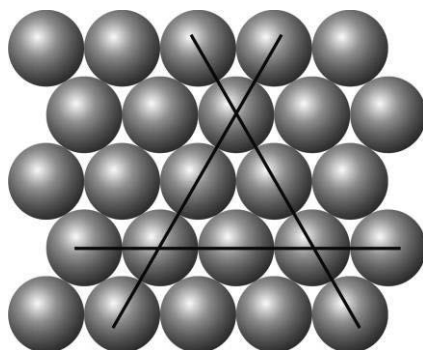
- d) **põhitahkkesendatud** (*base-centred*) – lisaks võreelemendi tippudes olevaile aatomeile paiknevad aatomid ainult põhitahkude keskel diagonaalide sõlmpunktides.

Ruumilise kristallivõre korral olenevalt aatomitevahelistest kaugustest kolmes suunas ja telgnurkadest on võimalikud 14 kristallivõre tüüpi. Põhilisteks kristallivõrede tüüpideks metallide korral on ruumkesendatud kuupvõre, tahkkesendatud kuupvõre ja kompaktne heksagonaalvõre (Tabel 2.1), aga ka tetragonaalvõre (näiteks Sn, Mn jt).

Kui vaadelda aatomeid sfääradena (keradena), siis teatud suundades ja tasandeis puutuvad aatomid kokku, samas aga moodustuvad tühikud (poorid) aatomitevahelises ruumis.

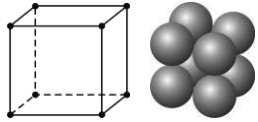
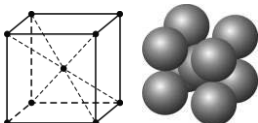
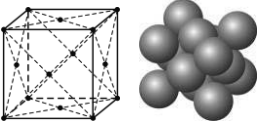
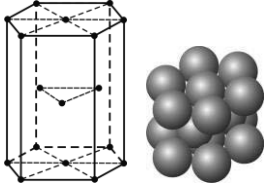
Nii on maksimaalsete tühikute suurus ruumkesendatud kuupvõres 0,29 aatomiraadiusest, tahkkesendatud kuupvõre korral 0,41 aatomiraadiust.

Kui sfääre etteantud ruumis (kastis) mõjutada kuni stabiilse paigutuse saavutamiseni, saame struktuuri, mis koosneb tihepakendatud tasandest (Joonis 2.7).



Joonis 2.7. Tihepakkeaatomtasand ja 3 võimalikku tihepakke suunda

Tabel 2.1. Metallide põhilised kristallivõre tüübid

Kristallivõre tüüp	Kristallivõre skeem ja sfäärmodel	Koordinatsiooniarv	Pakketihedus	Tüüpilised metallid
Lihtne kuubiline		6	52 %	Puudub
Ruumkesendatud kuubiline		8	68 %	Fe, Cr, Mn, Ta, Ti, V
Tahkkesendatud kuubiline		12	74 %	Fe, Al, Cu, Ni, Au, Ag, Pb, Pt
Kompaktne heksagonaalne		12	74 %	Bc, Cd, Mg, Zn, Zr, Ti

On võimalik kaks tihepakkevõimalust olenevalt aatomite paigutusest (mõlema korral on igal aatomil 12 lähimat naaberaatomit: kompaktse heksagonaalvõre korral 6 antud tasandis ning 3 allpool ja pealpool; tahkkesendatud kuupvõre korral 4 lähimat naaberaatomit igas kolmes tasandis. Aatomite pakketiheduseks kujuneb 74 %. Siit tulenevad ka metallide omadused: enamiku tahkkesendatud struktuuriga metallide hea vormitavus (võime plastselt deformeeruda purunemiseta); kompaktse heksagonaalvõreiga metallide kehv deformeeritavus (nõuab sageli eritötlusprotsesse).

Polümorfism

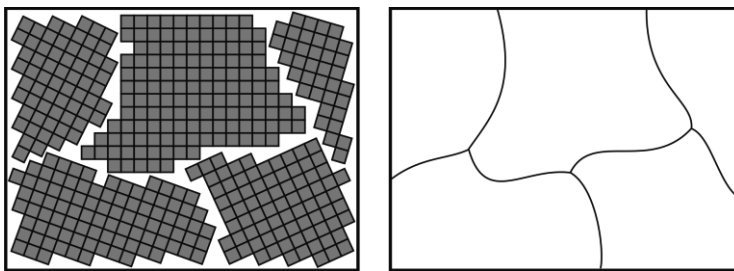
Mõnel metallil on olenevalt temperatuurist enam kui üks kristallivõre tüüp. Seda erinevate kristallivõrede esinemist ühel metallil nimetatakse **polümorfismiks** (*polymorphism*). Tuntumaks näiteks võib tuua raua. Raua kristallivõre muutub kuumutamisel temperatuuril 911 °C ruumkesendatud kuupvõrest tahkkesendatuks ja temperatuuril 1392 °C tagasi ruumkesendatuks. Polümorfse muutuse temperatuure on võimalik muuta (alandada toatemperatuurini) legerimise teel. Paljudel legerterastel

(näiteks roostevabadel) esineb madalatel temperatuuridel sagedamini tahkkesendatud kui ruumkesendatud kuupvõre, mistõttu nad on plastsemad ja sitkema võrreldes mittelegeerterastega.

Erinevate metallide kristallivõrede samakujulisust nimetatakse **isomorfismiks** (*isomorphism*). Isomorfsete ainete kristallivõredel on ligilähedased võreperioodid, aatomiraadiused, mistõttu aatomid võivad üksteist kristallivõres asendada. Näitena võib tuua Ag ja Au (mõlema metalli kristallivõre on K12, aatomiraadius $R = 0,144$ nm, võreperiood $a = 0,408$ nm).

Terastruktuuri teke – kristallisatsioon

Metalli tardumisel moodustuvad vedelmetallis väikesed antud metallile omase korrapärase aatomite paigutusega (kristallivõrega) alad – tahkise osakesed. Need osakesed toimivad kui kristallisatsioonialged või -keskmed, mis kasvavad, kuna teised naabruses olevad aatomid liituvad nendega. Põhiline kristallivõre kordub ruumis (näiteks kuupvõrena, Joonis 2.8).



Joonis 2.8. Kristalli kasv ja polükristalse struktuuri moodustumine

Tegelikult tardumisel moodustub samaaegselt palju kristallisatsioonikeskmeid vedel- faasi eri osades, mis on üksteise suhtes erinevalt orienteeritud. Igaüks neist kasvab, kuni nad hakkavad üksteist mõjutama. Kuna erinevates kasvavates kristallides kristallivõre orientatsioon on erinev, pole võimalik ühtse kristallstruktuuri moodustumine. Need moodustunud pidevstruktuuriga tahkise osised on tuntud **kristallide** (*crystals*) või **teradena** (*grains*) ja pindu, mis neid lahutavad – **terapiiridena** (*grain boundaries*). Seega terastruktuuri teke kuni tardumiseni on põhjustatud kristallisatsioonikeskmete tekkest ja nende kasvust.

Terasuurus (*grain size*). Kristallisatsioonikiirus ja kristallunud metalli struktuur olenevad aja- ja ruumalaühikus tekkinud kristallisatsioonikeskmete arvust ja nende kasvu kiirusest. Mida suurem on kristallisatsioonikeskmete tekkimise ja nende kasvamise kiirus, seda kiiremini toimub kristallisatsioon. Jahtumisel allapoole tasakaalutemperatuuri tekivad üksikud kristallisatsioonikeskmed; allajahutusastme suurenedes kasvab keskmete tekkimise ja nende kasvamise kiirus, saavutades teatud

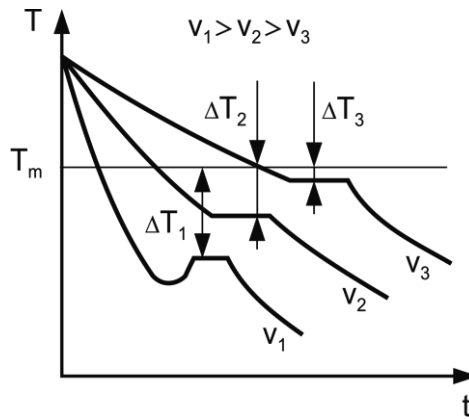
allajahutusastme korral maksimumi. Keskmete tekkimise kiirus (ja sellest tulenev keskmete arv) suureneb allajahutusastme suurenedes enam kui nende kasvamise kiirus. Siit jäeldub, et suurtel allajahutusastmetel on keskmete tekkimise kiirus suur, kasvamise kiirus aga väike – tekib peeneteraline struktuur. Väikese allajahutusastme korral on tekkivate keskmete arv väike, nende kasvamise kiirus suhteliselt suur, mistõttu tekib jämeteraline struktuur.

Tera suurus mõjutab tunduvalt metalli mehaanilisi omadusi, eelkõige plastsust ja sitkust. Mida peeneteralisem on struktuur, seda kõrgemad on plastsuse ja sitkuse näitajad. Peale allajahutusastme avaldavad tera suurusele mõju metalli keemiline koostis (eelkõige lisandite olemasolu) ja kuumutustemperatuur.

Tera kuju (*grain form, grain shape*). Kristallumisel tekkivate kristallide (terade) kuju oleneb eelkõige nende kasvatingimustest, peamiselt soojuse äravoolu suunast ja kiirusest (jahtumiskiirusest). On täheldatud, et tera kasvab suurima kiirusega soojuse äravooluga vastassuunas. Seetõttu tekivad suunatud soojuse äravoolu korral sammakristallid. Kui soojuse äravool toimub kõigis kolmes suunas ühtlaselt, tekivad võrdtelgkristallid; kui jahtumine on aeglane – jämeterastruktuur.

Seega eristatakse põhiliselt kolme liiki kristalle: **võrdtelgkristalle** (*equiaxial crystals*), **hulktahkkristalle** (*multiplane crystals*) ja **sammakristalle** (*columnar crystals*). Viimaste erikujuks on **dendriitkristallid** ehk **dendriidid** (*dendrites*), millel on iseloomulik peatelg (suund, kus kristall on kasvanud suurema kiirusega) ja kõrvalteljed. Tavaliselt on terade mõõtmed mõni sajandik millimeetrit.

Puhta metalli kristallisatsiooniprotsessi iseloomustab **jahtumiskõver** (*cooling curve*) teljestikus temperatuur-aeg. Joonisel 2.9 on erineva kiirusega jahutatud puhta metalli jahtumiskõverad. Väikesel jahtumiskiirusel (v_3) on allajahutusaste (ΔT_3) väike ja kristallumine toimub tasakaalutemperatuurile T_m lähedasel temperatuuril (Joonis 2.9, kõver v_3). Iseloomulik horisontaalne lõik jahtumiskõveral (jahtumine seiskub ja jahtumiskiirus on null, vaatamata sooja äravoolule jahtumisel) on tingitud kristallisatsioonisoojuse eraldumisest. Jahtumiskiiruse kasvades (Joonis 2.10, kõverad v_2 ja v_1) suureneb ka allajahutusaste ja kristallumine toimub tasakaalutemperatuurist märgatavalt madalamal temperatuuril. Mida puhtam on metall, seda enam kaldub ta allajahutusele.



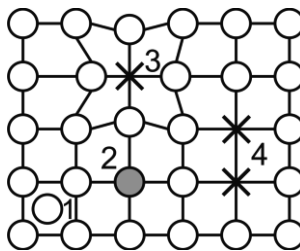
Joonis 2.9. Metalli jahtumiskõverad erinevatel jahtumiskiirustel

Kristallivõre defektid

Kristalli sisestruktuur ei ole ideaalne, s.o korrapärase ega täiuslik. Kristallis on mitmesugused defektid, mis avaldavad üsna suurt mõju metalli omadustele.

Kristallidefekte liigitatakse punkt-, joon-, pind- ja ruumdefektideks.

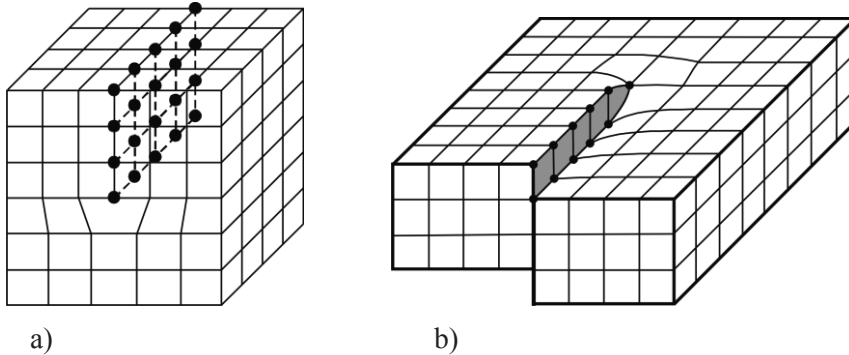
Punktdefektideks (*point defects*) nimetatakse selliseid korrapärasest kristalsest struktuurist kõrvalekaldeid, mille suurusjärg on võrreldav aatomi mõõtmetega. Punktdefektide hulka kuuluvad **lisandiaatom** (*interstitial atom*) – võõras aatom kristallivõres, **vakants** (*vacancy*) – kristallivõre sõlmpunkt, kus puudub aatom. Aatomi üleminekul tasakaaluolekust (sõlmpunktist) mittetasakaaluolekusse (sõlmpunktide vahele) tekib **sõlmedevaheline aatom** ehk **irregulaarne aatom** (*irregular atom*) (Joonis 2.10).



Joonis 2.10. Kristallivõre punktdefektid: 1 – irregulaarne aatom; 2 – lisandiaatom; 3 – vakants; 4 – divakants

Joondefektide ehk **dislokatsioonide** (*dislocations*) mõõtmed kristallides on ühes suunas võrdsed mõne aatomivahelise kaugusega, nende pikkus võib aga olla võrdne kristalli mõõtmetega. Joondefektide hulka kuuluvad dislokatsioonid – jooned, mille ulatuses ja ümber on rikutud aatomite korrapärase paigutus. Eristatakse serv- ja

kruvidislokatsioone (Joonis 2.11). Dislokatsioonide arvu kristallivõres iseloomustab **dislokatsioonide tihedus** (*dislocation density*) ρ_d , mida mõõdetakse dislokatsioonijoonte arvuga pinnatühikus (näiteks $1/\text{cm}^2$) või dislokatsioonide kogupikkusega ruumiühikus (näiteks m/cm^3).



Joonis 2.11. Kristallivõre joondefektid (dislokatsioonid): a – servdislokatsioon; b – kruvidislokatsioon

Pinnadefektid (*surface defects, surface imperfections*) on eralduspinnad üksikute kristallide (terade) vahel. Nad on väikesed mõõdetuna ainult ühes suunas. Piir üksikute terade vahel on üleminekuala kolme-nelja aatomivahelise kauguse ulatuses, kus üks kindla orientatsiooniga tera läheb üle teiseks omaette orientatsiooniga teraks. Seetõttu on terade piiril üleminekualas aatomite paigutus erinev naaberterade sees olevast orientatsioonist. Peale selle kontseentreeruvad tera piirjoontel puhastes metallides esinevad lisandid, mis veelgi rikuvad aatomite korrapärasest paigutust.

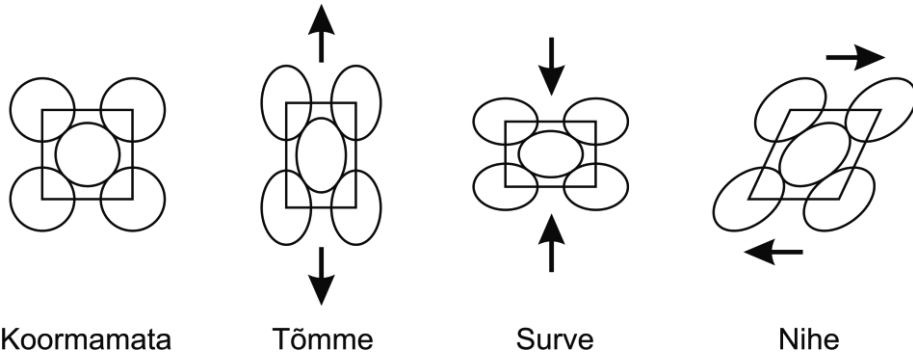
Ruumdefektide (*bulk defects, volume defects*) korral on tegemist juba makroskoopiliste kõrvalekalletega metalli korrapärasest struktuurist; nendeks on tühikud, poorid, praod jm.

2.2.3. Elastne ja plastne deformatsioon

Materjalide mehaanilised omadused olenevad suurel määral nende kristalsest struktuurist. Aru saamaks materjali mehaanilist käitumist, peame mõistma, kuidas toimib kristall mehaaniliste koormuste korral. Kristalli mehaaniline käitumine on (a) kristallivõre tüübist, (b) aatomitevahelistest jõududest (aatomsidemeist), (c) aatomtasandite vahekaugusest ja (d) aatomite pakketiühendusest eri tasandites.

Kui toimivad koormused on suhteliselt väikesed, toimub aatomite vahekauguste väljavenitamine või kokkusurumine (Joonis 2.12). Leiab aset kristallivõre deformatsioon ja aatomite omavahelise paigutuse mõningane muut – toimiv väliskoormus rikub aatomivaheliste jõudude tasakaalu. Kui koormus kõrvaldada, paigutuvad aatomid tagasi oma esialgsesse asendisse ning taastub kristalli algne suurus ja kuju.

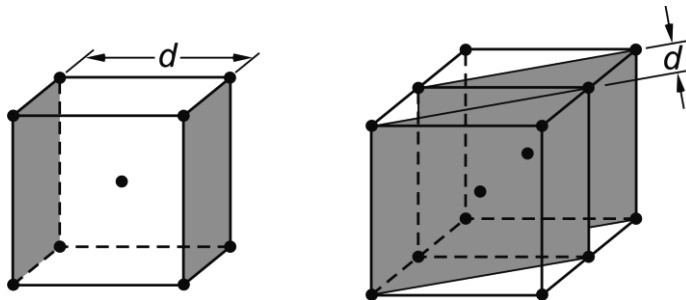
Tegemist on **elastse deformatsiooniga** (*elastic deformation*) ja kristallivõre väljavenitamine või kokkusurumine on proportsionaalne mõjuva koormuse või pingega.



Joonis 2.12. Kristallivõre moonutused elastsel deformeerimisel

Pikenemine või kokkusurumine koormamise suunas kutsuvad esile mõõtmete muutuse ka ristsuunas. Tõmbel ristsuunas ahenemise suhte telgsuunas pikenemisele on tuntud Poissoni tegurina. Selle väärtus on alati alla 0,5 (tavaliselt 0,3).

Toimiva koormuse suurenemisel deformatsioonid kristallivõres kasvavad, kuni (a) aatomisidemed katkevad ja toimub purunemine või (b) aatomid libisevad üle üksteise, andes jääva aatomite nihke oma algsetest asenditest, mis võib kaasa tuua koormuse vähenemise. Metallide korral esineb eelistatult teine juhtum ja seda madalamatel koormustel. Tulemuseks on **plastne deformatsioon** (*plastic deformation*), mille korral kujumuutus ei too kaasa muutusi omadustes. Pidades silmas, et kristallstruktuuris on aatomite korrapärane ja perioodiline paigutus ruumis, võib vaadelda aatomeid paigutatuna teatud tasandis. Neil tasandisil on erinev orientatsioon, erinev aatomite pakketihedus ja erinev vahekaugus. Siinjuures toimub plastne deformatsioon läbi tasandite, kus aatomite pakketihedus on suurim ja tasandite vahekaugus suurim (Joonis 2.13).

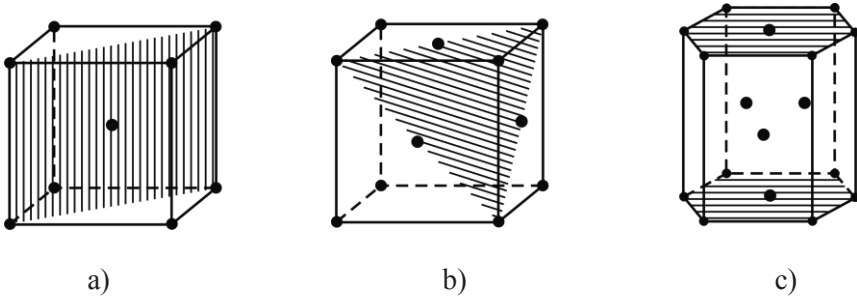


Joonis 2.13. Erineva pakketihedusega kristallograafiatasandid ja nendevaheline kaugus

Kergus, millega see metall võib deformeeruda, oleneb aatomtasandi nihke kergusest üle naabertasandi ja eelistatult suunas, mis tuleneb koormuse mõjumise suunast. Võtame näiteks kaardipaki: kui rakendame jõudu laual olevale pakile ülevalt, ei toimu mingit “deformatsiooni”; kaardid libisevad, kui rakendame jõudu piki kaardipakki.

Vaatleme järgnevalt metalli omadusi kolme põhilise kristallivõre korral:

1. **Ruumkesendatud kuupvõre (K8).** Selle võretüübi korral tihepakketasandid puuduvad. Libisemine toimub mööda eelistatumaid alternatiivtasandeid, mille aatomite tasandpakke tihedus on suurim (Joonisel 2.14a on diagonaaltasandid, kokku 6). Libisemise tõenäosus piki neid tasandeid on suur, aga ka deformeermiseks vajalik jõud on äärmiselt suur – puuduvad tihepakketasandid. Sellise võretüübiga materjalid on väga tugevad ja mõõdukalt elastsed.



Joonis 2.14. Libisemistasandid erinevates kristallivõredes: a – ruumkesendatud kuupvõre; b – tahkkesendatud kuupvõre; c – kompaktne heksagonaalvõre

2. **Tahkkesendatud kuupvõre (K12).** Selle võretüübi korral on neli tihepakketasandit (Joonis 2.14b) ja igäühes neist kolm tihepakkesuunda, milleks on tahu diagonaalid. Libisemise tõenäosus neis suundades on suur ja jõud selle initsieerimiseks pigem väike. Sellise võretüübiga metallid on suhteliselt väikese tugevusega ja väga sitked.
3. **Kompaktne heksagonaalvõre (H12).** Heksagonaalvõre sisaldab samuti tihepakketasandeid, kuid kristallivõre sees eksisteerib ainult üks selline tasand (Joonis 2.14c). Sel tasandil on kolm tihepakkesuunda ja libisemiseks vajalik jõud pigem väike ja tõenäosus soovitud suunas jõu rakendumiseks on samuti väike. Sellest tulenevalt on kompaktse heksagonaalvõreaga metallid vähem elastsed, aga hapramad.

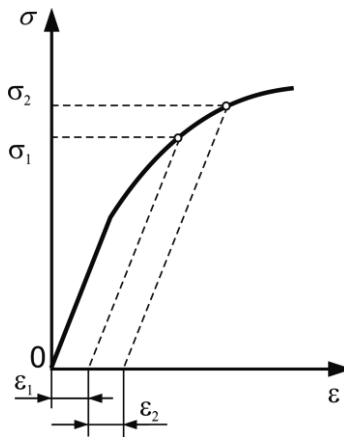
2.2.4. Kalestumine ja rekristallisatsioon

Kalestumine

Metallide survetöötlemisel leiab aset elastne ja plastne deformatsioon. Plastne deformatsioon algab, kui pinged ületavad voolepiiri. Pärast koormuse eemaldamist kaob

elastne, jääb aga plastne deformatsioon. Plastne deformatsioon – nihe toimub kas **libisemise** (*slip*) või **kahestumise** (*twinning*) teel. Plastse deformatsiooni korral nihkuvad metallikristalli(de) osad mööda kristallograafiatasandeid, mida iseloomustab aatomite suurem pakketihedus.

Metalli plastsel deformeerimisel on deformatsiooniastme ε_1 saavutamiseks vajalik pinge σ_1 (Joonis 2.15); pärast jõu eemaldamist on teistkordsel koormamisel sama deformatsiooniastme saavutamiseks vaja suuremat pinget σ_2 . Metall justkui tugevneb plastse deformatsiooni käigus – leiab aset **kalestumine** (*work hardening, cold hardening, strain hardening*).



Joonis 2.15. Metallide tugevuse kasv – kalestumine tõmbel

Plastse deformatsiooni käigus muutuvad metalli mehaanilised omadused: suureneb tõmbetugevus, voolepiir ja kõvadus, väheneb plastsus ja seda enam, mida suurem on deformatsiooniaste. Põhjuseks on plastse deformatsiooni tulemusena defektide, eriti dislokatsioonide arvu suurenemine kristallivõres, mis tõstabki vastupanu edasisele deformeerimisele. Kalestumisnähtust kasutatakse ära metallide ja ka sulamite tugevdamisel ja kõvendamisel. Metallide külmsurvetöötlemisel, näiteks valtsimisel või tõmbamisel, suureneb sitkete metallide tugevus ja kõvadus märgatavalt.

Kalestumisel muutuvad lisaks mehaaniliste omaduste muutumisele ka teised omadused:

- väheneb tihedus (tõmbel),
- väheneb vastupanu korrosioonile,
- suureneb elektritakistus,
- muutuvad ferromagnetiliste materjalide magnetomadused.

Kalestunud olekus on metalli korral tegemist ebastabiilse olekuga. Kalestunud metalli järgneval kuumutamisel üle rekristallisatsioonitemperatuuri toimuvad deformeeritud

struktuuris muutused (taastub esialgne terastruktuur), väheneb kõvadus ja tugevus ning suureneb plastsus.

Kui metalli plastne deformeerimine ületab teatud piiri, siis lõpuks metall puruneb. Seda tüüpi purunemine on tuntud **sitke purunemisena** (*ductile fracture*), mis algas vastupanuga plastsele deformeerimisele. Teine võimalus on, et plastsele deformeerimisele järgnev purunemine leiab aset äkki, katastroofiliselt, ja kiiresti läbi materjali. Selline purunemine on tuntud **habra purunemisena** (*brittle fracture*), mis on rohkem omane ruumkesendatud kuupvõrega ja kompaktsel heksagonaalvõrega struktuuridele. See, kas purunemine on sitke või habras, oleneb sageli materjali spetsiifilistest töötingimustest, temperatuurist, pingeolukorrast ja koormamise kiirusest.

Rekristallisatsioon

Deformeerimisel osa deformatsioonienergiast talletub materjalis täiendavate dislokatsioonide moodustumise ja terapiiride kasvu tõttu. Kui deformeeritud polükristalset metalli kuumutada üle teatud temperatuuri, püüab materjal võtta madalama energiaga oleku – moodustuvad uued võrdtelgised kristallid uute kristallisatsioonikeskmete tekke ja nende kasvu tõttu. Seda uute kristallide teket ja siseenergia vähenemise protsessi nimetatakse **rekristallisatsiooniks** (*recrystallization*). **Rekristallisatsioonitemperatuur** (*recrystallization temperature*) on iga metalli korral erinev ja oleneb eelnevast deformatsioonist – mida suurem on deformatsioonist, seda madalam on rekristallisatsioonitemperatuur.

Sagedasti võetakse madalaimaks rekristallisatsioonitemperatuuriks 0,4 sulamistemperatuuri ($T_{\text{rekr}} = 0,4 T_s, K$) (Tabel 2.2).

Kui metalli plastselt deformeerida allpool rekristallisatsioonitemperatuuri, on tegemist **külm(surve)töötlusega** (*cold working*). Metall kalestub ja struktuuris on terad moonutatud (deformeeritud). Seda kasutatakse metallide ja sulamite tugevuse tõstmiseks. Deformeerimise jätkumisel toimub purunemine.

Tabel 2.2. Põhiliste metallide madalaimad rekristallisatsioonitemperatuurid

Metall	Temperatuur, °C
Plii, tina	allpool toatemperatuuri
Tsink	toatemperatuuril
Alumiinium	150
Magneesium	150
Vask	200
Hõbe	200
Raud	450
Nikkel	590

Deformeeritud struktuuri kuumutamisel – **rekristalliseerival lõõmutamisel** (*recrystallization annealing*) – taastub esialgne kristallstruktuur, kasvab plastsus ja materjal on valmis järgneva deformeerimiseks.

Kui metalle deformeerida rekristallisatsioonitemperatuurist märgatavalt kõrgemal temperatuuril, siis sellist töötlust nimetatakse **kuum(surve)töötluseks** (*hot working*). Deformatsioon ja rekristallisatsioon võivad toimuda samaaegselt, võimaldades väga suuri deformatsioone ning lõpptulemusena pole metall karestunud.

2.3. SULAMID

2.3.1. Metallisulamite faasid

Sulam (*alloy*) on aine, mis on saadud kahe või enama komponendi kokkusulatamise või -paagutamise teel. Sulamit, mille põhikomponent (üle 50 %) on metalne, nimetatakse metallisulamiks.

Sulami komponentideks (*alloy components, alloy constituents*) nimetatakse aineid, mis moodustavad sulami.

Sulamisüsteem (*alloy system*) on mainitud komponentidest kõikide võimalike sulamite kogum (ka tasakaalus olevate faaside kogum).

Sulami faas (*alloy phase*) on lihtsustatult materjali teatud olek iseloomuliku struktuuri ja omadustega; täpsemalt – määratletud struktuur, sulamisüsteemi kõigi ühesuguse keemilise koostise ja ühesuguste füüsikaliste omadustega osade kogum, mida süsteemi teistest osadest eraldab piirpind.

Metallisulami ehitus on keerukam puhta metalli ehitusest ja oleneb sellest, kuidas toimivad omavahel kristalliseerumisel sulamit moodustavad komponendid. Sulami komponendid võivad vastastikku üksteises lahustuda, moodustades tardlahuseid või omavahel reageerida, moodustades keemilisi ühendeid. Kui lahustuvust ega keemilist reaktsiooni ei esine, võib struktuur koosneda üksikute komponentide mehaanilisest segust.

Tardlahused

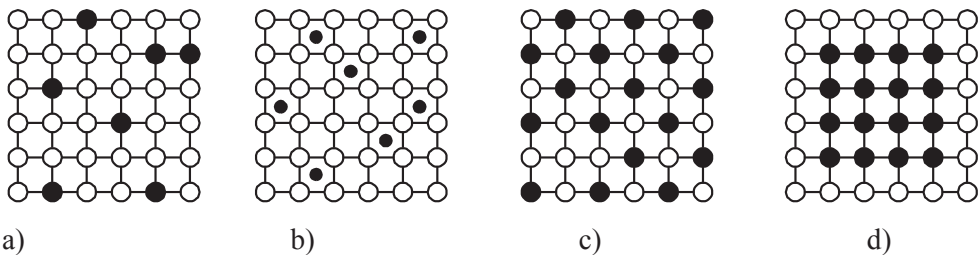
Enamikus metallisulameis lahustuvad komponendid vedelas olekus piiramatult, andes vedellahuseid. Komponentide lahustuvus üksteises võib jääda püsima ka tahkes olekus. Selliseid faase nimetatakse tahketeks lahusteks ehk tardlahusteks.

Tardlahuseks (*solid solution*) nimetatakse faasi, kus üks komponentidest (lahustaja) säilitab oma kristallivõre, teise (lahustunud) komponendi aatomid paigutuvad esimese (lahustaja) komponendi kristallivõresse, muutes selle perioodi. Tardlahused võivad olla kas asendus- või sisendustüüpi.

Asendustardlahuse (*substitutional solid solution*) korral asendavad lahustuva komponendi aatomid osa lahustajakomponendi aatomeid (Joonis 2.16a). Asendatud võib olla piiratud arv aatomeid – tegemist on **piiratud** ehk **mittetäieliku lahustuvusega** (*partial solubility, limited solubility*) või mis tahes hulk aatomeid – tegemist on **piiramatu** ehk **täieliku lahustuvusega** (*complete solubility, unlimited solubility*). Piiramatu asendustardlahuse tekkimise eeltingimuseks on:

- 1) komponentide tüübilt ühesugused kristallivõred;
- 2) komponentide ligilähedased aatomiraadiused (aatomiraadiuste erinevus $\Delta R < 15\%$).

Nähtust nimetatakse **isomorfsuseks** ja seda tüüpi tardlahused moodustuvad Ag-Au, Ni-Cu, Mo-W, V-Ti jt süsteemide sulameis.



Joonis 2.16. Tardlahuse aatomkristalne struktuur: a – asendustardlahus; b – sisendustardlahus; c, d – korrastustardlahus

Sisendustardlahuse (*interstitial solid solution*) korral paigutuvad lahustuva komponendi aatomid lahustajakomponendi kristallivõre eelkõige suurematesse tühikutesse (pooridesse), näiteks kristallivõre K12 korral kuubi keskele. Sisendustardlahuste korral paigutuvad lahustajakomponendi (näiteks Fe, Cr, Mo jt) kristallivõresse eelkõige väikese aatomiraadiusega mittemetalli aatomid (süsinik, lämmastik, vesinik jt) (Joonis 2.16b). Kuna tühikute (pooride) arv, kuhu võivad paikneda lahustunud komponendi aatomid, on piiratud, siis saavad sellised lahused olla ainult piiratud lahustuvusega.

Asendus- ja sisendustardlahuste korral on lahustunud komponentide aatomeid paigutus juhuslik (ebakorrapärane). Teatud tingimustel (aeglasel jahutamisel või kestval kuumutamisel) võivad aatomid asendustardlahuse kristallivõres paigutada ümber teatud korra järgi. Tekib **korrastunud tardlahus** ehk **korrastustardlahus** (*ordered solid solution, superlattice*), milles komponentide aatomite suhe on lihtne täisarvuline (näiteks 1:1; 1:2; 1:3 jne) (Joonis 2.16c ja d). Korrastustardlahust võib vaadelda tardlahuse ja keemilise ühendi vahepealse faasina: tal on tardlahusele omane lahustajakomponendi kristallivõre, samal ajal keemilisele ühendile omane komponentide aatomite korrapärase paigutus kristallivõres.

Näitena võib tuua Cu-Ni-, Cu-Au- jt sulamid, mille kristallivõredest tavaliste asendustardlahuste korral puudub aatomite kindel seaduspärane paigutus. Ühe või teise aatomi paiknemise tõenäosus kõnealuses sõlmpunktis oleneb eelkõige sulami koostisest. Teatud tingimustel (suur lahustunud komponendi sisaldus ja aeglane jahutamine) paigutuvad vase ja nikli või vase ja kulla aatomid kristallivõre kindlatesse sõlmpunktidesse.

Ka keemilise ühendi baasil võib tekkida tardlahus, millel on keemilise ühendi A_mB_n kristallivõre. Liigsed komponendi B aatomid (või ka kolmanda komponendi C aatomid) võivad asendada keemilise ühendi kristallivõres komponendi A (või ka B) aatomeid. Näiteks keemilise ühendi Fe_4B_2 baasil võib tekkida tardlahus, kus osa raua aatomeid võib olla asendatud kroomi aatomitega, osa boori aatomeid aga süsiniku aatomitega – saame tardlahuse $(Fe,Cr)_4(B,C)_2$. Kuna selliste tardlahuste teke on seotud tühikute tekkega kristallivõre sõlmedes, nimetatakse neid ka **vakants-tardlahusteks** (*vacancy solid solutions*).

Keemilised ühendid

Keemilist ühendit (*chemical compound*) iseloomustab erinevalt tardlahusest (a) komponentide kristallivõredest erinev kristallivõre, (b) komponentide aatomite korrapärane paigutus ja (c) lihtne täisarvkoradne suhe komponentide aatomite arvude vahel. Üldjuhul võib kahest komponendist koosnevat keemilist ühendit väljendada valemiga A_mB_n . Keemilist ühendit iseloomustab samuti kindel sulamistemperatuur ja hüppeline omaduste muutus olenevalt koostisest. Kristallivõret kooshoidvatest sidemetest lähtudes eristatakse kolme liiki keemilisi ühendeid: elektrokeemilised ühendid, sisendusfaasid ja elektronühendid; keemilisi ühendeid moodustavatest komponentidest lähtudes oksiide, intermetalliide, karbiide, nitriide, boriide. **Metallsetest ühenditest** (*metallic compounds*) ongi eelkõige huvipakkuvad karbiidid, nitriidid, boriidid ja intermetalliidid.

Karbiidid, nitriidid ja boriidid (*carbides, nitrides, borides*). Üleminekugrupi metallid (Fe, Mn, Cr, Mo, W jt) moodustavad väikese aatomiraadiusega mittemetallidega (C, N, B) sisendusfaasidena tuntud keemilisi ühendeid, kusjuures metalli (R_M) ja mittemetalli (R_X) aatomiraadiuste erinevus on suur ($R_M/R_X \geq 1,7$ või $R_X/R_M < 0,59$). Sisendusfaaside komponentide aatomite arvu suhe on lihtne täisarvkoradne ja selliste keemiliste ühendite valemiteks on M_4X , M_2X , MX , MX_2 jne (kus M – metall, X – mittemetall) ja nende kristallivõred on sarnased sisendustardlahuste kristallivõredest (tavaliselt esinevad võretüübid K8, K12 või H12). Sisendusfaase süsinikuga nimetatakse karbiidideks, lämmastikuga nitriidideks, booriga boriidideks jne. Tuntuimaks sisendusfaasiks rauasüsinikusulameis on Fe_3C (raudkarbiid), kus raua ja süsiniku aatomite suhe (baasaatomite suhe) on 0,60. Kui rauale on omane

kuupvõre (K8 või K12), süsinikule grafiidivõre, siis raudkarbiidi iseloomustab keerukas rombiline kristallivõre (selles on 12 raua- ja 4 süsinikuaatomit).

Oksiidid (*oxides*). Tugevalt elektropositiivsete ja -negatiivsete elementide vahel moodustuvad elektrokeemilised ühendid. Nende kristallivõred seisavad koos eelkõige ioon- või kovalentsidemetele tõttu, kusjuures komponendid teineteises ei lahustu. Metallid omavahel elektrokeemilisi ühendeid ei moodusta; nad annavad intermetalliide, sisendusfaase ja elektronühendeid, mida hoiavad koos metallisidemed. Aga metalli struktuuris võib esineda elektrokeemilisi ühendeid, ilma et sulamite metallilised omadused oleksid häiritud. Eelkõige võib siin märkida vase hapnikurikastes struktuurides olevaid oksiide (Cu_2O), hea lõiketöödeldavusega teraste struktuuris hajutatud sulfiide (MnS), millel on oma kristallivõre.

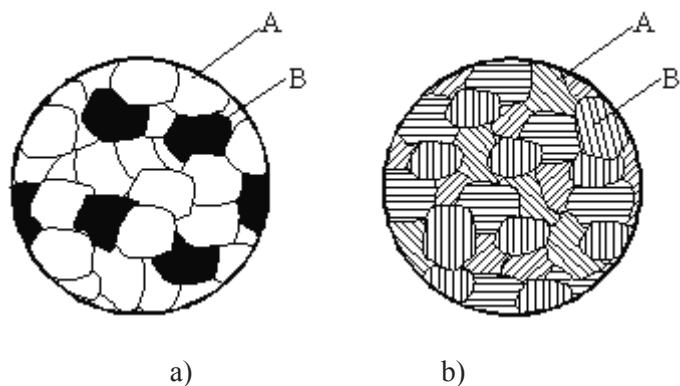
Intermetalliidid ehk **intermetalsed ühendid** (*intermetallic compounds, intermetallides*) moodustuvad erinevate metallide vahel. Metallide aatomite mõõtmete märgatava erinevuse korral (aatomiraadiuste suhe $>1,2$) moodustuvad sisendusfaasidena tuntud keemilised ühendid ehk Lavesi faasid, mille koostis avaldub valemiga AB_2 , näiteks MgZn_2 , MgCu_2 ja MgNi_2 ; atomeid kooshoidvaks sidemetüübiks on ioonide.

Kui metallide aatomiraadiused erinevad vähe, on kalduvus **elektronühendite** (*electronic compounds*) tekkimisele.

Elektronühendid moodustuvad sagedamini ühelt poolt ühevalentsete metallide (Cu, Ag, Au jt) ning üleminekugrupi metallide (Mn, Fe, Co jt) ja teisalt tavaliste kahekuni viievalentsete metallide (Be, Mg, Zn, Cd, Al) vahel.

Mehaanilised segud

Mehaaniliste segude (*mechanical mixtures*) korral koosneb sulam komponentide A ja B kristallidest (Joonis 2.17a). Kui niisuguses sulamis uurida komponentide A ja B kristallide omadusi üksikult, siis langeksid need ühte puhaste komponentide A ja B omadustega. Sagedamini esineb mehaaniliste segude korral struktuur, mille terades on vaheldumisi ühel ajal eraldunud tardfaasid (Joonis 2.17b). Sellist kihilise ehitusega segu nimetatakse **eutektikumiks** (*eutectic*) (kr *eutektos* – kergsulav), kui see tekib vedelast lahusest selle kristalliseerumise tulemusena, või **eutektoidiks** (*eutectoid*) (sõnast eutektikum + kr *eidōs* välimus, kuju – eutektikumikujuline), kui ta tekib tardlahuse ümberkristalliseerumise või lagunemise tulemusena.



Joonis 2.17. Mehaanilised segud sulameis: a – tavaline segu ja b – eutektn segu

Praktiliselt aga ei esine üldse metalle, mis tardolekus teineteises absoluutselt ei lahustu. Seda juhtu võib vaadelda, kui lahustuvus on väga väike.

2.3.2. Sulamite kristallisatsioon

Faasimuutused

Vedelas olekus lahustub enamik metalle üksteises piiramatult, moodustades ühtlase vedellahuse. Ainult üksikud metallid, näiteks raud ja tina, vask ja tina, ei lahustu vedelas olekus, moodustades kaks erinevat vedelfaasi kihti.

Sulamite üleminek vedelfaasist tahkesse toimub nagu puhastel metallidelgi, teatud allajahutusastme korral, kui tardfaasi vaba energia (*Gibbsi* energia) on väiksem vedelfaasi vabast energiast. Kristalliseerumine tähendab kristallisatsioonikeskmete tekkimist ja nende järgnevat kasvu.

Vedelfaasist tekivad tardfaasid erinevad koostiselt vedelast lähtefaasist. Seetõttu on püsivate kristallisatsioonikeskmete tekkimiseks vaja koostise kõrvalekaldeid sulami keskmisest koostisest vedelfaasi mikromahtudes. Sellised erineva koostisega alad (mikromahud) tekivad vedelfaasis aatomite difuusse liikumise tagajärjel, ja kui nende maht ületab kriitilise, tekivad püsivad kristallisatsioonikeskmed, mis on võimelised kasvama. Vedelfaasis olevad lisandid (modifikaatorid) soodustavad suure arvu kristallisatsioonikeskmete tekkimist.

Paljudes sulamites esinevad faasimuutused ka tardolekus – leiab aset ümberkristalliseerumine. Seda võivad põhjustada polümorfsetest muutustest või tardfaasi lagunemisest. Tardolekus faasimuutustel tekivad uu(t)e faasi(de) kristallisatsioonikeskmed, millele järgneb nende kasv.

2.4. KORDAMISKÜSIMUSED

1. Mida mõeldakse mikrostruktuuri all?
2. Millised on aatomist suuremad struktuuritasemed?
3. Millised on 3 aatomsidemete tüüpi ja milliseid aatomeid nad ühendavad?
4. Mis liiki aatomsidemed hoiavad koos intermetalliide? Mis on stöhhiomeetriline koostis?
5. Millised on metallisidemetega materjalide unikaalsed omadused?
6. Mis vahe on kristalsel ja amorfsel ainel?
7. Mis on kristallivõre? Võreelement?
8. Millised on metallide põhilised kristallivõred? Nende tähised?
9. Mis on polümorfism? Tooge näiteid.
10. Mis on kristallivõre pakketihedus? Milline on see kuupvõrede korral?
11. Missugused on põhilised kristalli (tera) kujud? Millised on nende kaju mõjurid?
12. Mida kirjeldab jahtumiskõver? Mis on allajahutusaste?
13. Kuidas kajastub jahtumiskõveral tardumine? Kuidas näeb välja kuumutuskõver?
14. Millised on põhilised (4) kristallivõre defektid?
15. Mis on dislokatsioon? Dislokatsioonide liigid?
16. Mis on elastne deformatsioon?
17. Mis on plastne deformatsioon?
18. Mis on kalestumine? Kuidas muutub tugevus ja plastsus kalestumisel?
19. Mis on rekristsallisatsioon? Rekristsallisatsioonitemperatuur metallide korral?
20. Mis vahe on sitkel ja hapral purunemisel?
21. Mille poolest erineb külm- ja kuumsurvetöötlus?
22. Mis on omaduste anisotroopia?
23. Mis on sulam? Millised tardfaasid esinevad sulameis?
24. Kuidas liigitatakse tardlahused? Milline on lahustuvus nende korral?
25. Millised on asendustardlahuste tekke eeldused ?
26. Millised on keemilise ühendi iseloomulikud omadused? Keemilise ühendi valem?
27. Millised (3) keemilised ühendid esinevad, lähtudes kristallivõret kooshoidvaist aatomsidemeist?
28. Millised (2) mehaanilised segud esinevad metallisulameis? Nende lähtefaasid?
29. Mille poolest erineb eutektoid eutektikumist?
30. Miks eelistatakse valusulameina eutektseid sulameid?

3. TASAKAALULISED FAASIDIAGRAMMID JA RAUD-SÜSINIK SÜSTEEM

3.1. SISSEJUHATUS	3.4. RAUD-SÜSINIK FAASIDIAGRAMM
3.2. KAHEKOMPONENTSED FAASIDIAGRAMMID	3.4.1. Raud ja süsinik
3.2.1. Faasidiagramm komponentide piiramatu lahustuvuse korral	3.4.2. Faasid rauasüsinikusulameis
3.2.2. Faasidiagramm komponentide piiratud lahustuvuse korral	3.4.3. Fe-Fe ₃ C faasidiagramm
3.2.3. Faasidiagramm komponentide mittelahustuvuse korral	3.5. TERASED JA LIHTSUSTATUD Fe-Fe ₃ C FAASIDIAGRAMM
3.2.4. Faasidiagrammid keemilise ühendi ja komponentide polümorfisimi korral	3.5.1. Lihtsustatud Fe-Fe ₃ C faasidiagramm
3.2.5. Faasidiagrammide kasutus	3.5.2. Faasimuutused terastes
3.3. KOLMEKOMPONENTSED FAASIDIAGRAMMID	3.6. MALMID
	3.6.1. Malmide liigitus
	3.6.2. Fe-C faasidiagramm
	3.7. KORDAMISKÜSIMUSED

3.1. SISSEJUHATUS

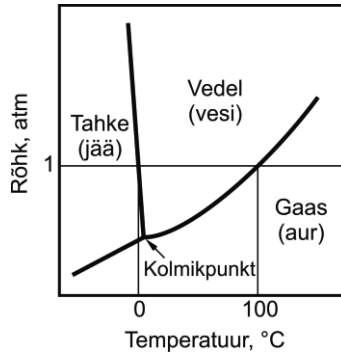
Tasakaaluline faasidiagramm on materjali või materjalisüsteemi loomulike muutuste graafiline väljendus, eeldades, et tasakaal on saavutatud kõikidele tingimustele vastavalt. On kolm põhilist muutujat: temperatuur, rõhk ja koostis.

Rõhu-temperatuuri (p - T) diagramm (*pressure-temperature diagram*) on lihtsaim faasidiagramm etteantud koostisega materjali korral. Diagrammi erinevad alad tähistavad erinevaid faase ning piirid nende vahel näitavad muutuste tasakaalu tingimusi.

Sissejuhatuseks vaatleme vee rõhu-temperatuuri diagrammi (Joonis 3.1).

Kindla koostisega vee (H₂O) diagramm määratleb vee püsivaid olekuid erinevatel temperatuuridel ja rõhkudel. Konstantsel rõhul määratlevad temperatuuri muutudes faasipiirid sulamis- ja keemistemperatuure. Näiteks atmosfäärsel rõhul 1 atm diagrammist lähtub, et vesi sulab 0 °C juures ja keeb 100 °C juures – antud temperatuurivahemikus on vesi vedelas olekus.

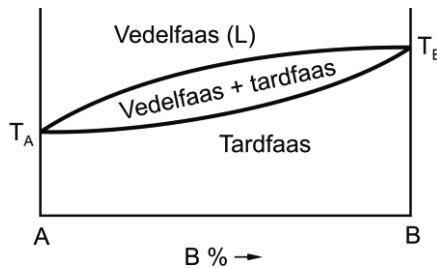
Madalamal rõhul esineb juhtum, kus vesi läheb tardolekust üle gaasilisse ilma vahepealse veeldumiseta. See punkt on tuntud kolmikpunktina.



Joonis 3.1. Vee rõhu-temperatuuri diagramm

Temperatuuri-koostise diagrammid

Kuigi vee p - T -diagramm on heaks sissejuhatuseks faasidiagrammidesse, kasutatakse insenerirakendustes p - T -faasidiagramme harva. Enamik tehnoprotsesse toimub atmosfäärirõhul ja muutujateks on eelkõige temperatuur ning koostis, pidades silmas sulameid ja lisandeid. Kasutatavam on temperatuuri-koostise faasidiagramm rõhul 1 atm. Diagrammi vertikaalteljel on temperatuur, horisontaalteljel aga koostis.



Joonis 3.2. Kahekomponentne süsteemi A-B faasidiagramm koordinaadistikus temperatuur-koostis

Joonisel 3.2 on süsteem A-B faasidiagramm, mille korral vasak püsttelg vastab puhtale komponendile A, komponendi B sisaldus (tavaliselt esitatakse kas aatomi- või massiprotsentides) kasvab vasakult paremale kuni puhta komponendini B diagrammi paremal püstteljel. Temperatuur T_A vastab komponendi A sulamistemperatuurile, temperatuur T_B – komponendi B sulamistemperatuurile. Tavaliselt vaadeldakse temperatuurivahemikke tardolekust vedela olekuni, kusjuures gaasiline olek on oluline harvade tehnoprotsesside korral. Faasidiagrammi koostamiseks vaadeldakse jahtumiskõveraid, määratakse erinevaid faasimuutuse temperatuure.

Jahtumiskõverad

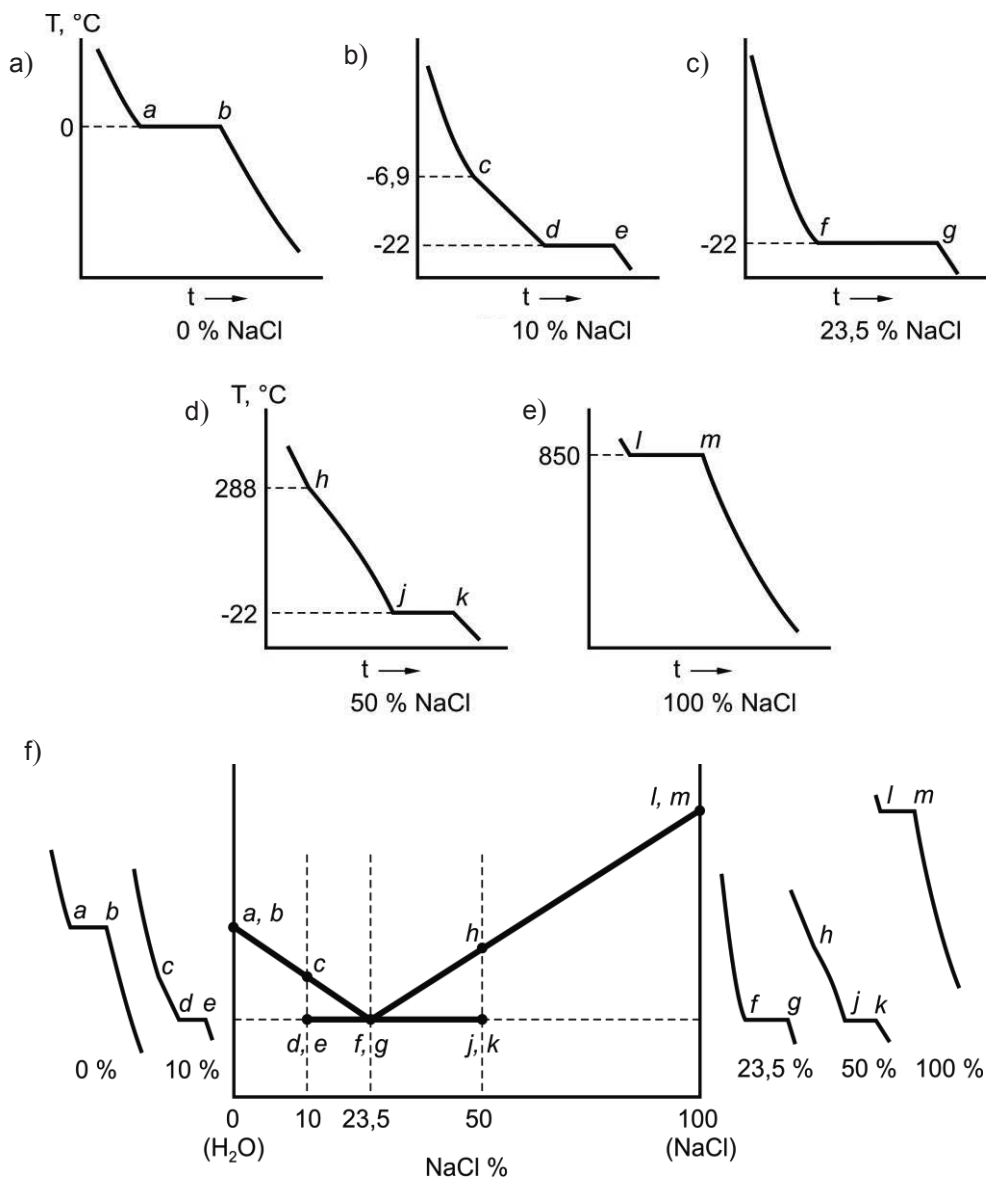
Põhilist informatsiooni faasidiagrammi koostamiseks saadakse kindla koostisega materjali kuumutamisel ja aeglasel jahutamisel. Fikseerides temperatuuri erinevatel ajamomentidel, saame nn **jahtumiskõvera** (*cooling curve*). Materjali muutused väljenduvad kriitiliste punktidenä jahtumiskõveral.

Vaatleme süsteemi NaCl (tavaline lauasool) ja vesi. Joonisel 3.3 on esitatud viis erinevat jahtumiskõverat a...e: puhas vesi, 10 % NaCl, 23,5 % NaCl, 50 % NaCl ja 100 % NaCl. Puhta vee korral jahutamisel peatub temperatuuri langus temperatuuril 0 °C – toimub muutus – üleminek tardolekusse (lõik a–b), kuni tardumine on lõppenud. Kõver b Joonisel 3.3 vastab vesilahuse 10 % NaCl jahtumisele. Vedelik jahtub punktini c, millest alates kõvera kalle väheneb.

Sellel temperatuuril hakkavad moodustuma väikesed jääkristallid (tahked osakesed). Jahtumise aeglustumine on seotud faasimuutusel vabaneva energiaga. Jääkristallide moodustumisega kaasneb NaCl kontsentratsiooni tõus järelejäänud lahuses ning tardumistemperatuur alaneb. Järgneval jahtumisel lisandub jää, mis omakorda viib tardumistemperatuuri alanemisele. Punktis e lõpeb tardumine – tekivad viimased vee ja soola kristallid. Edasine jahtumine toob kaasa kristallunud materjali temperatuuri alanemise.

Lahuse 23,5 % NaCl vees (kõver c, Joonis 3.3) (suurem soola kontsentratsioon) korral leiab tardumine aset kindlal temperatuuril. Veelgi suurema NaCl kontsentratsiooniga lahuse korral (kõver d, Joonis 3.3) on jahtumiskõvera kuju analoogne kõveraga b, kuid vahemikus h–j toimub eelkõige soolakristallide teke, millele järgneb NaCl lahuse tardumine konstantsel temperatuuril analoogselt puhta veega. Viimaseks on puhta soola jahtumiskõver (kõver e, Joonis 3.3), mis on analoogne puhta vee jahtumiskõveraga (Joonis 3.3a).

Kui nüüd kanda faasimuutuste punktid temperatuuri-koostise diagrammile, saame süsteemi vesi-NaCl faasidiagrammi (Joonis 3.3f). Joon a–c–f–h–l piiritleb lahuse vedela oleku ja nimetatakse likvidusjooneks, joon d–f–j vastab kolmefaasilisele reaktsioonile (sellest tuleb juttu hiljem), kahe joone vahel eksisteerivad kaks faasi (vedel ja tahke) samaaegselt.



Joonis 3.3. Soola-vee erinevate lahuste jahtumiskõverad (a...e) ja osaline faasidiagramm (f)

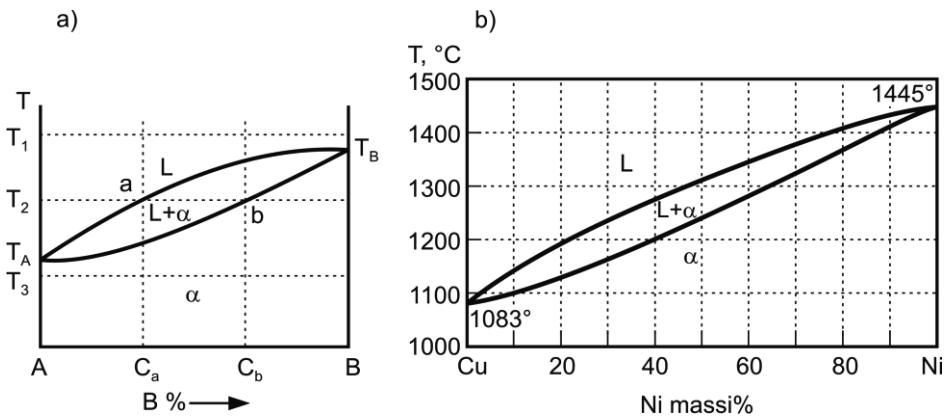
3.2. KAHEKOMPONENTSED FAASIDIAGRAMMID

3.2.1. Faasidiagramm komponentide piiramatu lahustuvuse korral

Komponentide A ja B omavahelise piiramatu lahustuvuse faasidiagramm on Joonisel 3.4a. Komponentid on teineteises täielikult lahustunud nii vedelas kui ka tardolekus.

Joonest $T_{Aa}T_B$ ehk **likvidusjoonest** (*liquidus line*) ülalpool on vedelfaas L . Joonest $T_{Ab}T_B$ ehk **solidusjoonest** (*solidus line*) allpool on püsiv tardlahus α . Likvidus- ja solidusjoone vahel on tasakaalus vedelfaas L ja tardlahus α .

Piiramatu lahustuvuse näiteks on süsteem Cu-Ni (annavad asendustardlahuseid). Cu-Ni faasidiagrammi korral (Joonis 3.4b) vedelas olekus (ülevälpool likvidusjoont) on Cu ja Ni teineteises piiramatult lahustunud, tardolekus (allpool solidusjoont) on meil tegemist Cu ja Ni piiramatu tardlahusega, kus Cu ja Ni aatomid on ühtlaselt paigutunud kogu kristallivõre ulatuses; kristallivõres asendavad Ni aatomid osa Cu aatomeid või vastupidi – olenevalt sellest, kumb kristallivõre prevaleerib (kumba komponendi aatomeid on rohkem, s.o üle 50 %).



Joonis 3.4. Faasidiagramm komponentide piiramatu lahustuvuse korral: a – süsteemi A-B faasidiagramm; b – sulamissüsteemi Cu-Ni faasidiagramm

3.2.2. Faasidiagramm komponentide piiratud lahustuvuse korral

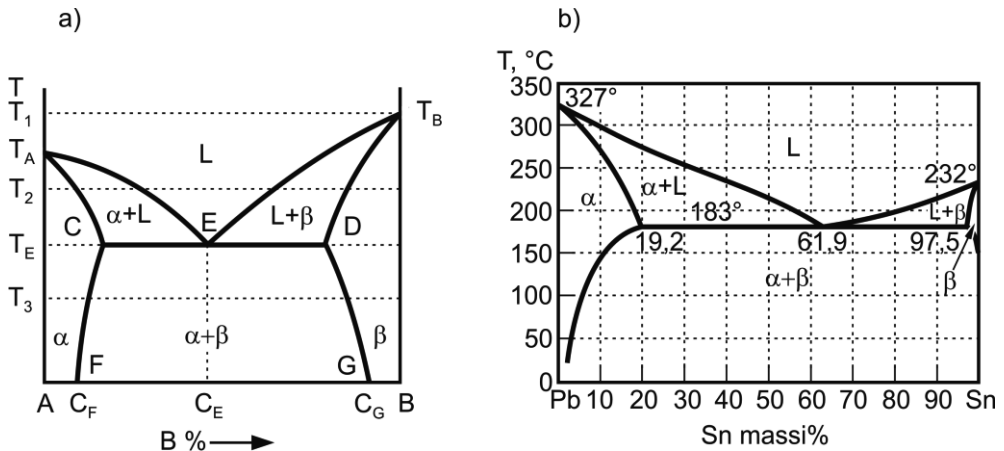
Metallisulameis esineb sagedamini piiratud lahustuvus. Piiratud tardlahuste korral esineb mitmeid faasidiagramme.

Joonisel 3.5 on faasidiagramm sulamite korral, mille komponendid moodustavad piiratud tardlahuseid ja milles esineb eutektmuutus.

Faasidiagrammil (Joonis 3.5a) joonest $T_{AE}T_B$ (likvidusjoon) ülalpool esineb vedelfaas L . Joonest $T_{ACED}T_B$ (solidusjoon) allpool on sulamites tardfaasid. Toatemperatuuril sulamites koostisega kuni punktini F on püsiv tardlahus α (komponendi B tardlahus komponendis A), sulamites koostisega punktist G vasakul tardlahus β (komponendi A tardlahus komponendis B), sulamites koostisega vahemikus F – G aga mõlema tardlahuse segu.

Likvidus- ja solidusjoone vahel on kaks stabiilset faasi: tardlahus (α või β) ja vedelfaas L . Temperatuuridel, millele vastab joon T_{AE} , algab tardlahuse α kristalli-

seerumine, temperatuuridel, millele vastab joon ET_B – tardlahuse β kristalliseerumine. Jooned T_AE ja ET_B iseloomustavad mitte ainult kristalliseerumise algtemperatuure, vaid ka komponentide A ja B lahustuvust vedelfaasis. Punkt C iseloomustab komponendi B piirahustuvust komponendis A, punkt D komponendi A piirahustuvust komponendis B temperatuuril T_E . Punktid F ja G iseloomustavad komponentide B ja A lahustuvust vastavalt komponentides A ja B normaaltemperatuuril. Seega iseloomustab joon CF komponendi B lahustuvust komponendis A ja joon DG komponendi A lahustuvust komponendis B olenevalt temperatuurist. Seetõttu nimetatakse jooni CF ja DG **lahustuvus-** ehk **solvusjoonteks** (*solvus lines*).



Joonis 3.5. Faasidiagramm komponentide piiratud lahustuvuse korral: a – süsteemi A-B faasidiagramm; b – sulamisüsteemi Pb-Sn faasidiagramm

Sulam, mille koostis vastab punktile E (Joonis 3.5a) kristalliseerub konstantsel **eutektmuutuse** (*eutectic transformation*) temperatuuril T_E . Vedelast faasist, mille koostis vastab punktile E, kristalliseeruvad välja ühel ajal tardlahuse α kristallid, mille koostis vastab punktile C ja tardlahuse β kristallid, mille koostis vastab punktile D



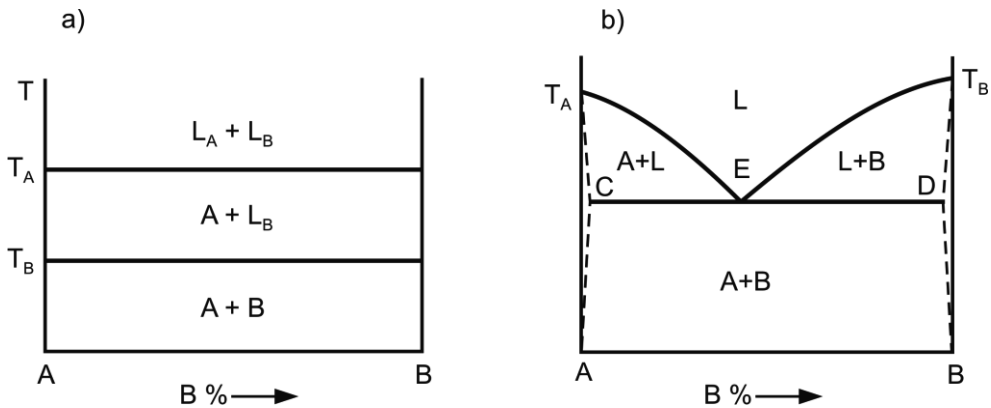
Sulamit, mis kristalliseerub jääval ja võimalikest sulamitest kõige madalamal temperatuuril ühel ajal kaheks faasiks (sel juhul tardlahusteks α ja β), nimetatakse **eutektseks sulamiks** (*eutectic alloy*). Vedelast faasist ühel ajal väljakristalliseerunud kahe või enama faasi segu nimetatakse **eutektikumiks** (*eutectic*), mis koosneb faaside peentest kristallidest.

Sulamid, mis paiknevad punktist F vasakul (Joonis 3.5a) ja punktist G paremal, kristalliseeruvad temperatuurivahemikus sarnaselt sulamitega, mis moodustavad piiramatuid tardlahuseid (Joonis 3.4).

Selline faasidiagramm esineb Pb-Sn süsteemi sulamite korral (Joonis 3.5b). Tina maksimaalne lahustuvus plii temperatuuril 183 °C on 19,2 %, plii lahustuvus tinas aga ainult 2,5 %; tegemist on kahe tardlahusega: tina tardlahus plii (α) ja plii tardlahus tinas (β). Temperatuuri alanedes väheneb tina lahustuvus plii oluliselt. Kui tina küllastunud tardlahust pliiis jahutada alla 183 °C, läheb ühefaasiline tardlahus üle kahe faasi $\alpha + \beta''$ sekuks, kuna tinarikas sekundaarne faas β'' eraldub tardlahusest.

3.2.3. Faasidiagramm komponentide mittelahustuvuse korral

Täieliku mittelahustuvuse faasidiagramm on Joonisel 3.6a. Komponentide esinemisel, mille lahustuvus teineteises on väike, võib lahustuvuse jätta arvestamata ja vaadelda süsteemi komponentide mittelahustuvuse faasidiagrammina (Joonis 3.6b). Teoreetiliselt pole võimalik faasidiagrammi selline kuju, kuid tal on praktiline tähtsus väga puhaste metallide korral.

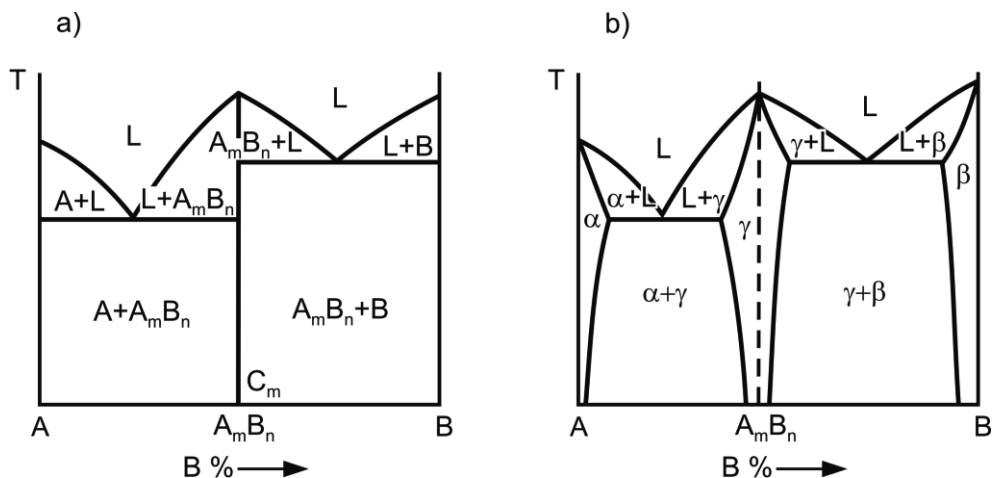


Joonis 3.6. Faasidiagramm komponentide mittelahustuvuse korral: a – täielik mittelahustuvus; b – tühine lahustuvus.

3.2.4. Faasidiagrammid keemilise ühendi ja komponentide polümorfismi korral

Faasidiagramm keemilisi ühendeid moodustavate komponentide korral

Nagu oli eespool juttu, võivad metallid moodustada rida keemilisi ühendeid: elektro-keemilisi ja elektronühendeid ning sisendusfaase. Keemiliste ühendite tekkimisel võib jagada faasidiagrammi osadeks, mille korral võib esineda nii piiramatult kui ka piiratud lahustuvus ja ka eutektno muutus. Joonisel 3.7a on faasidiagramm, kus komponendid moodustavad püsiva keemilise ühendi A_mB_n , mille sulamistemperatuur on kõrgem komponentide sulamistemperatuurist. Koostis C_m vastab keemilise ühendi stöhhiomeetrilisele koostisele.



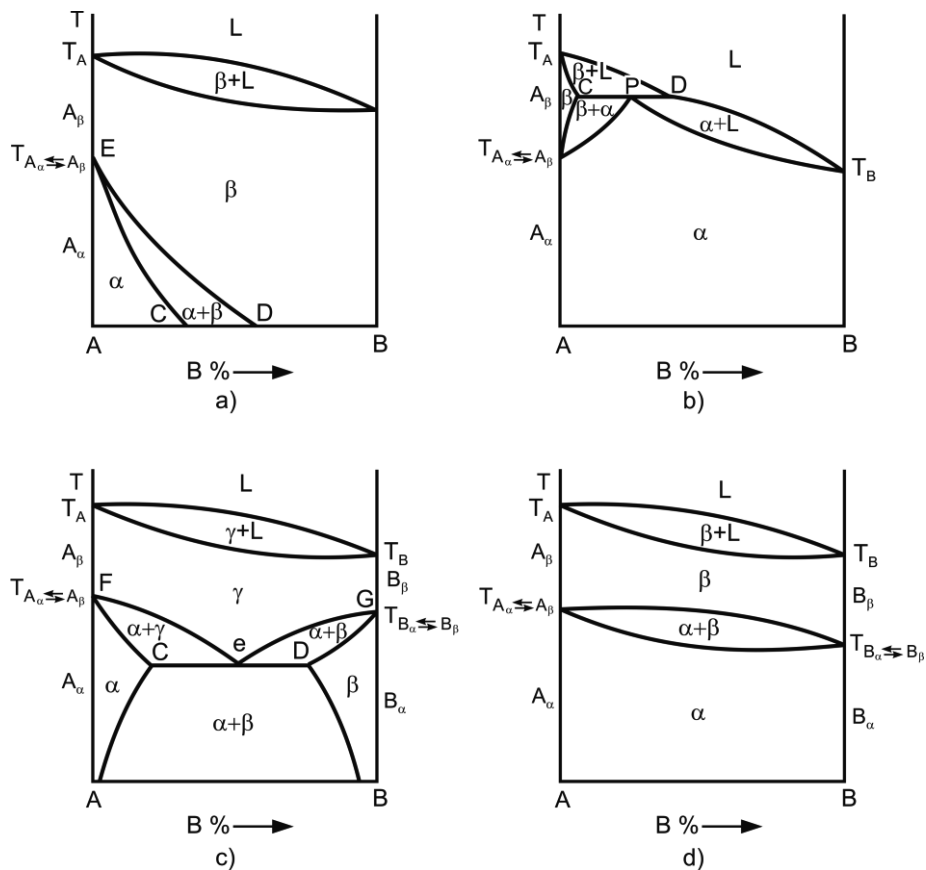
Joonis 3.7. Faasidiagrammid keemilisi ühendeid moodustavate komponentide korral: a – püsiva keemilise ühendi ja mittelahustuvuse korral; b – piiratud tardlahuste korral.

Joonisel 3.7b on esitatud aga faasidiagramm, kus nii komponendid A ja B kui ka keemiline ühend moodustavad piiratud tardlahused: tardlahus α (komponendi B tardlahus A-s), tardlahus β (komponendi A tardlahus B-s) ja tardlahus γ (komponendi A või B tardlahus keemilise ühendi baasil).

Faasidiagrammid komponentide polümorfismi korral

Polümorfised muutused (ühel või mõlemal komponendil) leiavad aset paljudes sulamites (raua-, titaani- jm sulamid), mistõttu faasidiagrammid polümorfismi korral pakuvad huvi.

Joonisel 3.8a ja b on sulamite faasidiagrammid, mille ühel komponendil (mainitud juhul komponendil A) on kaks polümorfset modifikatsiooni A_α ja A_β , kusjuures Joonisel 3.8a on faasidiagramm, kus kõrgtemperatuurised modifikatsioonid A_β ja B_β annavad piiramatu tardlahuse; Joonisel 3.8b on faasidiagramm, kus madalatemperatuurised modifikatsioonid A_α ja B_α annavad piiramatu tardlahuse.



Joonis 3.8. Faasidiagrammid komponentide polümorfismi korral: a – A_β on isomorfne B-ga; b – A_α on isomorfne B-ga; c – A_β on isomorfne B_β -ga; d – A_α ja A_β on isomorfssed B_α ja B_β -ga

Joonisel 3.8c ja d on sulamite faasidiagrammid, mille mõlemal komponendil on kaks polümorfset modifikatsiooni (A_α ja A_β ning B_α ja B_β). Joonisel 3.8c on faasidiagramm, kus kõrgtemperatuurised modifikatsioonid annavad piiramatu tardlahuse γ , madalatemperatuurised aga piiratud tardlahused α ja β . Temperatuuril T_e toimub eutektmuutusega sarnane muutus – **eutektoidmuutus** (*eutectoid transformation*)



kus lähtefaasiks on tardlahus γ koostisega C_e , lõpp-produktiks α ja β kristallide segu – **eutektoid** (*eutectoid*).

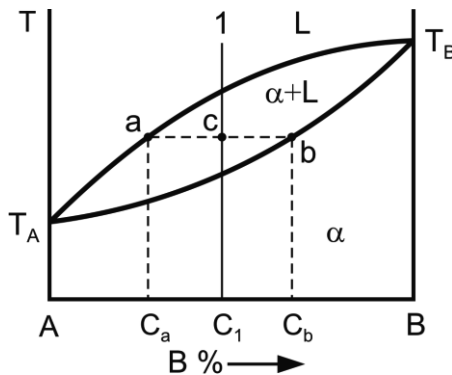
Joonisel 3.8d on faasidiagramm, kus nii kõrgtemperatuurised kui ka madalatemperatuurised modifikatsioonid annavad piiramatud tardlahused (vastavalt β ja α).

3.2.5. Faasidiagrammide kasutus

Faaside koostise ja koguse määramine

Faaside esinemine. Stabiilsed faasid antud koostisel ja temperatuuril on määratud faasidiagrammi vaadeldavus alas esinevate faasidega. Kehtib reegel, et kahe ühefaasilise ala vahel eksisteerib kahefaasiline piirnevate alade faasidega ala.

Faaside koostis. Selleks et määrata kahefaasilises alas (vaadeldaval juhul likvidus- ja solidusjoone vahel) kõnealusel punktis c (temperatuuril T_c) esinevate faaside koostist (kontsentratsiooni), tõmmatakse läbi selle punkti (temperatuuri) kontsentratsiooniteljega paralleeljoon (horisontaaljoon) (Joonis 3.9) kuni lõikumiseni faasidiagrammi kahefaasilist ala piiravate joontega (likvidus- ja solidusjoonega).



Joonis 3.9. Faaside koostise ja koguse määramine

Likvidusjoonega tekkiva lõikepunkti a projektsioon kontsentratsiooniteljel C_a määrab vedelfaasis komponentide sisalduse ning solidusjoonega tekkiva lõikepunkti b projektsioon kontsentratsiooniteljel C_b tardfaasi (tardlahuse α) komponentide sisalduse antud temperatuuril.

Faaside kogus. Kahefaasilises alas mainitud punktis c (temperatuuril T_c) esinevate faaside koguste määramiseks kasutatakse tekkivaid lõike ac ja cb (Joonis 3.9), mis on pöördvõrdelised selles alas ja temperatuuril esinevate faaside mahuliste või kaaluliste kogustega.

Vedelfaasi kogus temperatuuril T_c võrdub lõikude cb ja ab suhtega

$$L = \frac{cb}{ab} \cdot 100\%, \quad (3.3)$$

kus a ja b on vastavalt vedelfaasi ja tardfaasi keemilised koostised temperatuuril T_c , loetuna kontsentratsiooniteljel (C_a ja C_b); c aga vaadeldava sulami koostis (C_1).

Tardfaasi kogus temperatuuril T_c võrdub

$$\alpha = \frac{ac}{ab} \cdot 100 \% \quad (3.4)$$

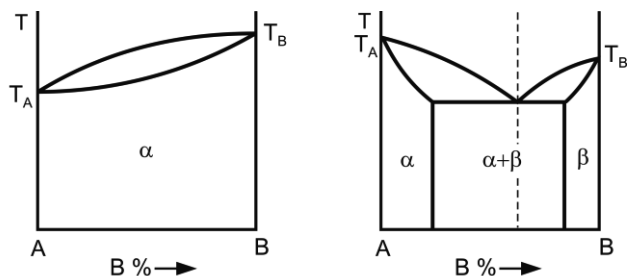
Seos faasidiagrammi ja sulamite omaduste vahel

Sulamite omadused olenevad suurel määral nende struktuurist, s.o faasilisest koostisest, mille üle saab otsustada faasidiagrammide põhjal. Siit eksisteerib seos faasidiagrammi kuju ja sulamite omaduste vahel.

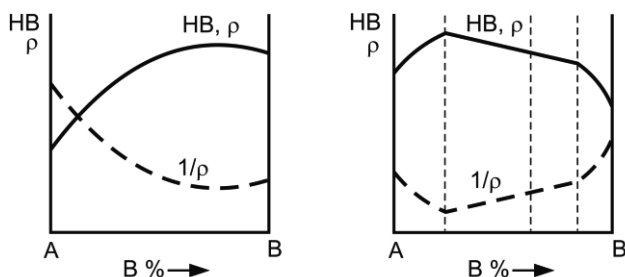
Tardlahuseid moodustavate sulamite omadused muutuvad olenevalt koostisest ühefaasilises alas kõverjoonelisel, kahefaasilises alas (segude korral) sirgjoonelisel (Joonis 3.10a ja b). Need seaduspärasused viitavad sellele, et tardlahuste korral nende omadused kas ületavad lähtekomponentide samasugused omadused (kõvadus HB , eritakistus ρ jt) või jäävad neile alla (näiteks elektrijuhtivus $1/\rho$).

Tardlahuse kõvaduse ja tugevuse suurenemist nende plastsuse säilimisel kasutatakse praktikas. Nii suureneb räni või mangaani lahustumisel rauas viimase tugevus kaks korda, plastsus väheneb aga ainult 10 %, alumiiniumi lahustumisel vases (kuni 5 %) suurendab sulami tugevust paar korda, plastsus aga jääb vase tasemele. Tardlahuseid iseloomustab ka rida teisi omadusi: nikli lahustumisel rauas (kuni 30 %) kaotab raud ferromagnetilised omadused; rauasulam, mis sisaldab üle 13 % kroomi, on korrosioonikindel. Seoses sellega on tardlahuse struktuuriga sulamid leidnud kasutamist nii konstruktsiooni- kui ka eriomadustega materjalidena.

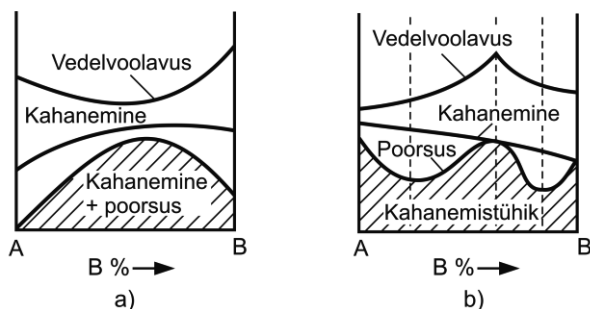
Faasidiagrammid pakuvad suurt huvi ka tehnoloogiliste omaduste seisukohalt. Ühefaasilised tardlahuse struktuuriga sulamid on hästi survetöödeldavad, kuid halvemini lõiketöödeldavad. Samuti on tardlahuse struktuuriga sulamid kehvade valuomadustega. Keemilised ühendid (karbiidid, nitriidid jt) on kõrge sulamistemperatuuriga, suure kõvaduse ja haprusega, mistõttu nad halvendavad sulamite lõike- ja survetöödeldavust, aga ka valuomadusi, mis on määratud eelkõige sulamistemperatuuri ja vedelvoolavusega. Vedelvoolavusele mõjub aga eelkõige kristallsatsioonivahemik, s.o likvidus- ja solidusjoone vahe (Joonis 2.27b): mida väiksem see on, seda parema vedelvoolavusega on sulam. Parimate valuomadustega on eutektsed või nendele koostiselt lähedased sulamid.



Füüsikalis-mehaanilised omadused



Valuomadused



Joonis 3.10. Faasidiagrammi kuju ja sulamite omaduste vaheline seos: a – piiramatu lahustuvus; b – piiratud lahustuvus

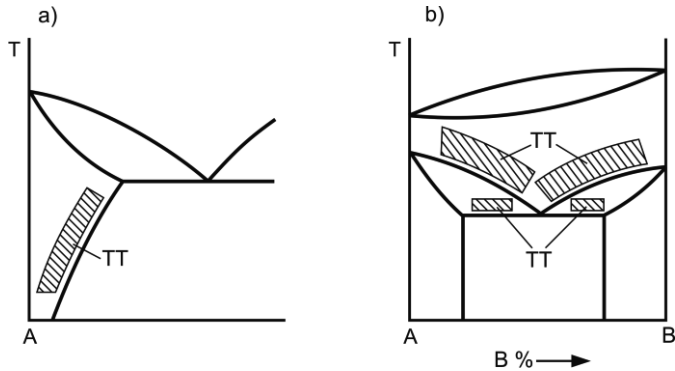
Seosed faasidiagrammi kuju ja sulamite omaduste vahel on sulamite omaduste prognoosimise alus, kuid nad kehtivad ainult tasakaaluolekus olevaile sulameile. Seetõttu on nende praktiline kasutamine piiratud.

Seos faasidiagrammi ja sulamite termotötluse vahel

Tugevdava termotötluse, mille eesmärgiks on metalli või sulamite omaduste muutmine struktuuri kaudu, eeldusteks on:

- lahustuvuse muutus tardolekus;
- faasimuutus tardolekus.

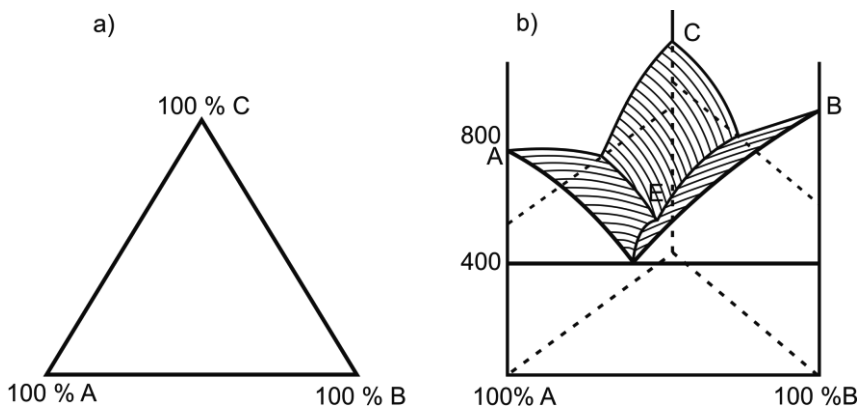
Viimaste üle saab otsustada just faasidiagrammide põhjal. Olgu siinjuures näiteks esitatud tardolekus piiratud lahustuvusega faasidiagrammi osa ja faasidiagrammi komponentide polümorfismi korral (Joonis 3.11). Sulamite termotötluse alad (temperatuurid) on viirutatud.



Joonis 3.11. Termotötluse alad piiratud lahustuvusega faasidiagrammi (a) ja faasidiagrammi komponentide polümorfismi korral (b) (viirutatult võimalikud termotötluse alad).

3.3. KOLMEKOMPONENTSED FAASIDIAGRAMMID

Kui süsteemi moodustavad kolm komponenti, siis ei saa kujutada sulami koostist tasapinnalise faasidiagrammina. Kontsentratsiooniteljed kolmekomponentse sulami faasidiagrammil moodustavad võrdkülgse kolmnurga (Joonis 3.12a), temperatuuriteljed aga ristjooned kontsentratsioonikolmnurgale – saame kolmemõõtmelise ruumilise faasidiagrammi. Kolme omavahel tardolekus mittelahustuva komponendi A, B ja C faasidiagramm on esitatud Joonisel 3.12b. Sellise kolmekomponentse süsteemi korral annab iga komponentide paar lihtsa eutektikumiga mittelahustuvuse faasidiagrammi, kolm komponenti aga kolmese eutektikumi. Kahekomponentsete faasidiagrammide likvidusjoontest saab ruumiline **likviduskõverpind** (*liquidus curved surface*), iga kahekomponentse faasidiagrammi eutektipunktist saab kolm eutektjoont, mis lõikuvad kolmikeutektipunktis E. Üks võimalus selle kirjeldamiseks kahedimensiooniliselt oleks eelkõige isothermiliste (horisontaal) ja polütermiliste (vertikaal) lõigete kasutamine.



Joonis 3.12. Kolmekomponentne faasidiagramm: a – kontsentratsiooni (koostise) tasand; b – eutektmuutustega faasidiagramm.

3.4. RAUD-SÜSINIK FAASIDIAGRAMM

3.4.1. Raud ja süsinik

Raud (*iron*) on metallidest tähtsaim, kuid puhtal kujul kasutatakse seda 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** (*iron-carbon alloys*), mis jagunevad järgmiselt:

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

Sellise jaotuse eesmärgiks oli algselt eristada survetöödeldavaid rauasüsinikusulameid mittesurvetöödeldavatest. Hilisem malmide areng on viinud malmi selliste liikideni, mida on võimalik mingil määral survetöödelda nii kuumalt kui ka külmalt.

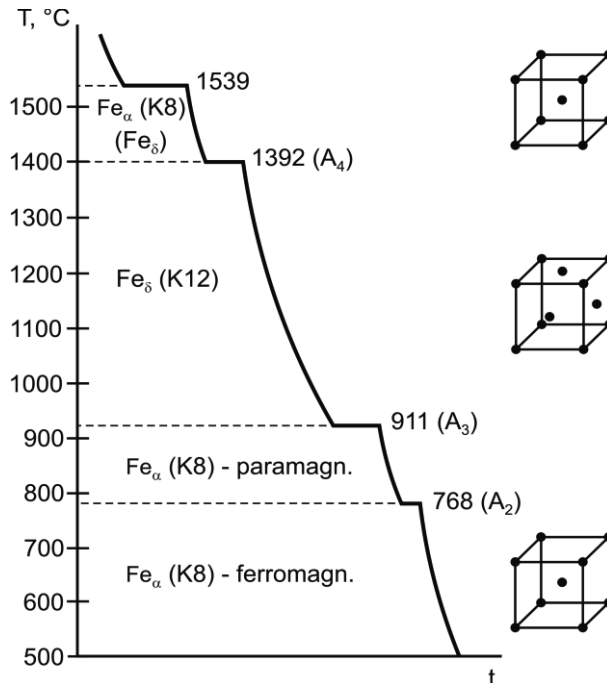
Peale süsiniku on terastes ja malmides alati teisi lisandeid, mis on jäänud sulameisse nende saamise käigus, nagu **tavalisandid** (*ordinary impurities*) või spetsiaalselt lisatud – **legerivad elemendid** (*alloying elements*). Nii sisaldab süsinikteras tavalisandina mangaani (kuni 1 %), räni (kuni 0,5 %), fosforit (kuni 0,05 %), väävlit (kuni 0,05 %); nende mõju võib olla märkimisväärne, kuigi süsinikteraste omadused on määratud eelkõige nende süsinikusisaldusega.

Mõnedes ikkagi terasteks nimetatud sulamites (nt roostevabad austeniitterased) on süsinik ebasoovitav ja selle sisaldust püütakse kõigi meetoditega vähendada. Omaette lisandite rühma moodustavad sellised elemendid nagu hapnik, vesinik ja lämmastik, mis satuvad teraste koostisse vähesel määral teraste tootmisel olenevalt

kasutatud toormest ja valmistamismeetodist – need on **juhulisandid** (*unintentional impurities*). Nende lisandite üsnagi suurt mõju, mida ei osata kohati seletada, võetakse arvesse terase tootmisel (vt. p 5.1.1. Rauametallurgia).

Malme iseloomustab peale suurema süsinikusisalduse suur ränisisaldus (1...3 %). Räni peamine mõju on selles, et koos süsinikuga soodustab ta grafiidi eraldumist, selle asemel et esineda malmis lahustunult või karbiididena. Lisaks ränile sisaldavad malmid võrreldes terastega rohkem fosforit (0,1...0,2 %), parandades malmide valumadusi, eelkõige vedelvoolavust.

Teraste ja malmide kõrval on kasutatakse tehnikas mitmeid selliseid rauasulameid, mis ei sisalda süsinikku. Ühtekokku valmistatakse tööstusele tohutul hulgal erinevaid rauasulameid – üle 10 000 margi. Raua ja rauasulamite puhul on oluline mitte ainult nende rohke kasutus ja omaduste mitmekesisus, vaid ka nende suhteliselt madal hind. Erinevate sulatus- ja töötlusmeetodite abil saadakse üha uusi sulameid vastukäivate omaduste kombinatsioonidega. Selle teeb võimalikuks raua polümorfism. Joonisel 3.13 on raua jahtumiskõver, millest nähtub, et raual on kaks polümorfset kuju: α -raud (Fe_α) ruumkesendatud kuupvõrega (K8) ja γ -raud (Fe_γ) tahkkesendatud kuupvõrega (K12). Raua aatomiraadius on piires 0,124...0,127 nm, kristallivõre periood aga 0,287 nm (K8). Temperatuurid 911 °C (tähistatakse A_3 -ga) ja 1392 °C (A_4) on raua polümorfse muutuse temperatuurid.



Joonis 3.13. Puhta raua jahtumiskõver ja kristallivõred

Raua polümorfsete modifikatsioonide (α - ja γ -raua) vaba energia oleneb temperatuurist nii, et α -raua vaba energia on väiksem alla 911 °C ja üle 1392 °C, samal ajal kui γ -raua vaba energia on väiksem nende temperatuuride vahemikus. Seega on γ -raud stabiilne (püsiv) temperatuurivahemikus 911...1392 °C, α -raud omakorda 911 °C-st allpool ja 1392 °C-st ülevalpool. Puhta raua põhilised omadused on Tabelis 3.1.

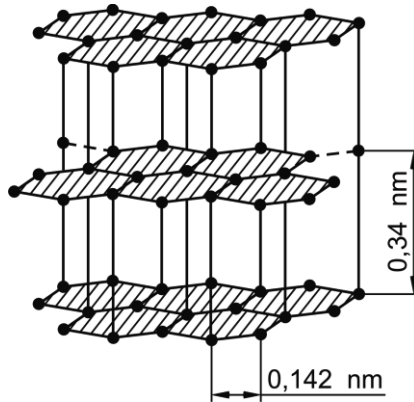
Tabel 3.1. Puhta raua (99,9 % Fe) põhiomadused

Omadus	Tähis	Väärtus
Sulamistemperatuur	$T_s, ^\circ\text{C}$	1539
Kristallivõre	–	K8 (0...911 °C ja 1392...1539 °C) K12 (911...1392 °C)
Tihedus	$\rho, \text{g/cm}^3$	7,86
Normaalelastsusmoodul	$E, \text{N/mm}^2$	$210 \cdot 10^3$
Tõmbetugevus	$R_m, \text{N/mm}^2$	250...400
Eritakistus 20 °C	$\rho, \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	$13 \cdot 10^{-8}$
Soojusjuhtivus	$\lambda, \text{W/m} \cdot \text{K}$	80
Joonpaisumistegur	$\alpha, 1/\text{K}$	$12 \cdot 10^{-6}$
Korrosioonikindlus	–	Väga hea

Raua polümorfism ulatub ka tema sulamitesse, kusjuures sulami komponentide mõju raua omadustele põhineb suurel määral just komponentide mõjul raua polümorfsetele muutustele.

Süsinik (*carbon*) võib esineda mitmel kujul – tuntumalt **grafiidina** (*graphite*) ja **teemandina** (*diamond*), vähem tuntumalt **grafeenina** (*graphene*), **fulleriinidena** (*fullerines*) ja **süsiniknanotorudena** (*carbon nanotubes, CNT*). Rauasüsiniku-sulamites on vabas olekus süsinik grafiidi kujul – kristallivõre grafiidivõre H3. Grafiidi kristalne struktuur on kihiline (Joonis 3.14). Ühes kristallograafiatasandis asuvate süsinikuaatomite vaheline kaugus on 0,142 nm, tasanditevaheline kaugus aga 0,340 nm. Süsiniku aatomiraadius on 0,154 nm. Süsiniku aatomi neljast valents-elektronist läheb ainult üks elektrongaasi, mis põhjustab grafiidi mõningaid, tõsi küll, nõrgalt avalduvaid metalseid omadusi (näiteks tema elektrijuhtivus).

Grafiidi sulamistemperatuur on 3500 ... 3800 °C, tihedus *ca* 2,2 g/cm³; grafiidi tugevus on väike (4–5 korda väiksem raua omast) ja ta on habras.



Joonis 3.14. Grafiidi kristallivõre

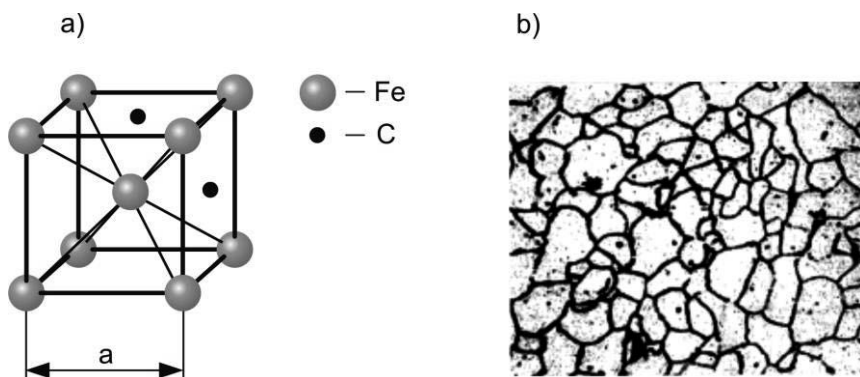
3.4.2. Faasid rauasüsinikusulameis

Raud moodustab süsinikuga rida metalseid tardfaase: piiratud tardlahuseid (ferriit, austeniit) ja keemilisi ühendeid (Fe_3C jt). Toatemperatuuril on kõikide tasakaaluliste rauasüsinikusulamite struktuuriosadeks ferriit ja tsementiit, kõrgemal temperatuuril (üle 727°C) lisandub neile ka austeniit.

Ferriit (*ferrite*) (F) on süsiniku tardlahus α -rauas. Tehakse vahet madalatemperatuurse ferriidi (α -ferriidi) ning kõrgtemperatuurse ferriidi (δ -ferriidi) vahel. Esimene eksisteerib temperatuurivahemikus $0\dots911^\circ\text{C}$, teine $1392\dots1539^\circ\text{C}$ (Tabel 3.2). Kuna huvi pakub eelkõige madalatemperatuurne ferriit, peame edaspidi ferriidi puhul silmas seda.

Ferriit on sisendustardlahus, mis moodustub süsinikuaatomite paigutumisel α -raua ruumkesendatud kuupvõre tühikutesse, eelkõige tahkudel olevaisse. Kuna tühikute mõõtmed on tunduvalt väiksemad süsinikuaatomite läbimõõdust (tühikute maksimaalne läbimõõt on $0,062\text{ nm}$, süsinikuaatomi läbimõõt $0,154\text{ nm}$), on süsiniku lahustuvus α -rauas äärmiselt väike: temperatuuril 727°C $0,02\%$, toatemperatuuril ainult $0,01\%$. Ferriit on sitke ja hästi deformeeritav nii kuumalt kui ka külmal. Tema kõvadus toatemperatuuril on $60\dots90\text{ HB}$. Külmdeformeerimisel kalestub ferriit nagu puhtad metallidki ja tema kõvadus kasvab märgatavalt. Ferriit on ferromagnetiline kuni Curie temperatuurini, s.o kuni 768°C .

Ferriidi kristallivõre ja mikrostruktuur on esitatud Joonisel 3.15.

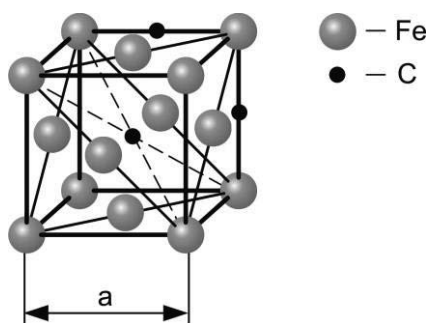


Joonis 3.15. Ferriidi kristallivõre (a) ja mikrostruktuur (b)

Austeniit (*austenite*) (A) on samuti raua ja süsiniku sisendustardlahus; süsiniku aatomid on asetunud γ -raua tahkkesendatud kuupvõre aatomitevahelistesse tühikutesse. Tühikute mõõtmed võrreldes ruumkesendatud kuupvõreaga on suuremad (maksimaalne läbimõõt on 0,102 nm), millest tuleneb süsiniku palju suurem lahustuvus γ -rauas võrreldes α -rauaga – kuni 2,14 % temperatuuril 1147 °C (Tabel 3.2).

Kuigi austeniit pole stabiilne madalatel temperatuuridel (alla 727 °C), võib ta säilida kiirel jahutamisel suure süsinikusisaldusega terastes ka toatemperatuuril. Suurest C-sisaldusest tulenevalt on austeniidi kõvadus ferriidi kõvadusest suurem, näiteks C-sisaldusele 1,5 % vastab kõvadus 150 HB. Nagu teisedki tahkkesendatud kuupvõre metallid, on austeniit sitke ja hästi deformeeritav nii kuumalt kui ka külmalt. Austeniit on mittemagnetiline.

Austeniidi kristallivõre on Joonisel 3.16.



Joonis 3.16. Austeniidi kristallivõre

Tsementiit (T) ehk **raudkarbiid** (*cementite, iron carbide*) (Fe_3C) on raua ja süsiniku keemiline ühend, mis sisaldab 25 aatomiprotsenti ehk 6,67 massiprotsenti süsinikku. Ebastabiilse faasina laguneb tsementiit kõrgetel temperatuuridel (üle 1300 °C), nii et tal ei ole sõna otseses mõttes kindlat sulamistemperatuuri. Kuna C-aatomi läbimõõt

on 63 % Fe-aatomi läbimõõdust, muutub tsementiidi korral kristallivõre rombiliseks. Kristallivõre koosneb reast teatud nurga all paiknevast oktaeedrist, mille keskmes paikneb C-aatom. Kuna iga raua aatom kuulub ühel ajal kahele oktaeedrile, siis kõigi oktaeedrite süsinikuga täitumise korral kehtib suhe $Fe/C = 3/1$. Siit tulenevalt ei ole tsementiidi kristallivõres nihkepindu ja seetõttu on tsementiit habras ja väga kõva (820 HB), kõige kõvem süsinikterastes esinevatest faasidest (Tabel 3.2).

Tabel 3.2. Rauasüsinikusulamite faaside määratlused

Nimetus	Tähis	Kristallivõre	Määratlused
Ferriit	F	K8	C sisendustardlahus α -rauas ($Fe_{\alpha}(C)$). Maksimaalne C-lahustuvus temperatuuril 727 °C on 0,02 %, toatemperatuuril 0,01 % (kõrgtemperatuurisel ferriidil on maksimaalne C-sisaldus 0,1 %)
Austeniit	A	K12	C sisendustardlahus γ -rauas ($Fe_{\gamma}(C)$). Maksimaalne C-lahustuvus temperatuuril 1147 °C on 2,14 %, temperatuuril 727 °C 0,8 %
Tsementiit	T	Keerukas rombiline	Fe ja C habras ja kõva keemiline ühend – raudkarbiid (Fe_3C). C-sisaldus 6,67 %

3.4.3. Fe-Fe₃C faasidiagramm

Pidades silmas asjaolu, et raud moodustab süsinikuga püsiva keemilise ühendi raudkarbiidi (Fe_3C), lähtutakse rauasüsinikusulamite vaatlemisel faasidiagrammist Fe-Fe₃C, s.o kuni 6,67 % süsinikuni (Joonis 3.17).

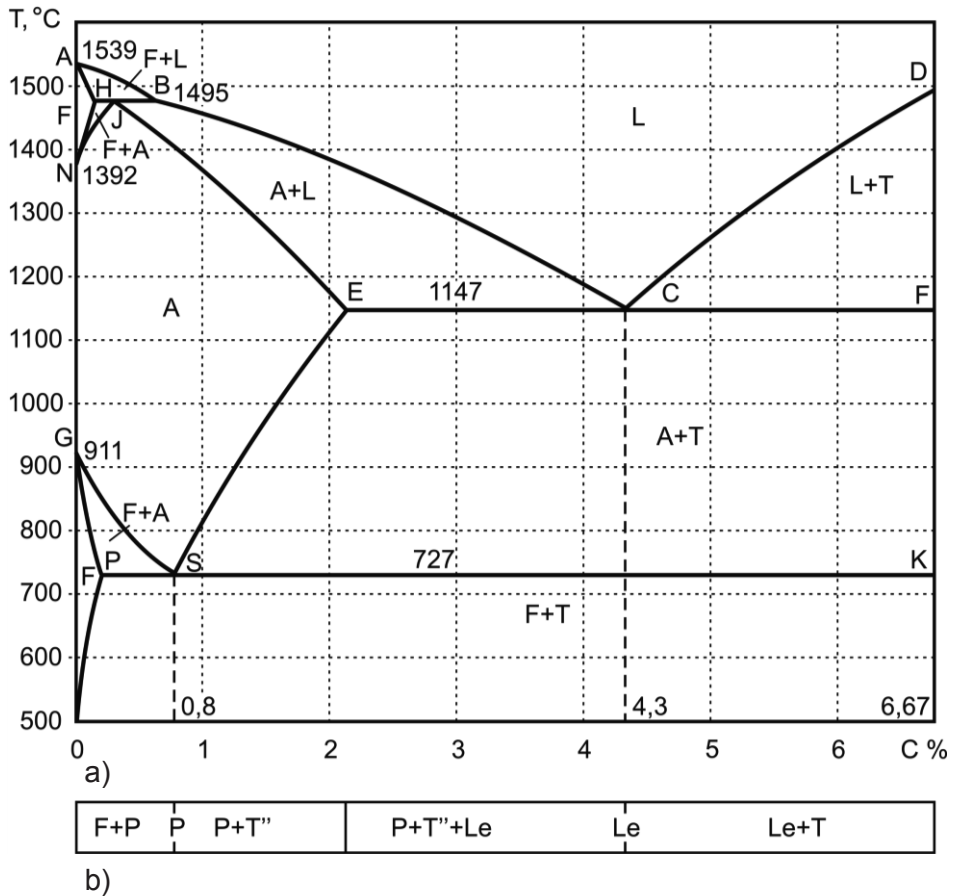
Kuigi Fe-Fe₃C faasidiagrammi on põhjalikult uuritud, ei olda tema kõikide detailide suhtes jõutud täielikule selgusele ilmselt seetõttu, et uuritud sulamites on olnud muutuv hulk lisandeid. See puudutab nii Fe-Fe₃C faasidiagrammi temperatuure kui ka teraste süsinikusisaldust iseloomustavate punktide koordinaate (alati on terastes mingi kogus lisandeid, mis mõjutavad neid).

Nagu nähtub faasidiagrammist (Joonis 3.17) ja jättes kõrvale väheolulise kõrgtemperatuurse ferriidi ala, on süsteemis Fe-Fe₃C kaks olulist muutust:

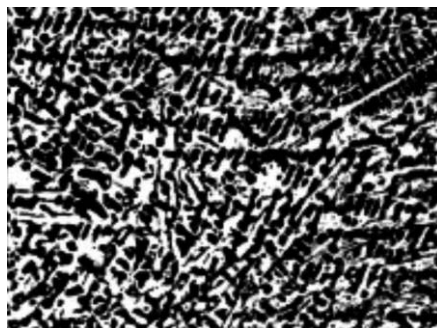
1. **Eutektmuutus** (*eutectic transformation*). Temperatuuril 1147 °C on samaaegselt vedelfaas (L), austeniit (A) ja tsementiit (T). Temperatuuri langedes vedelfaas, mille koostis vastab punktile C (4,3 %), tardub eutektmuutuse



tulemusena austeniidi ja tsementiidi seguks – eutektikumiks, mida nimetatakse **ledeburiidiks** (*ledeburite*) (Le) (Joonis 3.18).



Joonis 3.17. Fe-Fe₃C faasidiagramm (a) ja sulamite struktuuri osad toatemperatuuril (b)



Joonis 3.18. Eutektstruktuur (ledeburiit) (suurendus 100 korda)

Tsementiit moodustab ledeburiidis ühte matriksi. Sel põhjusel on ledeburiit samuti kui tsementiitki kõva ja habras, mille tõttu ledeburiiti sisaldavad sulamid pole

survetöödeldavad. Neid tuntakse valgemalmidena ja kasutatakse valandite valmistamiseks.

2. **Eutektoidmuutus** (*eutectoid transformation*). Temperatuuril 727 °C on samaaegselt A, F ja T. Temperatuuri langedes austeniit, mille koostis vastab punktile S (0,8 % C), laguneb eutektoidmuutuse



tulemusena ferriidi ja tsementiidi seguks – eutektoidiks, mida nimetatakse **perliidiks** (*pearlite*) (P). Austeniidist eutektoidmuutuse tulemusena tekkinud perliit on kihilise struktuuriga – vaheldumisi paiknevad ferriidi ja tsementiidi lamellid (Joonis 3.19), kusjuures perliidis oleva ferriidi kogus ületab tsementiidi koguse, mistõttu on tegemist ferriitse maatriksiga, mis on pidev kogu struktuuri ulatuses. Kuna ferriit on hästi survetöödeldav ning ühtlasi ka perliidi põhimassiks, siis on perliitki sitke ja survetöödeldav, kuigi ferriidist märgatavalt kõvem. Allajahutamisel temperatuurideni 400...500 °C ja enam moodustub eutektoidmuutuse tulemusena austeniidist disperssem ferriidi ja tsementiidi segu, mis on tuntud beiniidina, millest tuleb juttu p. 4.3.1.



Joonis 3.19. Eutektoidstruktuur (perliit) (suurendus 500 korda)

Kuna austeniidi lagunemisel tekkivat struktuuri mõjutab oluliselt allajahutusaste (või temperatuur, mille juures austeniit laguneb), siis on terase omadusi võimalik mõjutada jahutamiskiirusega. Seetõttu on austeniidi lagunemine jahutamisel või selle teke kuumutamisel terase termotötluse alus. Tabelis 3.3 on näidatud ka rauasüsinikusulameis esinevate mehaaniliste segude (ledeburiit, perliit) tähistused ja määratlused.

Tabel 3.3. Rauasüsinikusulamites esinevate mehaaniliste segude määratlused

Nimetus	Tähis	Määratlus
Ledeburiit	Le	Eutektnne segu C-sisaldusega 4,3 %, mis tekib vedelfaasi kristalliseerumisel temperatuuril 1147 °C. Kuni temperatuurini 727 °C koosneb ledeburiit A ja T, alla 727 °C – F ja T
Perliit	P	F ja T eutektoidne segu C-sisaldusega 0,8 %, mis tekib A lagunemisel selle aeglasel jahutamisel alla 727 °C

Faasidiagrammist (C-sisaldusest) (Joonis 3.17) lähtudes liigitatakse rauasüsinikusulamid kahte suurde rühma:

- terased ($C \leq 2,14 \%$);
- malmid ($C > 2,14 \%$).

3.5. TERASED JA LIHTSUSTATUD Fe-Fe₃C FAASIDIAGRAMM

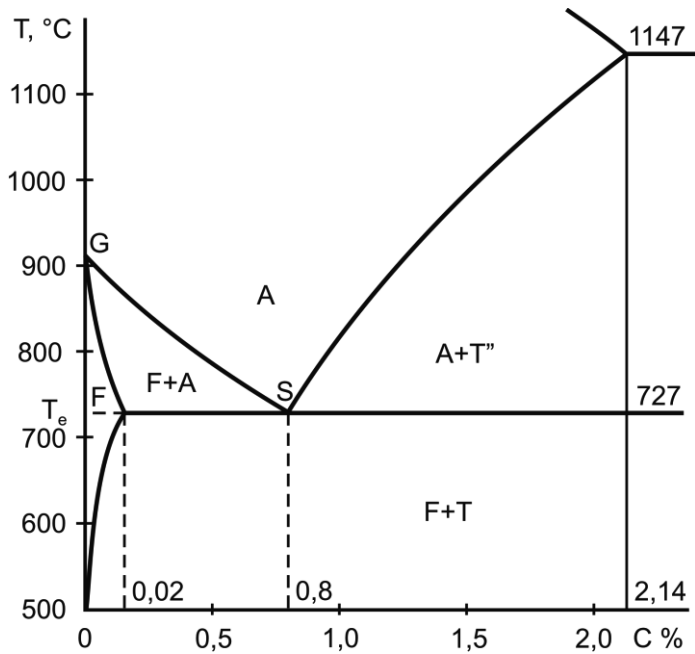
3.5.1. Lihtsustatud Fe-Fe₃C faasidiagramm

Kui meid huvitab terastena tuntud materjaligrupp, võime Joonisel 3.17a esitatud faasidiagrammi oluliselt lihtsustada. Faasidiagrammi ala peritektmuutuse piirkonnas (kõrgtemperatuurse (*ca* 1500 °C) ferriidi ala) on väheoluline; suure süsinikusisaldusega sulamite ala (üle eutektnse koostise, s.o 4,3 % C) kuulub malmide piirkonda. Jättes välja need kaks teraste korral huvi mittepakkuvat ala ning keskendudes eutektoidmuutusele, võime kasutada lihtsustatud raud-süsiniku faasidiagrammi (faasidiagrammi alumist vasakut osa, Joonis 3.20), mis võimaldab mõista teraste omadusi ja töötlemisel toimuvaid protsesse.

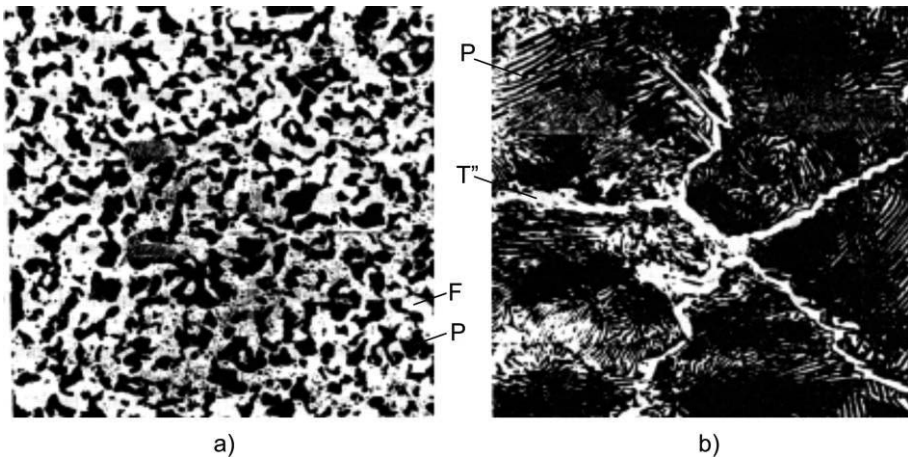
Süsinikusisaldusest (faasidiagrammist) lähtudes (Joonis 3.20) on teraste liigitus omakorda järgmine:

- **alaeutektoidterased** (*hypoeutectoid steels*) $C < 0,8 \%$. Struktuur koosneb ferriidist ja perliidist (Joonis 3.21a).
C-sisalduse 0,2 % korral on ferriidi ja perliidi koguste suhe $(F)/(F+T) = (0,8-0,2)/(0,2-0,02) \approx 3:1$. Teiselt poolt kasutatakse ferriidi ja perliidi koguste suhet terase C-sisalduse määramiseks, kuna see on mikroskoobi abil suhteliselt kergesti eristatav;
- **eutektoidterased** (*eutectoid steels*) $C = 0,8 \%$. Struktuur on puhas perliit (vt Joonis 3.19). Praktikas ettetulevatel jahtumiskiirustel moodustub perliitstruktuur ka eutektoidsest C-sisaldusest pisut erinevatel koostistel;
- **üleutektoidterased** (*hypereutectoid steels*) $0,8 < C \leq 2,14 \%$. Struktuur koosneb perliidist ja sekundaartsementiidist (Joonis 3.21b). Kuna sekundaartsementiit eraldub austeniidist terade piiridele, siis moodustub tsementiidi võrk

austeniiditerade või jahutatuna allpool eutektoidmuutuse joont perliiditerade vahele.



Joonis 3.20. Lihtsustatud Fe-Fe₃C faasidiagramm



Joonis 3.21. Alaeutektoid- (a) ja üleutektoidterase (b) struktuur (suurendus 200 korda)

Kirjeldatud struktuuride põhjal võib teha üldisi järeldusi eri rühmadesse kuuluvate rauasüsinikusulamite omadustest. Aeglaselt jahtuvatena on alaeutektoid- ja eutektoid-

terased, mille struktuuris võivad esineda vaid ferriit ja perliit, piisavalt sitked selleks, et neid võib vähemal või suuremal määral survetöödelda külmalt. Üleeutektoidterased on haprad struktuuris esineva tsementiidivõrgu tõttu, eriti kui sekundaartsementiit on eraldunud jämeteralisest austeniidist. Sellised terased on külmalt survetöödeldavad alles pärast seda, kui tsementiidivõrk on kõrvaldatud kas kuumsurvetöötlemise või termotöötlemise teel.

3.5.2. Faasimuutused terastes

Perliitmuutus (*pearlitic transformation*). Austeniidi lagunemise ja sellest perliidi moodustamise tulemusena koosneb süsinikteraste tasakaalustruktuur madalatel temperatuuridel (alla 727 °C) ferriidi ja tsementiidi segust, kõrgetel temperatuuridel aga austeniidist. Seega toob temperatuuri muutus nii kuumutamisel kui ka jahutamisel alati kaasa ka struktuuri muutusi, kui ületatakse faasipiirid.

Temperatuuri langedes alla 727 °C muutub austeniit ebapüsivaks ja hakkab lagunema ferriidi ja tsementiidi seguks (perliidiks) eutektoidmuutuse



tulemusena. Eriti tuleb tähendada, et toatemperatuuril või sellele lähedastel temperatuuridel esinev terase struktuur on tekkinud austeniidi lagunemise tulemusel. Kui termotöötlemise viimase etapi temperatuur ei ulatu austeniidi alasse (s.o üle 727 °C), onoleb lõplik struktuur varasemast austeniidi lagunemisest. Seega on austeniidi lagunemine teraste termotöötlemisel toimuvate protsesside detailse käsitlemise aluseks.

Perliidis oleva ferriidi- ja tsementiidilamellide vahekaugusel on otsustav mõju perliidi mehaanilistele omadustele. Perliidi kõvadus suureneb ferriidilamellide õhenedes, mistõttu madalamatel temperatuuridel moodustunud tihelamelne (0,1 µm) perliit on kõvem (ca 400 HB) kui kõrgematel temperatuuridel moodustunud hõrelamelne (0,4 µm) perliit (kõvadus on ainult 200 HB). Reguleerides perliidi tekke temperatuuri eelkõige jahtumiskiiruse või otse isotermilise töötlemisega, võime mõjutada eutektoidterase omadusi. Kiirem jahutamine, mis viib tihelamelise perliidi tekkele, parandab terase tugevusomadusi võrreldes aeglaselt jahutatud terasega.

Austeniitmuutus (*austenitic transformation*). Sarnaselt rauasüsinikusulamite jahutamisel toimuvate muutustega toimuvad faasimuutused sulamite struktuuris ka kuumutamisel üle faasipiiride. Kuumutades terast üle temperatuuri 727 °C, leiab aset perliitmuutusele vastupidine muutus



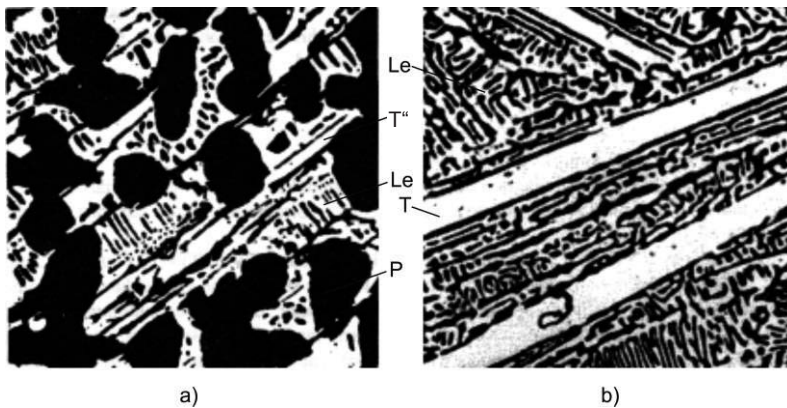
mille tulemusena tekib austeniit. Kuumutamisega kaasnev protsess – **austeniititsatsioon** (*austenitization*) on terase termotöötlemise esmaprotsessiks/operatsiooniks, millele järgneb kontrollitud jahutamine soovitava struktuuri saamiseks.

3.6. MALMID

3.6.1. Malmide liigitus

Süsinikusisaldusest (faasidiagrammist) (Joonis 3.17) lähtudes võib malme liigitada järgmiselt:

- **alaeutektmalmid** (*hypoeutectic cast iron*) $2,14 < C < 4,3$ %. Tardumise lõppedes koosneb vedelfaasist sündinud struktuur austeniidist ja ledeburiidist. Temperatuuri langedes eraldub austeniidist sekundaartsementiiti ja ülejäänud osa austeniidist laguneb eutektoidmuutuse temperatuuril 727 °C perliidiks. Aeglase jahtumise tulemusena koosneb seega struktuur toatemperatuuril ledeburiidist, perliidist ja sekundaartsementiidist (Joonis 3.22a);
- **eutektmalmid** (*eutectic cast iron*) $C = 4,3$ %. Tardumise tulemusena tekib ainult ledeburiit ja selle austeniitne osa laguneb eespool kirjeldatud kujul (valem (3.7)) temperatuuri langedes. Eutektmalmi struktuur on Joonisel 3.18;
- **üleutektmalmid** (*hypereutectic cast iron*) $C > 4,3$ %. Struktuur koosneb primaartsementiidist ja ledeburiidist. Üleutektmalmi struktuur on Joonisel 3.22b.



Joonis 3.22. Alaeutekt- (a) ja üleutektmalmi (b) struktuur (suurendus 500 korda)

Alaeutektsed ja rohkem süsinikku sisaldavad malmid on igal juhul haprad nii toa- kui ka kõrgetel temperatuuridel struktuuris esineva ledeburiidi tõttu. Erijuhtudel võib ledeburiiti muuta grafiidiks, mille tulemusena alaeutektmalm muutub mingil määral survetöödeldavaks.

Esitatud teraste ja malmide liigitus puudutab ka selliseid sulameid, kus raua ja süsiniku kõrval esineb veel teisi komponente. Sel juhul muutuvad liigituse aluseks olevad süsinikusisaldusega seotud arvud.

3.6.2. Fe-C faasidiagramm

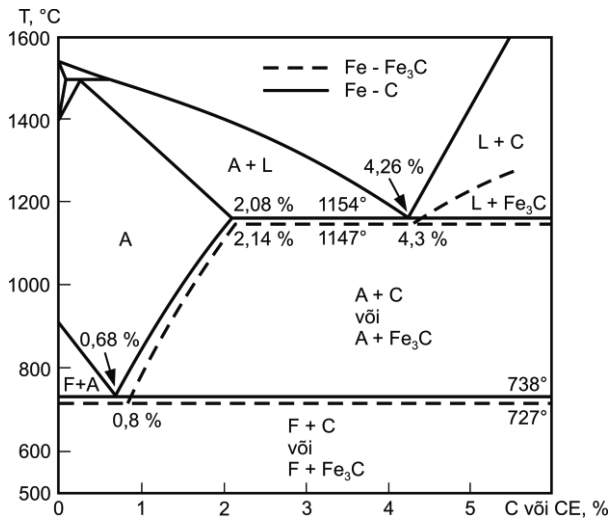
Vaadeldes Fe-Fe₃C faasidiagrammi malmide osa, peame silmas pidama, et suurem osa kasutatavaid malme sisaldavad arvestataval määral räni. Malmid sisaldavad tavaliselt 2...4 % süsinikku, 0,5...3 % räni ja vähesel määral mangaani (alla 1 %) ja väävlit (alla 0,2 %). Ränil on oluline roll metallurgiaprotsessides (vt p 5.1.1.) ja mõju malmi omadustele (tõstab korrosiooni- ja oksüdatsioonikindlust).

Kuna räni asendab osaliselt süsinikku, peame Fe-Fe₃C diagrammil C-skaalal süsiniku asendama süsinikekvivalendiga (CE), mis võrdub

$$CE = C \% + 1/3 Si \% \quad (3.9)$$

Kasutades süsinikekvivalenti, saame vaadelda kolmekomponentset Fe-C-Si faasidiagrammi kahekomponentse faasidiagrammina malmide sulamistemperatuuride ja mikrostruktuuride kirjeldamiseks.

Räni soodustab süsinikurikka faasi – grafiidi teket tsementiidi (Fe₃C) asemel. Seega on kaks võimalikku eutektmuutuse skeemi, nagu nähtub faasidiagrammilt Joonisel 3.23.



Joonis 3.23. Fe-C faasidiagramm kahe võimaliku C-rikka faasi korral: Fe-Fe₃C (- - - - kriipsjoon) ja Fe-C (— pidevjoon)

3.7. KORDAMISKÜSIMUSED

1. Mis liiki vastuseid küsimustele saate faasidiagrammi põhjal?
2. Mis on tasakaaluline faasidiagramm?
3. Miks ei sobi rõhu-temperatuuri diagrammid tehnorakendusteks?
4. Mis on jahtumiskõver?
5. Millised jahtumiskõvera iseärasused viitavad muutustele materjali olekus/struktuuris? Millest on tingitud jahtumiskõvera horisontaalosa? Mida väljendab kalle sellel?
6. Mis koordinaadistikus koostatakse kahekomponentsed faasidiagrammid?
7. Mis muutused leiavad aset likvidusjoonel? Solvusjoonel?
8. Mis on lahustuvuse piir? Kuidas muutub see temperatuuri tõusuga? Mida iseloomustab solvusjoon?
9. Selgitage mõisteid piiramatult lahustuvus, piiratud lahustuvus, mittelahustuvus.
10. Milles seisneb eutektmuutus? Mis on eutektikum?
11. Kuidas näeb välja eutektstruktuur?
12. Miks on eutektkoostisega sulamid olulised valamise/jootmise seisukohalt?
13. Millist reeglit kasutatakse sulami komponentide koostise määramiseks faasidiagrammi kahefaasilises alas?
14. Kuidas määrata faasidiagrammi kahefaasilises alas faaside kogust?
15. Kuidas muutuvad sulamite omadused tardlahuste korral?
16. Mis informatsiooni annab faasidiagramm sulamite termotöötuse seisukohalt?
17. Millised (3) tardfaasid eksisteerivad Fe-C-sulameis?
18. Milline on C lahustuvus ferriidis? Austeniidis?
19. Miks pakub austeniit huvi sulamite vormitavuse seisukohalt?
20. Miks vaatleme Fe-C faasidiagrammi käsitlemisel Fe-Fe₃C faasidiagrammi?
21. Millest lähtudes jagatakse Fe-Fe₃C faasidiagrammil sulamid terasteks ja malmideks?
22. Milline faasimuutus Fe-Fe₃C faasidiagrammil on oluline teraste puhul? Milles see seisneb?
23. Millised mehaanilised segud esinevad Fe-C-sulameis? Tooge faasimuutuste skeemid.
24. Mis on perliit? Kirjeldage struktuuri.
25. Millised on alaeutektoidterase struktuuriosad (aeglasel jahtumisel moodustuvad)?
26. Millised on üleutektoidterase struktuuriosad (aeglasel jahtumisel moodustuvad)?
27. Kuidas liigitatakse malmid kooskõlas faasidiagrammiga? Nende struktuuriosad?
28. Millised elemendid lisaks Fe ja C on suuremates kogustes malmides?
29. Mis on süsinikekvivalent malmides? Kuidas see määratakse?
30. Millised C-rikkad faasid on võimalikud malmides?

4. TERMOTÖÖTLUS

4.1. SISSEJUHATUS	Terase noolutus
4.2. PROTSSESSITERMOTÖÖTLUS	Läbikarastuvus
4.2.1. Terase protsessitermotöötlus	Terase pindtugevdus
Lõõmutus	Termokeemiline töötlus
Normalisatsioon	Terase termomehaaniline töötlus
Sferoidisatsioon	Terase külmaga töötlus
4.2.2. Mitterauasulamite protsessitermotöötlus	4.3.2. Mitterauasulamite tugevdav termotöötlus
4.3. TUGEVDAV TERMOTÖÖTLUS	Sadestuskõvenemine
4.3.1. Terase tugevdav termotöötlus	Alumiiniumisulamite termotöötlus
Austeniidi lagunemine	4.4. KORDAMISKÜSIMUSED
Martensiitmuutus	
Terase karastus	

4.1. SISSEJUHATUS

Paljusid tehnomaterjale ei iseloomusta ainult kindlad omadused, vaid need on varieeruvad olenevalt kasutatavatest tehnoloogiatest. **Termotöötlus** (*heat treatment*) on termin, mida kasutatakse kirjeldamiseks materjalide kontrollitud kuumutust ja jahutust eesmärgiga muuta nende struktuuri ja omadusi. Samu materjale on võimalik valmistada madala tugevusega ja plastsetena, tagamaks nende hea töödeldavuse, seejärel materjale/tooteid töödeldes suurendada tugevust ja saavutada hea vastupanu purunemisele nende kasutamiseks.

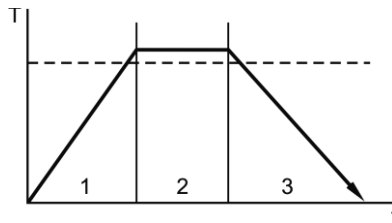
Termotöötlus on kasutatavam tootmisprotsess, mis toote kuju muutmata võimaldab muuta nii materjali füüsikalisi kui ka mehaanilisi omadusi, nagu tugevus, sitkus, töödeldavus, kulumiskindlus ja korrosioonikindlus. Termin termotöötlus haarab ainult protsesse, kus kuumutus ja jahutus viiakse läbi eri eesmärgiga muuta omadusi, samas kui kuumutus ja jahutus on ka teiste tootmisprotsesside, nagu kuumvormimine või keevitus osa. Samas võib termotöötlus olla integreeritud teistesse tootmisprotsessidesse, tagamaks tõhusamaid tulemusi. Selles peatükis vaadeldakse nii termotötluse aluseid kui ka kasutatavamaid termotötlusprotsesse. Kuna 90 % kõikidest termotötlustest puudutavad teraseid ja ülejäänud rauasulameid, on neile pööratud ka põhitähelepanu.

4.2. PROTSESSITERMOTÖÖTLUS

Sagedasti peetakse termotöötlustest rääkides silmas protsesse, mis tõstavad materjali tugevust, kuid see haarab ka teise grupi protsesse, mis on tuntud **protsessitermotöötlusena** (*process heat treatment*). Neid viiakse sageli läbi eesmärgiga valmistada ette materjale nende töötluks, näiteks lõiketöödeldavuse parandamiseks, vormimisjõudude vähendamiseks või plastuse tagamiseks edaspidiseks töötlemiseks.

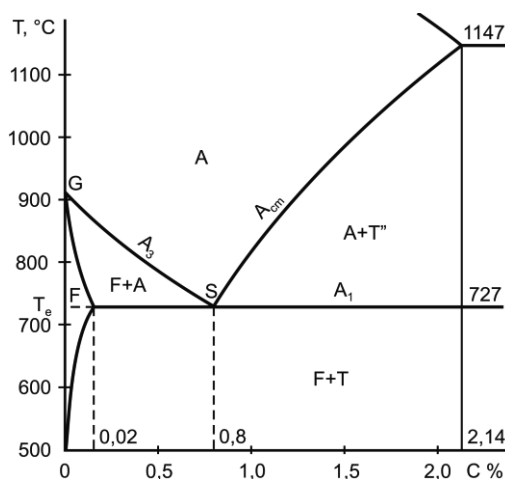
4.2.1. Terae protsessitermotöötlus

Terae termotöötluste, nii nagu igasuguse termotöötluste, eesmärgiks on metalli omaduste muutmine struktuuri muutmise teel ja see seisneb kuumutamises (1), seisutamises (2) etteantud temperatuuril ja jahutamises (3) (Joonis 4.1).



Joonis 4.1. Termotöötluste graafik koordinaadistikus temperatuur-aeg

Terae struktuuris oleva austeniidi lagunemisel tekkivate struktuuride mitmekesisus teeb võimalikuks teraste omaduste laia varieerumise nende termotöötlustel. Termotöötlustega võib muuta nii terase mehaanilisi, tehnoloogilisi kui ka talitusomadusi. Terae termotöötluste temperatuuride valikul on aluseks lihtsustatud Fe-Fe₃C faasidiagramm (Joonis 4.2).



Joonis 4.2. Lihtsustatud Fe-Fe₃C faasidiagrammi teraste osa koos faasimuutuste joontega A_1 , A_3 ja A_{cm}

Faasidiagrammil (Joonis 4.2) on ka võtmefaasimuutuste jooned. Eutektoidmuutuse joon on tähistatud A_1 -ga; joon A_3 on austeniidi ja ferriidi-austeniidi alade vaheliseks piiriks; joon A_{cm} iseloomustab tsementiidi teket austeniidist (eralduspiir austeniidi ja austeniidi-tsementiidi alade vahel).

Lähtudes faasipiiridele A_1 ja A_3 vastavatest temperatuuridest ning jahutuskiirusest, on terase termotöötamise põhimoodusteks lõõmutus, normalisatsioon, karastus, noolutus ja külmaga töötlus; eraldi grupid moodustavad termokeemiline ja termomehaaniline töötlus.

Lõõmutus

Lõõmutus ehk **lõõmutamine** (*annealing*) on termotöötamise protsess/operatsioon, kus terast kuumutatakse üle faasimuutuste temperatuuride A_1 , A_3 , A_{cm} või üle T_{rek} järgneva aeglase jahutamisega, tavaliselt ahjus. Lõõmutus on tavaliselt esmane termotöötlemise viis, mille eesmärgiks on kas kõrvaldada kuumtöötlemise eelmiste operatsioonide (valamise, sepistamise jne) defekte või valmistada struktuuri ette järgnevateks operatsioonideks (näiteks lõiketöötlemiseks või karastamiseks). Üsna sageli on aga lõõmutamine lõplik termotöötlemise operatsioon 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 difusioonlõõmutust, täis- ehk tavalõõmutust, madallõõmutust jt.

Difusioonlõõmutus

Homogeniseerivat lõõmutust ehk **difusioonlõõmutust** (*diffusion annealing, homogenizing*) kasutatakse eelkõige legeerterasest valuplokkide ja valandite keemilise koostise ühtlustamiseks. Koostise ebaühtlust põhjustab eelkõige karbiidne ja dendriitne likvatsioon, mis on tingitud legeerivate elementide kuhjumisest karbiidide kristallisatsioonikeskmesse ja dendriitide keskossa. Keemilise koostise ühtlustamiseks kuumutatakse valuplokke või valandeid kõrgete temperatuurideni, mille juures keemiliste elementide aatomite liikuvus (difusioonikiirus) on suur. Selle tulemusel paigutuvad aatomid neist kohtadest, kus kontsentratsioon on suurem, kohtadesse, kus kontsentratsioon on väiksem – leiavad aset difusiooniprotsessid. Sellise difusiooni tulemusena ühtlustub valuploki või valandi keemiline koostis. Et tagada aatomite vajalikku difusioonikiirust, lõõmutatakse teraseid temperatuuril kuni 1100 °C, seisutusaeg 10...20 h. Kuumutus temperatuurideni 1000...1100 °C ja pikaajaline seisutus sellel põhjustavad austeniiditera tunduvalt kasvamist – struktuur muutub jämetaliseks. Samuti väheneb pärast sellist termotöötlust erinevus üksikute terade

keemilises koostises. Seetõttu on nõutav täiendav termotöötluste operatsioon struktuuri peenendamiseks (täis- või poollõõmutus).

Täislõõmutus

Täislõõmutuse ehk **tavalõõmutuse** (*full annealing, true annealing*) eesmärk on sepiste ja valandite struktuuri peenendamine ning sisepingete kaotamine. Alaeutektoidteraste korral kuumutatakse täislõõmutamisel terast üle faasipiiri A_3 , millele järgneb aeglane jahutamine. Alaeutektoidterase ferriitperliitstruktuur muutub kuumutamisel austeniidiks ning jahutamisel tekib ümberkristalliseerumisel austeniidist uuesti ferriit ja hõrelamelne perliit.

Sellise termotöötluste tulemusena saadakse sageli valamisel ja sepistamisel tekkinud jämeteralisest ferriitperliitstruktuurist peeneteralisem ferriitperliitstruktuur.

Terase kuumutamisel üle faasipiiri A_3 tekivad perliidis kõigepealt peened austeniidi kristallisatsioonikeskmed, mis vastavalt temperatuuri tõusule järjest kasvavad. Kui temperatuuri tõsta ainult 30...50 °C üle A_3 ja hoida sepi või valandit sellel temperatuuril, siis ei kasva austeniiditera suureks. Jahutades nüüd terast vähemalt 30 °C allapoole faasipiiri A_1 , saame ühtlase ja peeneteralise ferriitperliitstruktuuri. Seejuures moodustub austeniiditera sees mitu perliiditera, mis on tunduvalt väiksemad kui austeniiditera, millest nad tekkisid.

Alaeutektoidteraste lõõmutamisel üle faasipiiri A_1 , kuid alla A_3 – **poollõõmutusel** (*non-full annealing*) pürgivad perliidis olevad tsementiidiosakesed sferoidiseeruma. Lõõmutusaega reguleerides on võimalik saada struktuur, kus osa tsementiiti on muutunud terajaks, s.t struktuur pole pehmenenud kogu ulatuses. Sagedamini kasutatakse aga eespool vaadeldud täislõõmutuse asemel termotöötlust, mis seisneb kuumutamises üle A_3 ja kiires allajahutamises 500...600 °C-ni edasise aeglase jahutamisega toatemperatuurini. Teraja struktuuri saamiseks võib täislõõmutusel kasutada ka lühiajalist, terajate karbiidide teket soodustavat seisutust temperatuurist A_1 veidi allpool.

Suurema süsinikusisaldusega terase (0,5 % ja enam) kuumtöötlemise ja ka normaliseerimise tulemusena moodustub struktuur, mis on liiga kõva nii külmi- kui ka lõiketöötlemiseks. Nimetatud juhtudel ja teraste korral kasutatakse madalamatemperatuursemat lõõmutust – terast kuumutatakse tavaliselt üle faasipiiri A_1 , millele järgneb aeglane jahutus. Selle tulemusena saadakse üleutektoidteraste struktuuris terajad (sferoidaalsed) tsementiidiosakesed. Eriti oluline on selliste karbiidiosakestega struktuur kiirlõike- ja kõrglegeerteraste korral.

Täislõõmutust kasutatakse kõrgsüsinikteraste (üleutektoidteraste) sisepingete kaotamiseks, kõvaduse vähendamiseks, plastisuse suurendamiseks ja lõiketöödeldavuse parandamiseks.

Üleeutektoidteraste täislõõmutust nimetatakse ka **sferoidiseerivaks lõõmutuseks** ehk **sferoidisatsiooniks** (*spheroidizing annealing, spheroidization*), ja see on teraja tsementiidiga sferoidaalse struktuuri saamise põhiline viis. Selline struktuur tekib ainult juhul, kui kuumutada üle faasipiiri A_1 (740...800 °C, 2...4 h) (kõrgem lõõmutustemperatuur põhjustab lamellperliidi teket). Kuumutamisele järgneb aeglane jahutamine ahjus (ca 20 °C/h) kuni temperatuurini 600 °C, edasi toatemperatuurini juba õhus. Aeglase jahtumise käigus eraldub terajas tsementiit, mis takistab lamellperliidi teket. Lõõmutatud terase struktuur koosneb **teraperliidist** ehk **sferoidiidist** (*globular pearlite, spheroidite*) – ferriidi põhimassist ja teralisest tsementiidist. Vaadeldud üleeutektoidterase sferoidiseerivat lõõmutust reguleeritakse kuumutustemperatuuri, -aja ja jahutuskiirusega. Madala kuumutustemperatuuri puhul muutub sferoidiseerimisprotsess liiga pikaks; liiga kõrge kuumutustemperatuur põhjustab tsementiidi täieliku eraldumise austeniidist, mis hilisemal jahutamisel soodustab lamellperliidi teket. Sama tulemus on ka siis, kui jahtumiskiirus kuni temperatuurini 600 °C on liiga suur. Seega saab jahtumiskiiruse valikuga reguleerida tekkivat struktuuri (tsementiidiosakeste kuju ja disperssust) ja nii mõjutada terase kõvadust ja teisi omadusi. Tööriistaterase teraline struktuur tagab selle hea lõiketöödeldavuse ja karastamisel väikese kalduvuse ülekuumenemisele (terakasvule). Kuumutades terast üle A_{cm} täisausteniitsesse alasse, tekib aeglasel jahutamisel tsementiidivõrk terapiiridel, mis teeb terase hapraks.

Madallõõmutus

Erinevate töötluste tulemusel jäävad detailidesse pinged, mis on tingitud nende eri osades esinevatest plastsetest deformatsioonidest. **Makropinged** (*macroscopic stresses*) tekivad külmtöötusel, s.t kalestumisest plastsel töötusel. **Termopinged** (*thermal stresses*) tekivad temperatuuri erinevuste tõttu detaili eri osade vahel, tavaliselt aga valandite ja keevisõmbluste kiirel jahutamisel, **faasipinged** (*phase stresses*) aga faasimuutustest. Kõik seda liiki sisepinged avaldavad mõju detaili omadustele. Üldjuhul on need ebasoovitavad, kutsudes esile purunemisi, mis on avariide põhjuseks. Seetõttu püütakse selliste sisepingete tekkimist vältida. Nende tekke ja olemasolu korral tuleks detaile täiendavalt termotöödelda. Selleks sobib **madallõõmutus** ehk **madalatemperatuurne lõõmutus** (nimetatakse ka **pingetuslõõmutuseks**) (*stress relief annealing, low-temperature annealing*). Kuna sellise lõõmutamise peaeesmärk on terase kõvaduse vähendamine ja plastsuse suurendamine, siis nimetatakse seda ka **pehmelõõmutuseks** (*soft annealing*).

Sellist lõõmutust kasutatakse tavaliselt siis, kui terase algstruktuur on sobiv ja puudub vajadus faasilise ümberkristalliseerimisega lõõmutuse järele.

Terast madallõõmutatakse allpool faasipiiri A_1 , tavaliselt temperatuuril 500...650 °C ja jahutatakse seejärel aeglaselt, tavaliselt ahjus. Sisepinged alanevad pikaajalise lõõmu-

tuse tagajärjel ja seda põhjalikumalt, mida kõrgemal temperatuuril lõõmutus toimub. Temperatuuridel üle 650 °C täheldatakse perliidi sferoidiseerumist ja terase pehmenemist; kuumutamisel üle faasipiiri A_1 leiavad aset faasimuutused ja tekivad struktuurid kooskõlas Fe-Fe₃C faasidiagrammiga (p 3.5.2).

Aeglane jahutus on vajalik selleks, et ei tekiks jahtumisest tingitud termopingeid. Nii peaks paksuseinaliste valandite korral normaliseerimisele järgnema madallõõmutus, mida, tõsi küll, võib ka ühitada normaliseerimisega. Viimasel juhul jahutatakse valandit aeglaselt temperatuurist 650...600 °C allpool, kusjuures säilib struktuur, millele püüeldakse normaliseerimisel. Selleks paigutatakse valand normaliseerimistemperatuurilt ahju, mis on eelnevalt kuumutatud temperatuurini 600...650 °C, jahutades seejärel valandit termopingete vältimiseks ahjus temperatuurini 200 °C.

Oluline on teada, et termopinged võivad tekkida ka suurte ja paksuseinaliste detailide kiire ja ebaühtlase kuumutamise tagajärjel. See oht on suur eriteraste ja -sulamite korral, mille soojusjuhtivus on väike – tekib suur temperatuuride erinevus detaili eri osade vahel. Siit tulenevalt kuumutatakse sellistest terastest suuri detaile aeglaselt temperatuurini 600 °C, et vähendada kuumutamisel tekkivaid termopingeid. See võimaldab vältida detailide ebaühtlasest kuumutamisest tingitud purunemisi.

Madallõõmutuse üks liik on **rekristalliseeriv lõõmutus** ehk **rekristallisatsioonilõõmutus** (*recrystallization annealing*), mida kasutatakse eelneva plastse külmdformatsiooni tagajärjel tekkinud kalestuse kõrvaldamiseks. Rekristallisatsioonilõõmutamisel kuumutatakse terast faasipiirist A_1 veidi madalamate temperatuurideni (kuni 650...700 °C), seisutatakse sellel temperatuuril ja jahutatakse seejärel aeglaselt. Selle tulemusena toimub metalli sekundaarne kristalliseerumine – **rekristallisatsioon** (*recrystallization*) (vt p 2.2.4). Deformeeritud terade piiridel tekivad uued kristallisatsioonikeskmed, millest moodustuvad uued terad. Vanade deformeerunud terade asemele tekivad uued võrdtelgised terad ning deformeerunud struktuur kaob. Selle tulemusena taastub metalli esialgne struktuur.

Ferriidi rekristalliseerumise (taastumise) tulemuseks võib olla üsna suur tera, kui terase lõõmutusele on eelnenud plastne deformatsioon 5...15 % piires, s.o nn **kriitiline deformatsiooniaste** (*critical deformation step*). Seega tuleb peeneteralise struktuuri saamiseks vältida nimetatud deformatsiooniastmeid. See on ka põhjus, miks rekristallisatsiooniprotsessi kiirendamiseks ei saa rekristallisatsioonilõõmutust asendada normaliseerimisega, eriti madalsüsinikteraste korral, ehkki mõlemad viivad terase kõvaduse vähenemisele. Rekristallisatsioonilõõmutuse võib asendada normaliseerimisega juhul, kui tegemist pole kriitiliste deformatsiooniastmetega. Peab silmas pidama, et eriti hädaohtlik on struktuuri jämeteralisus ferriitterastes (ferriitstruktuur esineb kogu temperatuurivahemikus – toatemperatuurist kuni solidusjooneni), kuna

kõrgetel temperatuuridel moodustunud jäme tera ei peenene ka termotöötuse tulemusel.

Rekristallisatsioonilõõmutust kasutatakse märkimisväärse osa teraste sortimendi, s.o külmlvaltsteraspleki korral (ca 15 % kõigist toodetavaist terastest), aga ka kuumvaltsitud ja tõmmatud teraste korral, kui protsessi lõpptemperatuur on 600 °C piires.

Normalisatsioon

Kuigi terase täislõõmutus tagab meile hea plastsuse ja väikese tugevuse, on see aega ja energiat nõudev. Kui pole olulised eespool esitatud omadused, tähtis on aga hind, kasutatakse normaliseerimist.

Normalisatsioon ehk **normaliseerimine** (*normalization, normalizing*) on selline termotöötuse viis, mille korral terast kuumutatakse 30...50 °C üle vastavate faasiipiiride – alaeutektoidteraseid üle A_3 , üleutektoidteraseid üle A_{cm} , seisutatakse sellel temperatuuril ja jahutatakse siis õhus. Normaliseerimise tulemusel vähenevad sisepinged ja toimub terase faasiline ümberkristalliseerumine, mis muudab valandite, sepiste ja keevisõmbluste jämeteralise struktuuri peeneteralisemaks.

Normaliseerimine on lõõmutamisega võrreldes odavam termotöötuse moodus, sest ahju kasutatakse ainult kuumutamiseks ja seisutamiseks antud temperatuuril, jahutamine toimub juba õhus.

Lõõmutatud ja normaliseeritud madalsüsinik- ja madallegeerteraste omadustel pole olulist vahet, mistõttu neid teraseid soovitatakse lõõmutamise asemel normaliseerida. Kesksüsinikterastel (0,3...0,5 % C) on see erinevus suurem, mistõttu alati ei saa lõõmutamist asendada normaliseerimisega. Küll aga võidakse asendada nende teraste korral parendamine (karastamine järgneva kõrgnoolutusega) normaliseerimisega. Võrreldes lõõmutamisega annab normaliseerimine terasele suurema tugevuse, kuid võrreldes parendamisega on normaliseeritud teras mõnevõrra väiksema plastsuse ja sitkusega. Mittevastutusrikaste kergkoormatud detailide korral piirduakse tavaliselt normaliseerimisega, vastutusrikaste raskkoormatud detailide korral aga tuleb eelistada parendamist.

Normaliseerimise tulemusena muutub teras peeneteralisemaks, tugevus ja kõvadus on suurem kui lõõmutatud terasel. Normaliseerimist kasutatakse terase lõiketöödeldavuse parandamiseks ning sageli karastamise eeloperatsioonina. Üleutektoidteraste (ka tsementiiditud teraste) normaliseerimisel kaob tsementiidi võrk.

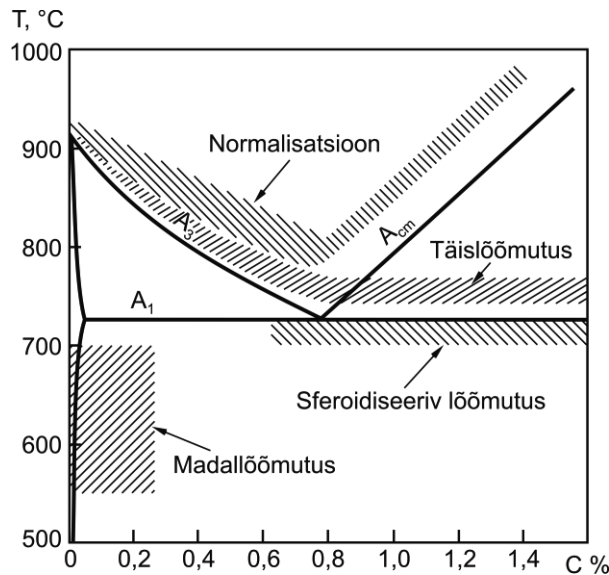
Sferoidisatsioon

Kõrgsüsinikterased (> 0,6 % C), mille korral kasutatakse lõiketöötlemist, allutatakse sageli termotöötusele, mis on tuntud **sferoidisatsiooni** ehk **sferoidiseerimisena** (*spheroidizing*) (vt ka p 4.2.1. Täislõõmutus). Siin on eesmärgiks saada terase

struktuur, milles tsementiit on peeneteralisena feriiitmaatriksis. See on saavutatav kas pikaajalise kuumutamise temperatuuril alla A_1 ja järgneva aeglase jahutamise või pikaajalise tsüklilise kuumutamise temperatuurivahemikus veidi alla A_1 , tööriistateraste (eelkõige kõrgeleerteraste) korral kuumutamise temperatuuril 750...800 °C ja pikaajalise seisutusega sellel, millele järgneb aeglane jahutamine.

Eelkõige oleneb protsessitermotöötuse valik soovitatavatest eesmärkidest, kusjuures määrav on terase keemiline koostis. Protsessitermotöötlustest piirdub lõõmutamine eelkõige madalsüsinikteraste, sferodiseerimine aga kõrgsüsinikterastega (üleutektoidterastega). Normaliseerimist ja täislõõmutust kasutatakse nii ühtede kui teiste teraste korral. Samas saadab madalsüsinikteraste normaliseerimist omaduste ebaühtlus; kõrgsüsinikteraste korral, mil erinevad jahutuskiirused võimaldavad saada varieeruvaid omadusi, on aga eelistatavam täislõõmutus. Siit on süsinikteraste korral eelistatavamad termotöötused järgmised: 0...0,4 % C – normalisatsioon; 0,4...0,6 % C – täislõõmutus; üle 0,6 % C – sferoidisatsioon.

Joonisel 4.3 on kokkuvõtlikult esitatud protsessitermotöötused



Joonis 4.3. Terase termotöötuse alad Fe-Fe₃C faasidiagrammil

4.2.2. Mitterauasulamite protsessitermotöötus

Enamikul mitteraudmetallidel ja nende sulamitel ei ole selliseid olulisi faasimuutusi, millised on rauasüsinikusüsteemis, mistõttu nende korral protsessitermotöötusviisid ei ole nii tähtsad. Jättes kõrvale tugevdava töötuse – vanandamise (sellest tuleb juttu edaspidi), kasutatakse mitterauasulamite korral termotöötuse eesmärgiga:

- 1) saada ühtlast homogeenset struktuuri;
- 2) vabaneda pingetest;
- 3) rekristalliseerida.

Valandeid iseloomustab nende kiirel jahtumisel tekkiv keemilise koostise ebaühtlus (segregatsioon). Homogeniseeriv lõõmutus on põhiline termotöötamise viis valandite keemilise koostise ühtlustamiseks, kus kuumutades mõõdukatel temperatuuridel ja seisutades sellel pikka aega, tagatakse difusiooniprotsesside toime. Sarnaselt kuumutades pikka aega suhteliselt madalatel temperatuuridel on võimalus vabaneda sisepingetest, mis on tekkinud survetöötamise, keevituse või muu töötlemise käigus. Protsess on tuntud pingetuslõõmutusena. Plastse deformatsiooni tagajärjel tekkinud kalestuse (põhjalikumalt käsitletud p 2.2.4) kõrvaldamiseks kasutatakse rekristalliseerivat lõõmutust.

4.3. TUGEVDÄV TERMOTÖÖTLUS

Metallisulamite tugevnemise peamised mehhanismid on:

- 1) tardlahustugevnemine;
- 2) kalestumine;
- 3) tera peenenemine;
- 4) sadestuskõvenemine/tugevnemine.
- 5) faasimuutustest tingitud tugevnemine.

Kuigi kõiki neid viise ei saa kasutada kõnealuste metallide või sulamite korral, märgivad nad olulist rolli toote lõppomaduste mõjutamisel või parandamisel.

Tardlahustugevnemisel (*solid-solution strengthening*) lahustuvad põhimetallis teised aatomid, andes ka asendus- või sisendustardlahuseid (vt p 2.3.1). Tugevnemise aste on lahustunud aatomite hulgest ja aatomiraadiuste erinevusest. Igasugune lahustuvus kutsub esile kristallivõre moonutused, mis omakorda põhjustab sulami tugevnemist – seda enam, mida suurem on aatomraadiuste erinevus.

Kalestumine (*strain hardening*) (vt p 2.2.4) on põhjustatud plastsest deformatsioonist külmdedeformeerimisel.

Tera peenenemine (*grain-size refinement*). Peenteralisem metall on tugevam võrreldes jämeteralise metalliga, kuna terapiirid toimivad kui barjäärid dislokatsioonide liikumisel. Seega tera peenendamist kasutatakse samuti tugevdamise eesmärgil, välja arvatud kõrgtemperatuursete kasutuste korral. Peab nimetama, et tera peenendamise ja tugevnemisega ei kaasne plastsuse ja sitkuse kadu.

Sadestuskõvenemine-tugevnemine (*precipitation hardening, precipitation strengthening*) on tingitud mittetasakaalulisest struktuurist peene(te) faasi(de) eraldumisest mitmekordse termotöötamise tulemusena (vt p 4.3.2.). On tuntud ka **dispersioon-**

kõvenemise/tugevnemisena (*dispersion hardening, dispersion strengthening*). Peeneteraline faas, mis on kõvem põhismetallist – maatriksist – tagab nii suurema kõvaduse kui ka maatriksi tugevnemise.

Faasimuutustest põhjustatud tugevnemine (*phase transformation strengthening*) on omane neile sulameile, mis kuumutamisel annavad ühefaasilise struktuuri, järgneval jahutamisel transformeerub see üheks või enamaks madalatemperatuurseks faasiks. Tavaliselt kasutatakse kiiret jahutamist ja tekkivad faasid on oma loomult mittetasakaalulised.

4.3.1. Teras tugevdav termotöötlus

Austeniidi lagunemine

Austeniidi isotermilise lagunemise diagramm

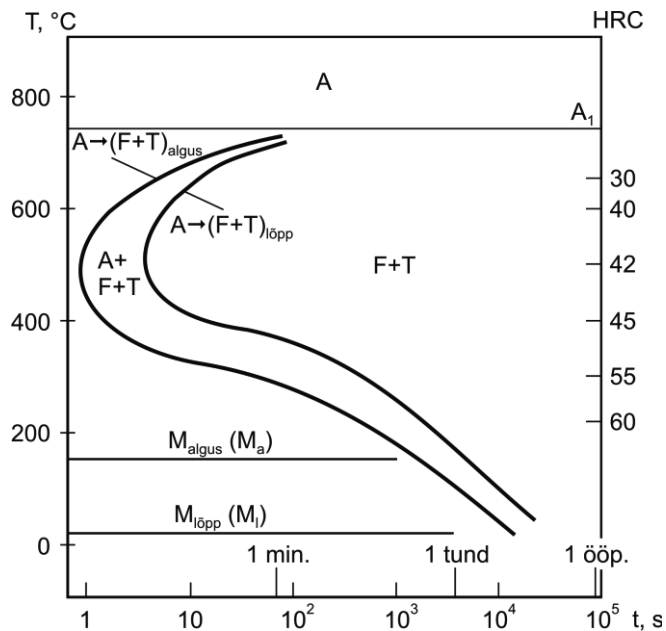
Teras karastamise seisukohalt väga oluline Fe-Fe₃C faasidiagramm on mõnes suhtes puudulik. Sellest ei ilmne midagi seoses austeniidi lagunemisega erinevatel jahtumiskiirustel, mil on aga esmajärguline tähtsus terase termotöötlemisel. Samuti ei saa faasidiagrammilt üksikasjalisi andmeid erinevatel temperatuuridel austeniidi lagunemisel tekkivate struktuuride ja nendega kaasnevate omaduste kohta. Seetõttu vajab Fe-Fe₃C faasidiagramm täiendamist **austeniidi isotermilise lagunemise diagrammiga**, nn **C-kõveratega** (*time-temperature-transformation (TTT) diagram, isothermal-transformation (IT) diagram*), mis iseloomustavad muutuste kulgu terase termotöötlemisel.

Austeniidi lagunemise kõrval on oluline ka austeniidi moodustumine – austenititsatsioon, mis pole vähem oluline terase termotöötlemise seisukohalt.

Joonisel 4.4 on eutektoidterase (0,8 % C) austeniidi isotermilise lagunemise diagramm (C-kõverad). Ülalpool faasimuutuse temperatuuri A_1 on austeniit stabiilne sõltumata ajast. Allpool seda temperatuuri leiab aset tahkkesendatud kuupvõrega austeniidi muutumine ruumkesendatud kuupvõrega ferriidiks ja süsinikurikkaks tsementiidiks. Seda muutust mõjutavad kaks tegurit: a) allajahutamisaste (mida madalam on temperatuur ehk suurem allajahutamisaste, seda suurem muutuse kiirus); b) difusiooniprotsessid (mida kõrgem temperatuur, seda suurem difusioonikiirus). Seega ala allpool faasipiiri A_1 võib kirjeldada järgnevalt. Nullpunkt vastab terase struktuurile vahetult jahutatud uuele madalamale temperatuurile. Struktuuriks on tavaliselt ebapüsiv austeniit. Seisutades sel temperatuuril (liikudes horisontaalselt diagrammil) lõikume joonega, mil algab muutus – austeniidi lagunemine, seejärel teise joonega, mil lõpeb muutus – austeniidi lagunemine. Kõrgematel temperatuuridel (veidi allpool 727 °C) on aatomite difusiooni kiirus küll suur, aga väikesest allajahutusastmest tingituna muutuse kiirus väike. Madalatel temperatuuridel on küll suurest allajahutusastmest tingituna muutuse kiirus suur, aga difusioonikiirus väike –

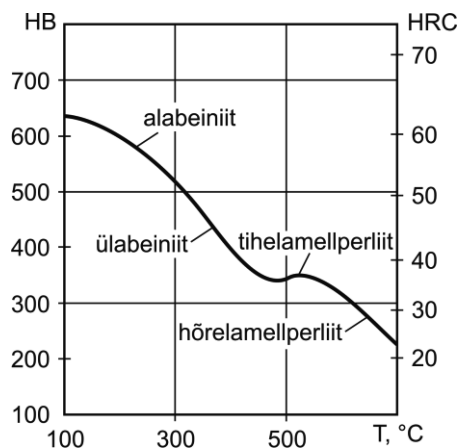
seega muutuse kiirus samuti väike. Muutuse kiirus on maksimaalne keskmistel temperatuuridel, mis kajastub C-kõvera kujus. C-kõvera osa, mis on paigutunud maksimaalselt vasakule, on tuntud C-kõvera ninana. Kui muutus leiab aset temperatuurist A_1 kuni C-kõvera ninani, on kõrvalekalle tasakaalulistest struktuuridest väike. Austeniit laguneb ferriidi ja tsementiidi seguks – perliidiks, millest oli juttu tasakaalulise Fe-Fe₃C diagrammi korral (vt p 3.5.2). Suuremast difusioonikiirusest tulenevalt saame A_1 piirkonnas moodustunud hõrelamelse perliidi (tsementiidi ja ferriidi vahekaugus on suur), C-kõvera nina piirkonnas aga tihelamelse perliidi. Selles piirkonnas läbiviidavat konstantsel temperatuuril kuumutust nimetatakse ka **isotermilõõmutuseks** (*isothermal annealing*).

Kui austeniiti jahutada C-kõvera nina ja temperatuuri M_a piirkonnas, moodustub erinev struktuur. See muutus erineb oluliselt tasakaalulisest perliitmuutusest – difusiooniprotsesside aeglustumisest tulenevalt ei moodustu pidevaid perliidile omaiseid ferriidi-tsementiidi lamelle, kuid protsess – tahkesendatud kuupvõrega austeniidi muutumise ruumkesendatud kuupvõrega ferriidiks koos tsementiidi moodustumisega jätkub. Selle tulemusena moodustub disperssete tsementiidiosakes- tega ferriitmaatriksstruktuur, mis on tuntud **beiniidina** (*bainite*) (on nähtav ainult elektronmikroskoobis).



Joonis 4.4. Austeniidi isotermilise lagunemise diagramm

Joonisel 4.5 on austeniidi isotermilise lagunemise tulemusena moodustunud ferriidi-tsementiidi segude (perliidi ja beiniidi) kõvadus.

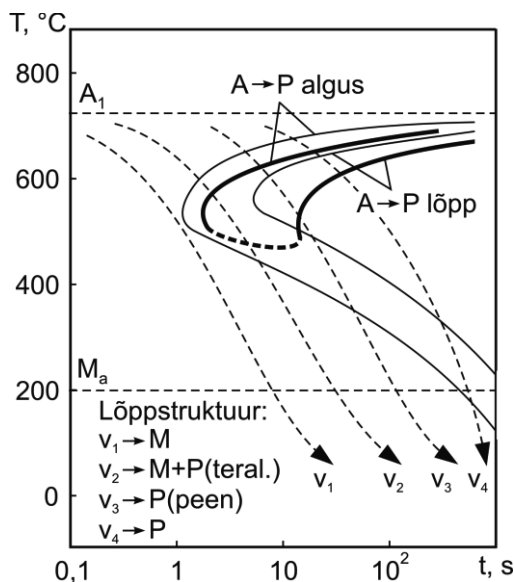


Joonis 4.5. Austeniidi isotermilise lagunemise tulemusena moodustunud struktuuride kõvadus

Austeniidi pidevjahtumise diagramm

Austeniidi isotermilisel jahutamisel saadud diagrammist – C-kõveratest (Joonis 4.4) ei saa lähtuda praktikas läbiviidava termotöötamise tulemuste hindamisel. Põhjuseks on asjaolu, et C-kõverad on saadud austeniidi isotermilise lagunemise tulemusena väikestel katsekehadel, termotöödeldakse aga üsna suuri detaile ja austeniidi lagunemine jätkub ka temperatuuri alanedes. Nendele ajamomentidele, mil katsekeha on lühikest aega erinevatel temperatuuridel, vastavad suured sisepinged. Austeniidi lagunemise seisukohalt on oluline selle stabiilsus eriti eutektoideraste korral, mis on suuresti seisutusajast üle faasiipiiri A_1 . Austeniit laguneb aeglaselt vahetult faasiipiirist A_1 allpool, kui C-kõverate osa on märgatavalt paremal, kiirelt aga, mil katsekeha on C-kõverate nina piirkonnale vastavatel temperatuuridel (C-kõverate osa võimalikult vasakul).

Austeniidi isotermiline lagunemine ja ka selle protsessi käivitus antud temperatuuril nõuavad teatud aega (peiteperiood), mida saab määrata ka C-kõveratelt. Seda asjaolu tuleb arvestada ka pidevjahtumise korral (Joonis 4.6). Teiselt poolt olenevad pidevjahtumisel aset leidvad muutused ja tekkivad mikrostruktuurid jahutuskeskkonnast (vesi, õli või õhk), jahutatava eseme paksusest või selle osa kaugusest pinnakihist. Pidevjahtumise kõverad paiknevad selgelt madalamatel temperatuuridel ja paremal kui isotermiliselt määratud C-kõverate ninad. Nii näiteks paikneb eutektoidse mittelegeerterase korral pidevjahutamisel C-kõverate nina orienteeruvalt 1,5 s kohal, isotermiliselt määratud C-kõverate nina 1 s kohal. Kasutamise seisukohalt tähendab see, et isotermilised C-kõverad ei anna õiget tulemust ja martensiitstruktuuri võib saada ka isotermilistest C-kõveratest tulenevast kriitilisest jahtumiskiirusest väiksematel kiirustel.



Joonis 4.6. Austeniidi pidevjahtumise diagramm (jäme joon), võrdluseks isotermilise lagunemise diagramm (peen joon): $v_1 \dots v_4$ – erinevad jahtumiskiirused (teras 0,8 % C)

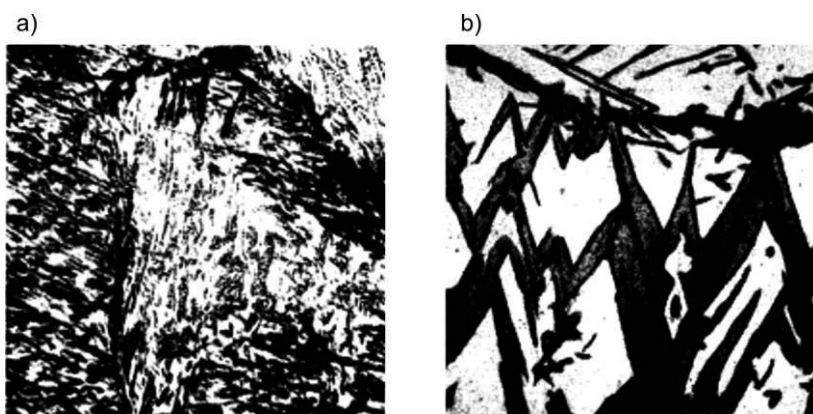
Martensiitmuutus

Väga kiire jahutamisega on võimalik vältida austeniidi lagunemist, mille tulemusena toatemperatuurile lähedastel temperatuuridel muutub austeniit süsinikuga üleküllastunud ferriidiks ehk **martensiidiks M** (*martensite*). Martensiit on ebastabiilne faas, mis kaob struktuurist kuumutamisel. Austeniit võib jääda täielikult või osaliselt püsima toatemperatuuril – viimasel juhul on tegemist **jääkausteniidiga** (*retained austenite*).

Austeniidi lagunemine ferriidi ja tsementiidi seguks eeldab süsiniku difusiooni, mistõttu see võib toimuda ainult kõrgetel temperatuuridel ja teatava ajavahemiku jooksul. Kui jahutada terast kiiresti madalate temperatuurideni (200...300 °C), siis difusiooniprotsessid ei toimi ja peatub ka austeniidi lagunemine. Sel juhul jääb austeniit metastabiilsena püsivaks või muutub martensiidiks – leiab aset **martensiitmuutus** (*martensite transformation*). Seega martensiit on süsiniku üleküllastatud tardlahus α -rauas, mille C-sisaldus on võrdne lähte-austeniidi C-sisaldusega. Martensiidi struktuur on näidatud Joonisel 4.7 ja määratlus Tabelis 4.1.

Tabel 4.1. Beiniidi ja martensiidi määratlused

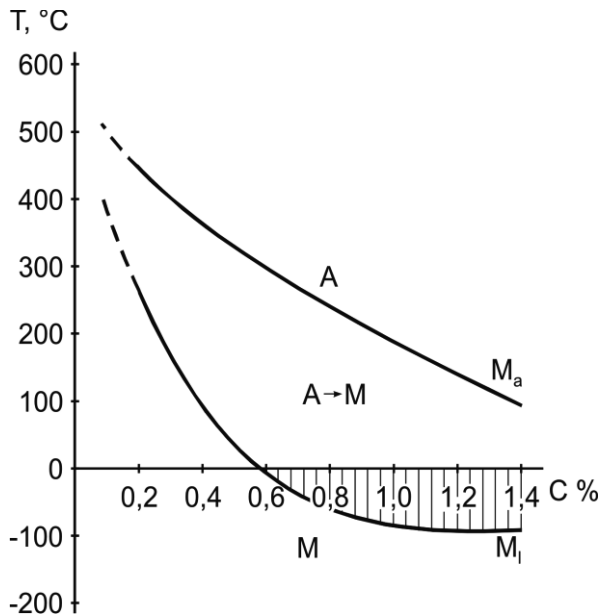
Nimetus	Tähis	Kristallivõre	Määratlus
Beiniit	B	–	On F ja T peen eutektoidne segu C-sisaldusega 0,8 %, mis tekib A lagunemisel selle allajahutamisel temperatuurivahemikus 400...500 °C
Martensiit	M	K8	C üleküllastatud tardlahus α -rauas ($\text{Fe}_\alpha(\text{C})_{\text{üle}}$). Maksimaalne C-sisaldus on võrdne lähtefaasi – austeniidi C-sisaldusega



Joonis 4.7. Martensiidi struktuur: a – suurendus 500 korda, b – 1000 korda

Martensiididiagramm

Martensiidi moodustumine süsinikterastes ei toimu kindlal temperatuuril, vaid temperatuurivahemikus, mida iseloomustab martensiididiagramm – martensiidi tekke algtemperatuuri M_a ja lõpptemperatuuri M_f sõltuvus C-sisaldusest (Joonis 4.8). Kuigi martensiitmuutusel moodustub martensiit suurel kiirusel niipea, kui saavutatakse M_a temperatuur, ei muutu kogu austeniit martensiidiks. Austeniidi muutumine martensiidiks lõpeb alles siis, kui temperatuur on märgatavalt langenud temperatuurist M_a allpool oleva temperatuurini M_f . Kuigi martensiitmuutuse käik oleneb ajast (igale M_a ja M_f vahelisele temperatuurile vastab kindel muutuse etapp, kus kindel osa austeniidist muutub martensiidiks), jäetakse see harilikult arvestamata.

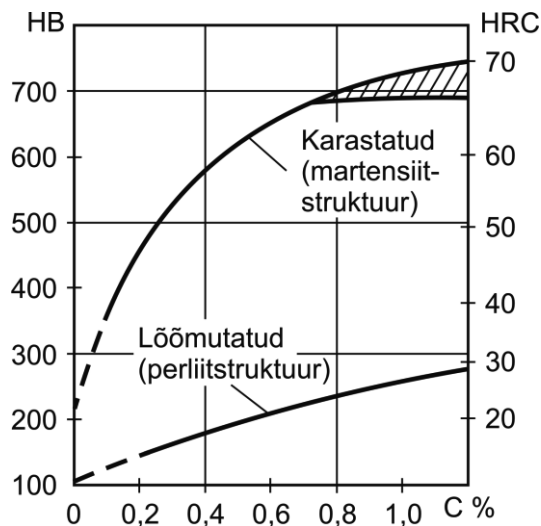


Joonis 4.8. Süsinikusisalduse mõju martensiitmuutuse alg- ja lõpptemperatuurile M_a ja M_f

Enamik terastes olevad ja austeniidis lahustunud lisandid (v.a Co ja Al) alandavad martensiitmuutuse temperatuure M_a ja M_f (alanevad lisandite koguse suurenedes). Kõige suuremat mõju martensiitmuutuse temperatuuridele avaldab aga süsinik (Joonis 4.8).

Martensiidi kõvadus

Martensiitstruktuuriga teras on kõva, kuid see ei kehti igasuguse martensiitstruktuuri korral – paljude teiste metallide ja sulamite puhul tekkiva martensiidi kõvadus on üsna tagasihoidlik. Ka väikese C-sisaldusega terase **martensiidi** kõvadus on väike. Martensiiti ja siit ka teras muutuvad järsult kõvemaks terase C-sisalduse kasvades (Joonis 4.9), teised komponendid aga ei mõjuta seda palju. Martensiitmuutuse tulemusena tekkiv struktuur saavutab oma suurima kõvaduse juba C-sisalduse 0,6 % puhul, kui muutus peatatakse toatemperatuuril (nagu seda tavaliselt tehakse). Suurema C-sisalduse korral jääb struktuuri C-sisaldusega koos kasvav jääausteniidi hulk, mis aeglustab martensiidi kõvaduse kasvu. Martensiidi kõvaduse edasine kasv saavutatakse vaid siis, kui jahutatakse madalate temperatuurideni, s.o alla 0 °C. Sel juhul muutub struktuur täielikult martensiidiks suurele C-sisaldusele vaatamata.



Joonis 4.9. Karastatud terase (martensiidi) ja lõõmutatud terase kõvaduse olenevus terase süsinikusisaldusest

Terase karastus

Karastuseks ehk **karastamiseks** (*hardening, quenching*) nimetatakse termotöötluste protsessi/operatsiooni, mille tulemusel saadakse ebastabiilne (mittetasakaaluline) martensiitstruktuur. Eristatakse mitmeid karastusviise: läbikarastust (detaili kuumutamise ja jahutamise kogu ristlõike ulatuses) ja pindkarastust (kuumutatakse ainult pinnakihti); lauskarastust (jahutamisega kogu detaili ulatuses) ja kohtkarastust (jahutatakse detaili osa).

Terase tavakarastus

Tavakarastus ehk **täiskarastus** (*full hardening*) eeldab järgmisi etappe:

- terase kuumutamine üle faasipiiride A_1 (üleeutektoidterased) või A_3 (alaeutektoidterased), et tagada lähtestruktuuris vajaliku austeniidi teke;
- seisutamine sellel temperatuuril – austenitisatsioon, et tagada kogu detaili ulatuses mainitud temperatuurile vastava homogeense struktuuri teke;
- jahutamine kiirusega, mis on karastatava terase kriitilisest jahutumiskiirusest suurem, et vältida austeniidi laguproduktide (ferriidi ja tsementiidi) teket.

Kuumutus (*heating*)

Karastustemperatuuri (*hardening temperature*) valik. Teraste karastustemperatuur valitakse olenevalt faasipiiridest A_1 ja A_3 .

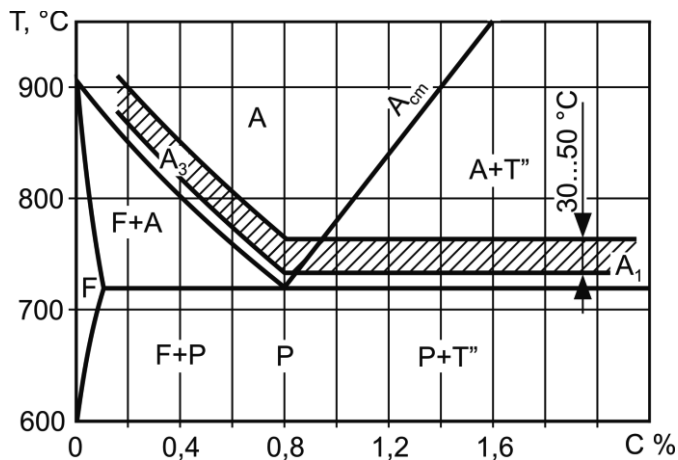
Mitteleegerteraste karastustemperatuuri valikul on aluseks lihtsustatud Fe-Fe₃C faasidiagramm (faasidiagrammi teraste osa) (Joonis 4.10). Selle järgi võetakse ala-

eutektoidteraste (0,2...0,8 % C) karastustemperatuur tavaliselt 30...50 °C üle faasiipiiri A_3 , üleutektoidterastel (C > 0,8 %) 30...50 °C üle A_1 .

Alaeutektoidteraste karastustemperatuuri valikul on lähtunud asjaolust, et nende teraste karastamisel üle faasiipiiri A_1 , kuid alla faasiipiiri A_3 – s.o **poolkarastus** (*non-full hardening*) säilib struktuuris kõrvuti martensiidiga ka ferriit, mis vähendab terase kõvadust pärast karastust ja halvendab mehaanilisi omadusi pärast noolutust.

Üleutektoidterastel on seevastu optimaalne karastustemperatuur faasiipiiride A_1 ja A_{cm} vahel, lähtudes kahest asjaolust:

- 1) karastades terast üle faasiipiiri A_1 , säilib struktuuris martensiidi kõrval sekundaarne tsementiit, mis suurendab terase kõvadust;
- 2) kuumutades aga terast üle faasiipiiri A_{cm} , jääb struktuuri pärast karastamist märkimisväärne kogus jääkausteniiti. Sellise kuumutuse korral on ka austeniiditera suurenemise oht, mis omakorda põhjustab jämeteralise martensiidi teket ja karastatud terase haprumist, aga ka süsiniku väljapõlemist. Need asjaolud vähendavad terase saadavat kõvadust.



Joonis 4.10. Terase kuumutuspiirkond karastamisel

Kuumutuskiirus (*heating rate*). Kuumutuskiirus on oluline temperatuuri ühtlustamise seisukohalt kogu ristlõike ulatuses ja sellega kaasneva struktuuri homogeniseerimisel. Kuumutuskiirusest oleneb eelkõige karastamise kestus, sellest aga omakorda protsessi maksumus, mistõttu kuumutuskiirust on otstarbekas suurendada.

Kuumutamise kiirendamiseks on mitmesuguseid viise. Vedelkeskkondades (sula plii, sula keedusool) kuumeneb metall kiiremini kui gaasikeskkonnaga ahjudes. Ühtlane igakülgne detaili kuumutamine soodustab selle kiiremat kuumenemist. Kui detaili pinna kuumenemine oleneb ümbritsevast keskkonnast, siis edasine detaili läbi-kuumenemine sõltub ristlõikest ja terase soojusjuhtivusest.

Kuumutuskeskkond (*heating medium*). Detaili kuumutamisel elektriühjus õhus või muus gaasilises keskkonnas leiab aset vastastikune keemiline reaktsioon metalli pinna ja ümbritseva keskkonna vahel, kusjuures olulised on kaks protsessi:

- 1) terase süsinikusisalduse vähenemine pinnakihi sealt süsiniku väljapõlemise tagajärjel ($C + O_2 \rightarrow CO_2$);
- 2) terase oksüdeerimisel selle pinnal raudoksiidi ehk rauatagi teke ($2Fe + O_2 \rightarrow 2FeO$).

Terase oksüdeerumine ja süsiniku väljapõlemine olenevad kuumutustemperatuurist ning -kestusest ja terase ning ümbritseva keskkonna koostisest. Kuna terase oksüdeerumine ja süsiniku väljapõlemine on difuussed protsessid, siis kiirenevad need eelkõige temperatuuri tõusuga.

Ahju atmosfääris tekivad olenevalt keskkonnast mitmesugused gaasid (CO_2 , CO , O_2 , H_2 , H_2O , N_2 , CH_4 jt), mis mõjuvad terasele mitmeti. Nii vähendab H_2 terase pinnakihi süsinikusisaldust, CO_2 oksüdeerib, O_2 ja H_2O oksüdeerivad ja vähendavad süsinikusisaldust, CO ja CH_4 suurendavad süsinikusisaldust.

Terase termotöötlusel on vaja luua sellised tingimused, mille korral reaktsioonid oksüdeerumine \leftrightarrow taandamine ja süsiniku väljapõlemine \leftrightarrow süsinikuga rikastamine on tasakaalus, s.t terase pinnakihi koostis praktiliselt ei muutu ja metall ei reageeri keskkonnaga (s.t on neutraalne). Neutraalse keskkonna saamiseks ahjus on vaja, et oleks kindlas vahekorras süsinikusisaldust suurendavad oksüdeerivad ja süsinikusisaldust vähendavad taandavad gaasid olenevalt kuumutustemperatuurist ja terase süsinikusisaldusest, s.t oleks kindel suhe CO_2/CO , H_2O/H_2 , CH_4/H_2 jt vahel.

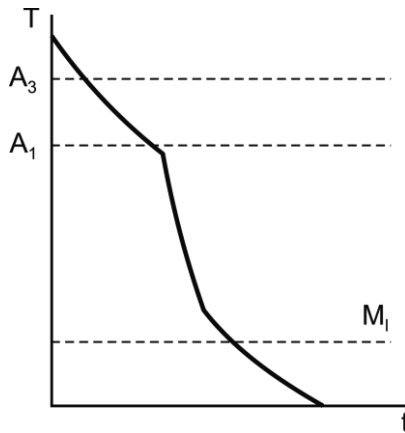
Sel otstarbel kasutatakse kontrollitava keskkonnaga kuumutusahjudes nn **helekarastuse** (*light hardening*) korral vajaliku koostisega gaasisegude saamiseks eriseadmeid või oksüdeerumise ja süsiniku väljapõlemise vältimiseks kuumutamist sulades soolades ($BaCl_2$, $NaCl$ jt).

Jahutus (*cooling*)

Terase karastamisel on martensiitstruktuuri saamiseks vaja austeniit kiirelt alla jahutada martensiitmuutuse temperatuurideni, kuid mitte kogu temperatuurivahemikus (kuumutustemperatuurist toatemperatuurini), vaid temperatuurivahemikus 550...650 °C, kus austeniit on vähima stabiilsusega – ta laguneb suhteliselt kiiresti ferriidi ja tsementiidi eutektoidseguks. Lisaks temperatuurile oleneb austeniidi lagunemise kiirus ka terase koostisest. Nendest mõjuritest oleneb terase karastamisel kriitiline jahutuskiiirus.

Temperatuuridel üle 650 °C on väikestest allajahutusastmetest tingituna austeniidi lagunemise kiirus väike ja seetõttu võib terast selles temperatuurivahemikus jahutada aeglasemalt, kuid mitte nii aeglaselt, et leiaks aset austeniidi lagunemine. Vahemik

650...400 °C tuleb läbida kiiresti, kuna selles vahemikus on austeniit vähima stabiilsusega. Süsinikteraste korral algab allpool 400 °C uuesti austeniidi suhtelise stabiilsuse piirkond ning terast võib uuesti jahutada aeglasemalt (mõningate legerteraste korral võib temperatuurivahemikus 400...300 °C austeniidi lagunemine kiireneeda, mistõttu tuleb neid ka selles piirkonnas kiirelt jahutada). Martensiidi tekkepiirkonnas (alla 300...200 °C) on soovitatav terast jällegi sisepingete vältimiseks aeglaselt jahutada. Karastamise ideaalne jahutuskõver on toodud Joonisel 4.11.



Joonis 4.11. Karastamise ideaalne jahutuskõver

Eespool esitatust tulenevalt on oluline, millist mõju avaldavad jahutusvedelikud kahes temperatuurivahemikus:

- 1) 550...650 °C, mil on soovitatav austeniidi kiire jahutamine selle lagunemise vältimiseks. Mida kiirem jahutus, seda rohkem tekib martensiiti ja seda suurem kõvadus saadakse;
- 2) 200...300 °C, mil martensiidi tekkest tingituna on soovitatav aeglasem jahutus. Mida aeglasem on jahutus, seda väiksem on kaldumus karastuspingete ja pragude tekkele.

Jahtumiskiirus detaili ristlõikes oleneb ka detaili mõõtmetest: suuremad detailid jahtuvad aeglasemalt võrreldes väiksematega; südamik jahtub tunduvalt aeglasemalt kui pind. Nii võib juhtuda, et südamikus võib jahtumiskiirus osutada väiksemaks kriitilisest (kiirus, millest väiksematel austeniit laguneb ja südamik ei karastu). Nii on see süsinikteraste (väikese läbikarastuvusega teraste) korral. Legerterased on suurema läbikarastuvusega, kuna nendel on kriitiline jahtumiskiirus tunduvalt väiksem.

Levinum jahutuskeskkond karastamisel on vesi. Vesi jahutab intensiivselt nii temperatuuripiirkonnas 650...550 °C (austeniidi lagunemine) kui ka temperatuurivahemikus 300...200 °C (martensiidi teke). Viimases peitubki vee kui karastuskeskkonna olulisem puudus.

Õli jahutusvõime võrreldes veega on 3...4 korda väiksem temperatuuripiirkonnas 650...550 °C, kuid *ca* 10 korda väiksem martensiidi tekke piirkonnas. Õli kui karastuskeskkonna eeliseks on tema mittetundlikkus temperatuurile – õli jahutab ühesuguse intensiivsusega temperatuuril nii 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.

Vees lahustunud soolad või leelised suurendavad tunduvalt vee jahutusvõimet (temperatuuripiirkonnas 650...550 °C ligi 2 korda), mistõttu soolade ja leeliste vesilahuseid kasutatakse sageli jahutuskeskkondadena.

Karastuspinged (*hardening stresses, quenching stresses*)

Karastamisega kaasnevad terasdetailides sisepinged, mis liigitatakse lähtuvalt päritolust kahte rühma: ristlõike eri osade erinevast jahtumisest tingitud pinged (termopinged) ja faasimuutustest tingitud pinged (faasipinged).

Termopinged ehk I liigi sisepinged (*thermal stresses*) on tsonaalsed sisepinged, mis tekivad ristlõike üksikute kihtide või detaili erinevate osade vahel. Mida suurem on termotöötlusel temperatuurigradient ristlõike ulatuses ja detaili üksikute osade vahel (see oleneb jahtumiskiirusest, jahutamise ebaühtlusest, detaili mõõtmetest ja tervest reast teistest põhjustest), seda suuremad on termopinged.

Faasipinged ehk II liigi sisepinged (*phase stresses*) tekivad tera sisemuses või kõrvuti olevate terade vahel faasimuutuses osalevate faaside erinevast mahust. II liigi pinged ei olene jahtumiskiirusest, vaid eelkõige eri faaside mahtude erinevustest.

Terese karastamisel tekkivad II liigi sisepinged on põhjustatud austeniidi ja martensiidi mahu erinevusest. See mahtude erinevus on seda suurem, mida suurem on terase süsinikusisaldus.

Karastusviisid (*hardening modes, quenching modes*)

Olenevalt terase koostisest, detaili mõõtmetest ja kujust ning termotöödeldud detaililt nõutavaist omadustest tuleb valida optimaalne karastusviis, mis on kõige lihtsamini läbiviidav, 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 suurem on mahu muutus faasimuutustel, ning mida madalamal temperatuuril muutub austeniit martensiidiks, seda suurem on oht deformatsioonide, pragude, pingete ja teiste karastusdefektide tekkeks, s.t seda hoolikamalt peab valima terase jahutamisrežiimi.

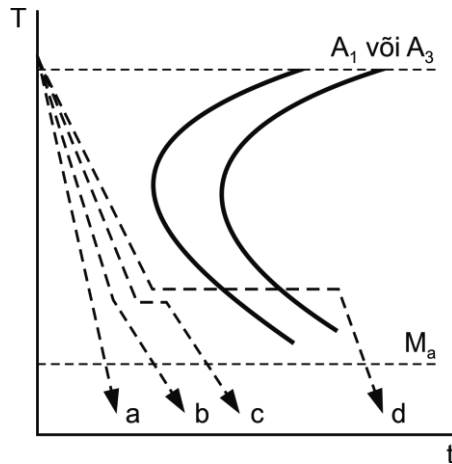
Tavakarastamisel kasutatakse põhiliste jahutuskeskkondadena vett, õli või kombineeritud moodust – läbi vee õlisse.

Ühes keskkonnas karastus ehk **vannkarastus** (*bath hardening, bath quenching*) on lihtsamaid karastusviise (Joonis 4.12, kõver a). Vajaliku temperatuurini kuumutatud detail jahutatakse karastusvedelikus (vees või õlis) kuni täieliku mahajahtumiseni. Seda viisi kasutatakse süsinik- ja legeerterastest lihtsate detailide karastamisel. Süsinikterastest detailide läbimõõduga üle 5 mm karastusvedelikuks on vesi, väiksemate mõõtmetega detailide ja paljude legeerterastest detailide karastuskeskkonnaks on õli. Ühes vannis karastust kasutatakse eelkõige lihtsate detailide mehhaniseeritud karastamisel, kus detailid satuvad ahjust automaatselt karastusvedelikku. Keeruliste detailide karastamiseks kasutatakse teisi viise.

Kahes keskkonnas karastuse ehk **katkendkarastuse** (*time hardening, time quenching*) korral (Joonis 4.12, kõver b) jahutatakse detaili kahes keskkonnas – 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.

Selle karastusviisi puuduseks on raskus kindlaks määrata ja reguleerida detaili seisutusaega esimeses keskkonnas, seda enam, et see aeg on väga lühike (mõõdetakse sekundites). See viis nõuab karastajalt küllaltki head kutseoskust.

Astekarastus (*stepped hardening, stepped quenching*) (Joonis 4.12, kõver c) on vaba katkendkarastusele omastest puudustest, mille korral detaili jahutatakse keskkonnas, mille temperatuur on antud terase martensiitmuutuse algtemperatuurist M_a 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. Selle karastusviisi korral tekivad minimaalsed sisepinged, sest jahutamine jaguneb kaheks etapiks. Karastuskeskkondadena kasutatakse sula-sooli ja -leelisi (KNO_3 , $NaNO_2$, KOH , $NaOH$) temperatuuriga 150...550 °C vastavalt astme temperatuurile.



Joonis 4.12. Erinevad karastusviisid: ühes keskkonnas karastus (a), kahes keskkonnas karastus (b), astekarastus (c), isotermkarastus (d)

Astekarastuse kasutamine on piiratud detaili ristlõike teatud suurusega. Suhteliselt aeglaselt jahutavad keskkonnad ei võimalda saavutada suure ristlõikega detaili karastamise kriitilisi kiirusi. Seetõttu kasutatakse astekarastust eelkõige väikese läbimõõduga detailide korral: mittelegeerterasest detailid läbimõõduga 10...15 mm, legeerterasest detailid 20...30 mm.

Isotermkarastuse (*austempering*, *isothermal hardening*, *isothermal quenching*) korral jahutatakse terast martensiitmuutuse temperatuurist M_a kõrgemal temperatuuril (250...350 °C) seisutusega kuni austeniidi lagunemiseni ferriidi ja tsementiidi seguks – beiniidiks (Joonis 4.12, kõver d) (vt p 4.3.1. Austeniidi lagunemine). Seetõttu on nimetatud karastusviis tuntud ka beiniitkarastusena.

Terase noolutus

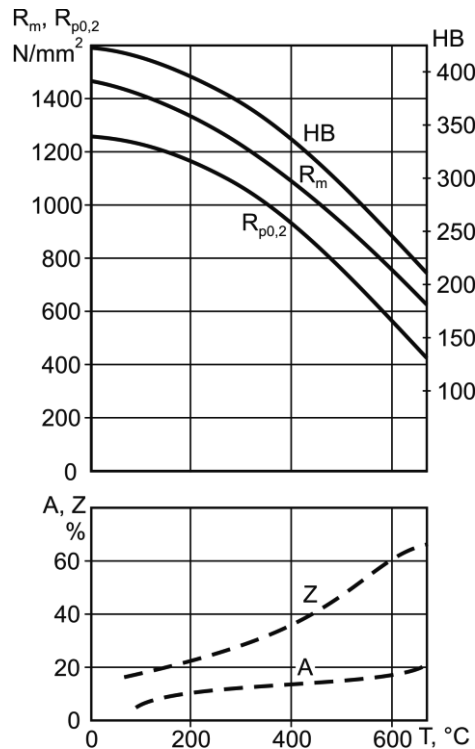
Terase karastamisel, mil austeniit muutub martensiidiks, saavutatakse suur kõvadus, mis on ka karastuse põhieesmärk. Ühelt poolt jahtumisel tekkivate termopingete ja martensiidi tekkest tingitud faasipingete olemasolu, teiselt poolt martensiidi suur kõvadus tingivad karastatud terase väikese vastupanu löökkooormustele ja deformatsioonidele. Neid omadusi aga on võimalik karastatud terase järgneva töötusega – **noolutusega** ehk **noolutamisega** (*tempering*) – parandada. Saadavaks struktuuriks on **noolutusmartensiit** (*tempered martensite*).

Noolutus on terase kuumutamine temperatuurideni alla A_1 , seisutamine sellel (vähemalt tunni) ja jahutamine (tavaliselt õhus). Madalatel temperatuuridel noolutus (200...250 °C) – **madalnoolutus** (*low-temperature tempering*) sobib eriti tööriistaterastele, millelt nõutakse suurt kõvadust, mis veel ei vähene järgneva kuumenemise (noolutuse) käigus. Noolutust temperatuuridel 300...400 °C nimetatakse **kesk-**

noolutuseks (*middle-temperature tempering*), mille tagajärjel tekkinud struktuur on küll veidi väiksema kõvadusega, aga väga elastne, mistõttu kasutatakse eelkõige vedrude ja ka näiteks puidutööriistade korral.

Erinevalt tööriistaterastest (eesmärgiks on suurim võimalik kõvadus) püüetakse konstruktsiooniteraste korral suurema sitkuse ja tugevuse poole. See saavutatakse suhteliselt kõrgetel temperatuuridel (450...650 °C) noolutuse – **kõrgnoolutuse** (*high-temperature tempering*) (450...650 °C) tulemusena. Sellist karastust koos järgneva kõrgnoolutusega nimetatakse **parendamiseks** (*hardening and tempering*).

Terase mehaanilised omadused (kõvadus, tugevus, sitkus ja plastsus) muutuvad noolustemperatuuri tõustes. Nagu ilmneb Jooniselt 4.13, vähenevad noolustemperatuuri tõusuga terase kõvadus, tõmbetugevus ja voolepiir, samal ajal aga paranevad terase plastsusnäitajad. Kõikide nende omaduste nõutav kompleks saavutatakse vastava noolustemperatuuri valikuga. Lisaks sellele saadakse noolutamisel terase sobivam omaduste kompleks võrreldes austeniidi lagunemise tagajärjel saadud lamelse perliitstruktuurse terasega. Parendatud teraste voolepiir, väsimustugevus ja plastsus on tunduvalt paremad sama kõvadusega ferriitperliitstruktuursete teraste vastavatest omadustest.



Joonis 4.13. Noolustemperatuuri mõju terase omadustele

Eriti selgesti ilmnevad parendatud teraste eelised sitkusnäitajates eelkõige kõrgematel noolustemperatuuridel. See seisneb peamiselt tunduvalt madalamas külmahapruslâves, millest allpool kalduvad terased haprale purunemisele. Parendatud terased ei kaldu haprale purunemisele tavalistel töötemperatuuridel. Nende eeliseks on ka suurem väsimustugevus, mis pole vähetähtis masinaosade korral. Parendamisel saadavad paremad mehaanilised omadused on tagatud juhul, kui terasel on pärast karastamist martensiitstruktuur kogu ristlõike ulatuses. Seega pole aluseta püüdlus väände- ja paindekoormusel töötavate detailide läbikarastuvusele.

Parendatavate teraste süsinikusisaldus on 0,3...0,5 % piires. Kuna mittelegeerteraste läbikarastuvus pole eriti suur, määrab see eelkõige parendatavatest terastest detailide suhteliselt väikesed mõõtmed. Piiranguid pole suure läbikarastuvusega õlis karastatavatest leegerkonstruktsiooniterastest detailide mõõtmetele.

Läbikarastuvus

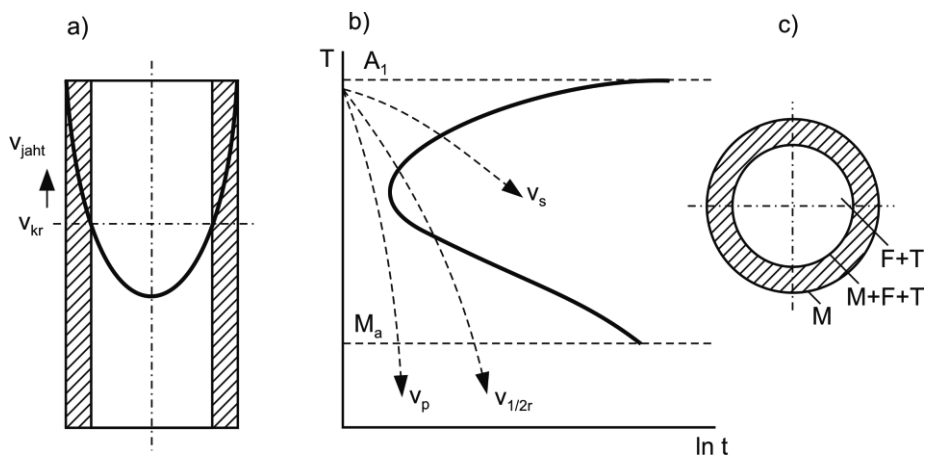
Kui terase **karastuvuse** (*hardenability*) all mõistetakse terase võimet tugevneda (kõveneda) karastamisel, siis **läbikarastuvuse** (*through hardenability*) all karastumist kogu ristlõike ulatuses, s.o kuni südamikuni.

Mitteläbikarastuvuse põhjuseks on asjaolu, et karastamisel jahtub detaili pind kiiremini, südamik aga aeglasemalt. Nagu selgub Jooniselt 4.14, on jahtumiskiirus maksimaalne pinnakihis, minimaalne südamikus: kui karastamise kriitiline kiirus (v_{kr}) on võrdne Joonisel 4.14a esitatud horisontaalse punktiirjoonega, siis detail ei karastu läbi ja karastuvuse sügavus on võrdne viirutatud kihi paksusega.

On ilmne, et karastamise kriitilise kiiruse vähenemisega suureneb ka karastunud kihi sügavus ja kui v_{kr} on väiksem jahtumiskiirusest detaili südamikus, siis sellise ristlõikega detail karastub täielikult. Kui v_{kr} on väga suur, suurem ka jahtumiskiirusest pinnal, siis selle karastusviisi korral ei karastu isegi detaili pinnakiht.

Järelikult, mida väiksem on v_{kr} , seda suurem on läbikarastuvus. Läbikarastuvus, nagu ka v_{kr} , on tihedalt seotud austeniidi lagunemise kiirusega ja seega austeniidi lagunemise algjoone asetusega C-kõverail. Joonisel 4.14b on C-kõverale paigutatud jahtumiskõverad silindrilise detaili korral südamikus (v_s), pinnal (v_p) ja poole raadiuse kaugusel pinnast ($v_{1/2r}$). Sellistel jahtumiskiirustel tekib pinnakihis martensiitstruktuur, südamikus austeniidi laguproduktidest ferriidist ja tsementiidist koosnev struktuur, poole raadiuse kaugusel pinnast aga poolmartensiitstruktuur (martensiit ja ferriit ning tsementiit).

C-kõverate nihkumisel paremale (nt legeerteraste korral) suureneb läbikarastuvus, s.t mida aeglasemalt toimub austeniidi lagunemine ja mida paremal pool asuvad C-kõverad, seda suurem on läbikarastuvus.



Joonis 4.14. Jahtumiskiiruse muutus ristlõikes (a ja b) ja struktuuriosad mitteläbikarastuvuse korral (c)

Austeniidi lagunemist (ferriidi ja tsementiidi teket) mõjutavad järgmised asjaolud:

- austeniidi koostis (kõik legerivad elemendid peale koobalti aeglustavad austeniidi lagunemise kiirust; austeniidi koostise ebahomogeensus) aga soodustab austeniidi lagunemist;
- mittelahustuvad osakesed (nt karbiidid, oksiidid, intermetalliidid jt, olles täiendavaiks kristallisatsioonikeskmeiks, suurendavad austeniidi lagunemiskiirust);
- austeniiditera suurus (tera suurenemine aeglustab muutusi, kuna kristallisatsioonikeskmed tekivad eelkõige terapiiridel – mida jämedam on aga tera, seda vähem terapiire ning seda väiksem on tekkivate kristallisatsioonikeskmete arv).

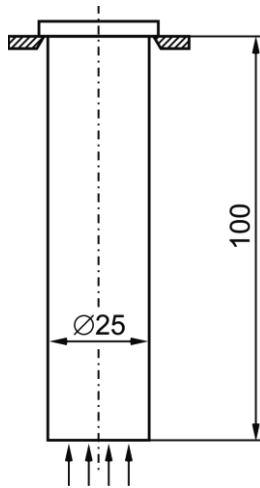
Läbikarastuvuse kriteeriumiks on **kriitiline diameeter** (D_{kr}) (*critical diameter*), s.o läbimõõt, mille korral detail karastub südamikuni kõnealusel juhutuskeskkonnas. Tavaliselt mõeldakse karastumissügavuse all kaugust pinnalt kuni poolmartensiitstruktuurini, s.t kihini, kus struktuuris on 50 % martensiiti ja 50 % austeniidi laguprodukte – ferriiti ja tsementiiti. See on põhjendatud ka asjaoluga, et martensiidi koguse vähenemisel alla 50 % väheneb järsult ka terase kõvadus. Tähistatakse seda D_{50} .

On ilmne, et kriitiline diameeter muutub karastamiskeskonna vahetamisel, s.t kriitiline diameeter iseloomustab terase läbikarastuvust ainult mainitud juhutusviisil. Mida aeglasemalt karastuskeskkond jahutab, seda väiksem on kriitiline diameeter.

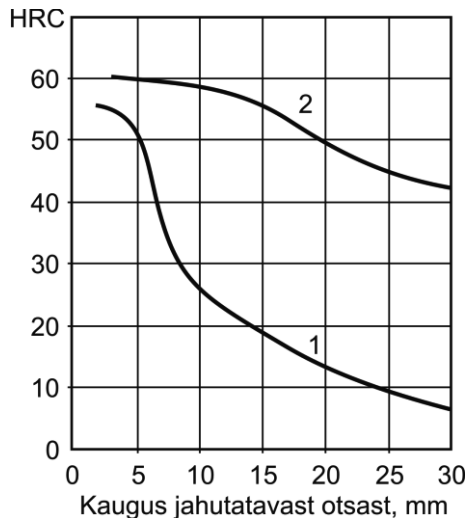
Kriitiline diameeter on põhiline ja sobiv näitaja terase valikul antud detaili tarvis. Kui on vaja läbikarastunud detaili, valitakse teras, mille kriitiline diameeter on suurem detaili läbimõõdust. Sobivam ja lihtsam meetod läbikarastuvuse määramiseks on **otskarastusteim** ehk **Jomini läbikarastuvuse teim** (*Jominy hardenability test*).

Läbikarastuvusteim

Katsekeha jahutamise skeem läbikarastuvuse määramiseks otskarastamise meetodil on Joonisel 4.15. On ilmne, et sellisel jahutamisel jahtub alumine ots suurima kiirusega ja jahtumiskiirus väheneb otsast kaugenemisel. Sama on ka pinna kõvadusega (Joonis 4.16). Esitades saadud tulemused graafikuna, saame kas sujuva (suure läbikarastuvusega terase korral) või järsu kõvaduse languse (väikese läbikarastuvusega terase korral) (Joonis 4.16).



Joonis 4.15. Läbikarastuvuse Jominy teimi skeem (otskarastamise meetod)



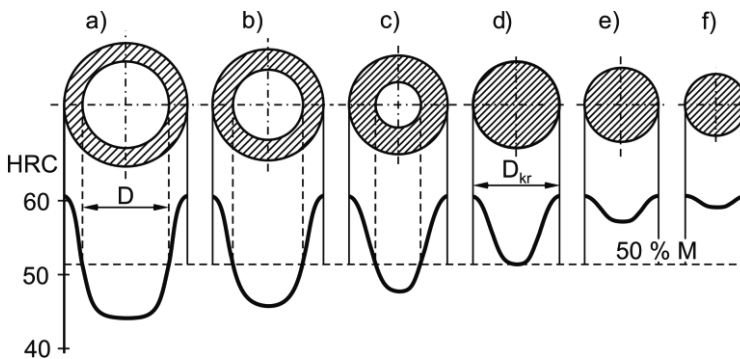
Joonis 4.16. Jominy kõvaduskõverad erinevate teraste korral: 1 – väikese läbikarastuvusega teras; 2 – suure läbikarastuvusega teras

Läbikarastuvuse mõju terase omadustele

Läbikarastumisel on karastatud terase omadused ristlõike ulatuses ühesugused. Mitteiläbikarastumisel muutuvad karastatud terase omadused pinnalt südamiku suunas sedavõrd, kui võrd muutuvad jahtumiskiirused. Kõvaduse jaotus ristlõikes erinevatel karastussügavustel on näidatud skemaatiliselt Joonisel 4.17.

Mitteiläbikarastuvuse korral on katsekeha südamikus kõvadus ja tugevus väike, läbikarastuvuse korral on aga omadused kogu ristlõike ulatuses ühesugused.

Siit selgub, et karastatud ja järgnevalt noolutatud detaili optimaalsete mehaaniliste omaduste saavutamiseks on oluline läbikarastuvuse tagamine. Mida suuremat vastupanu dünaamilistele koormustele detaililt nõutakse ja mida suurem on ristlõige, seda suurem tähtsus on läbikarastuvusel.



Joonis 4.17. Karastussügavus ja kriitiline diameeter

Terase pindtugevdus

Pindkarastus

Pindkarastust (*surface hardening, surface quenching*) kasutatakse selleks, et anda detaili pinnakihiile suur kõvadus, mis tagab suure kulumiskindluse; samal ajal säilib sitke südamik, mis tagab ka detaili vastupanu dünaamilisele koormusele. Samal eesmärgil kasutatakse termokeemilist töötlust, kuid viimasega võrreldes on pindkarastus märksa lühema kestusega.

Kõik pindkarastamise erinevad kuumutusmeetodid seisnevad ainult detaili pinnakihi kuumutamises karastustemperatuurini. Kuumutamine võib toimuda

- atsetüleenihapnikuleegiga,
- induktsioon- ehk kõrgsagedusvooludega,
- elektrolüütides ja sulametallides või -soolades,
- laseri- või elektronkiirega.

Pindkarastuse kõigi viiside olemus on selles, et detaili pinnakiht kuumutatakse kiiresti üle faasipiiride A_1 või A_3 . Kui kuumutamine katkestada ning detaili kiiresti jahutada, siis kuumutatud pinnakihis toimub karastus. Südamik tavaliselt ei kuumene või kuumeneb alla A_1 , mistõttu karastumist ei ole.

Kuigi enamikku pindkarastusviise iseloomustab pinnakihi kuumutamine tunduvalt üle faasipiiri A_3 , ei põhjusta see veel tingimata ülekuumenemist ega austeniiditera kasvu, kuna austeniitmuutus on seda kõrgemal temperatuuril, mida suurem oli kuumutuskiirus. Suurest kuumutuskiirusest tingituna austeniiditera kasvada ei jõua. Seega on olemas tekkiv struktuur eelkõige lähtestruktuurist.

Leekkarastusel (*flame hardening, torch hardening*) kuumutatakse detaili pinda atsetüleenihapnikuleegis ja jahutatakse kiiresti tavaliselt veejoas. Detaili pinnakiht kuumeneb gaasileegis kiiresti karastustemperatuurini, ülejäänud osa aga ei jõua selle ajaga kuumeneda. Seetõttu karastubki kiirel jahutamisel ainult pinnakiht, südamik aga jääb pehmeks. Karastatud kihi paksus võib otstarbest olenevalt olla 2...5 mm. Et saadav pinnakõvadus oleks piisavalt suur, peab pindkarastatavate teraste süsinikusisaldus olema suhteliselt kõrge, sobivam 0,4...0,5 %. See tagab pinnakõvaduse 56...58 HRC. Suureneb detaili vastupanu väsimusele, kuna martensiitmuutusest tingitud mahumuutus tingib survepingete tekkimist pinnakihis.

Leekkarastust kasutatakse põhiliselt üksiktootmisel, samuti pikkade ja suurte toodete (võllid, pingisängid jt) karastamisel.

Induktsioonkarastuse (*induction hardening*) korral paigutatakse detail induktorisse, millest läbijuhitav kõrgsagedusvool (siit ka tuntud kui kõrgsageduskarastus) tekitab magnetvälja, mis omakorda indutseerib metallis pöörisvoolud. Viimased kuumutavad detaili pinnakihi mõne sekundiga karastustemperatuurini. Detaili jahutamine toimub veega.

Kuumenemissügavus ja sellest tulenev karastussügavus olenevad eelkõige voolusagedusest – mida suurem on sagedus, seda väiksem on voolu sisenemise sügavus.

Metalli induktsioonkuumutamisel kasutatakse kõrgsagedusvoolu 500...10 000 000 Hz. Sujuva ja võimalikult ühtlase induktsioonkuumutuse saavutamiseks tuleb iga detaili jaoks valmistada vastava kuju ja kontuuriga vesijahutusega vasktorust induktor.

Induktsioonkarastus on levinud pindkarastuse viis. Seda tootlikku ja progressiivset kuumutusviisi rakendatakse mitmesuguse kujuga detailide karastamisel. See võimaldab automatiseerida karastusprotsessi, saada puhta detaili (ei teki tagi) ning välistatud on süsiniku ja teiste elementide väljapõlemine pinnakihist. Induktsioonkarastamisel saab karastunud pinnakihi sügavust täpselt reguleerida, samuti on sel viisil võimalik teha detaili kohtkarastust. Induktsioonkarastusel saab kõvema pinna kui tava- karastusel (kõvadus 3...4 HRC ühiku võrra suurem), puuduseks on selle mittesobivus

üksiktootmise korral, sest induktori maksumus ja režiimi valik teevad protsessi liiga kalliks.

Elektrolüütkarastus (*electrolytic hardening*) paigutatakse detail elektrolüüti (5...10 % kaltsineeritud sooda vesilahus). Alalisvoolu läbimisel tekib katoodi (detaili) ümber õhuke vesiniku kiht, mille halvast elektrijuhtivusest tingituna voolutugevus suureneb ja detail kuumeneb nõutava temperatuurini. Karastamine toimub samas elektrolüüdis, kui lülitame voolu välja.

Laser- ja elektronkiirkarastus (*laser hardening, electron beam hardening*) on pindkarastuse viisid. Laseri- või elektronkiirega töödeldud kuumutatud detaili pinnal vahelduvad karastusvöödid 0,02...2 mm tagant ning olenevad töötlemise energiatihedusest, töötlemise (silumise) kiirusest, materjalist ja kiirtekimbu läbimõõdust.

Elektronkiirkarastamine tehakse vaakumis, mis piirab selle karastusviisi kasutust ja töödeldavate detailide mõõtmeid.

Samuti kasutatakse elektronkiir- ja laserkuumutust pinnakihis erikoostisega sulamite saamiseks, pinna ülessulatamiseks, kulumis- ja korrosioonikindlate ning väsimustugevate pinnete pealekeevitamiseks jm.

Termokeemiline töötlus

Termokeemiline töötlus TKT (*thermochemical treatment*) erineb teistest termotöötluste viisidest selle poolest, et termokeemilisel töötlemisel toimub difusioonist tingitud pinnakihi keemilise koostise muutus.

Difusioon, aga järelikult ka termokeemilise töötluste võimalikkus eeldab atomaarse elemendi olemasolu, selle lahustuvust põhimetallis ja süsteemi püüdlust kontsentratsiooni ühtlustamiseks kogu mahu ulatuses. Siit tulenevalt eeldab termokeemiline töötlus kolme põhiprotsessi: dissotsiatsiooni, adsorptsiooni ja difusiooni.

Dissotsiatsioon (*dissociation*) toimub gaasilises keskkonnas ja seisneb molekulide lagunemises ning atomaarse difundeeruva elemendi tekkes.

Adsorptsioon (*adsorption*) – toimub piiril gaas-metall ja seisneb atomaarse elemendi adsorbeerumises (lahustumises) pinnakihis. See protsess on võimalik ainult siis, kui difundeeruv element on põhimetallis lahustuv.

Kolmandat protsessi iseloomustab absorbeerunud elemendi tungimine sügavuti ehk **difusioon** (*diffusion*).

Kolme loetletud protsessi tulemusel moodustub pinne, mille pindmises kihis elemendi kontsentratsioon on kõige suurem ning mis väheneb kaugenemisega pinnakihist.

Tsementiitimine

Kui terase süsinikusisaldus on väike (0,05...0,25 %), siis ei anna karastus tulemust – terase kõvadus jääb martensiidi väikesest süsinikusisaldusest tingituna madalaks. Sellisel juhul kasutatakse pinnakihi rikastamist süsinikuga – **süsinikrikastust** ehk **karbonisatsiooni** (*carburizing, carburization*) järgneva karastamisega – saame kõva ja kulumiskindla pinnakihi ja pehme ning sitke südamiku. Protsessi süsinikrikastus + karastamine on tuntud **tsementiitimisena** (*case-hardening*).

Süsinikrikastatakse süsinikku sisaldavas tahkes, vedelas või gaasilises keskkonnas (karbonisaatoris), mille tulemusel tekib suure süsinikusisaldusega (0,7...1,0 %) pinnakiht. Kuna süsiniku lahustuvus ferriidis on väike, viiakse protsess läbi austeniidialas – ühe faasi piiri A_3 , s.o temperatuuridel 900...950 °C. Eristatakse tahket, vedelat ja gaasilist süsinikrikastamist.

Tahkesüsinikrikastamine (*solid carburizing, pack-hardening*) on vanim tsementiitimise moodus. Karbonisaatoriks on puusüsi koos mitmesuguste lisandite – aktivisaatoritega ($BaCO_3$, $NaCO_3$, K_2CO_3 jt).

Temperatuuridel 900...950 °C moodustub ebapüsiv süsinikoksiid CO, mis rauaga kontaktis olles laguneb reaktsiooni



järgi; moodustub monosüsinik, mis adsorbeerub detaili pinnas.

Vedelsüsinikrikastamine (*liquid carburizing*) tehakse tavaliselt sulades tsüaanisoolades (näiteks NaCN), mille lagunemisel saadakse dispersne grafiit. Sulasooladele lisatakse süsihappesoolasid (Na_2CO_3 , NaCl, $BaCl_2$), mille lagunemisel tekib süsihappesüsinikoksiid. Viimane, reageerides süsinikuga, annab süsinikoksiidi, mis omakorda laguneb süsinikdioksiidiks ja monosüsinikuks.

Gaassüsinikrikastamine (*gas carburizing*) on kasutatavaim moodus tsementiitimisel, sest protsessi on lihtne mehhaniseerida ja automatiseerida. Kasutatavaim on kandegaasi menetlus. Kandegaasi (põhiliselt propaan (C_3H_8) või maagaas (CH_4)) osalisel (endotermilisel) põlemisel saadakse süsinikoksiid ja selle lagunemisel monosüsinik. Analoogselt tahkesüsinikrikastamisele rikastub pinnakiht süsinikuga. Süsinikrikastatakse tavaliselt temperatuuridel 920...980 °C, mil toimub terase kiire süsinikuga rikastumine, kuni pinna süsinikusisaldus saab võrdseks nõutavaga.

Süsinikrikastamisega ei saavutata veel vajalikku pinnakõvadust ja kulumiskindlust. Sellega saadakse vaid soovitatav süsiniku jaotus ristlõike ulatuses. Järgneb karastamine suure süsinikusisaldusega martensiidi saamiseks pinnal (karastamine üle A_1), säilitades väikese kõvadusega sitke südamiku, või üle A_3 südamiku tugevdamiseks. Karastamine on operatsioon, mis tagab tsementiititud terase pinnakihi kõvaduse.

Olenevalt detaili otstarbest kasutatakse tsementiitimisel mitmeid karastuse variante:

- **otsekarastust** (*direct hardening*) süsinikrikastuse temperatuurilt;
- süsinikrikastusele järgnevat **ühekordset karastust** (*single hardening*) või **kahekordset karastust** (*duplex hardening*).

Tsementiititavaid süsinikteraseid karastatakse vees, legeerteraseid – õlis. Nagu eespool oli nimetatud, jääb detaili pinna struktuuri jääkausteniiti olenevalt pinnakihi süsinikusisaldusest ja terase legeerimisastmest.

Kõikidel juhtudel noolutatakse tsementiititud detaile pärast karastamist jääkausteniidi vähendamiseks ja sisepingete kaotamiseks temperatuuril 150...200 °C. Sellise töötuluse tulemusel saadakse pinna kõvadus 58...62 HRC, südamikü kõvadus aga 25...35 HRC (legeerterased) ja kuni 20 HRC (mittelegeerterased).

Nitriitimine

Nitriitimiseks (*nitriding, nitride hardening*) nimetatakse terase pinnakihi rikastamist lämmastikuga, et tõsta pinnakihi kõvadust, kulumiskindlust ja ka korrosioonikindlust ning väsimustugevust. Kasutatakse gaas- ja vedelnitriitimist.

Gaasnitriitimine (*gas nitriding*) toimub tavaliselt temperatuuril 500...600 °C ammoniaagi keskkonnas. Ammoniaagi lagunedes moodustub monolämmastik



Tekkiv monolämmastik difundeerub terasesse, mille tulemusel moodustub kuni mõne kümnendiku mm paksune lämmastikurikas raudnitriidi sisaldav kiht. Kui teras sisaldab tugevaid nitriide moodustavaid legeerivaid elemente, näiteks alumiiniumi ja kroomi, siis moodustuvad raudnitriidile sarnased disperssed nitriidid – CrN, Cr₂N, AlN jt, mis tõstavad veelgi terase kõvadust. Nitriitimine on lõplik termotöötuluse etapp.

Nitriiditud kihi suur kõvadus (850 ... 900 HV1) on tingitud tekkivate kõvade nitriidide suurest disperssusest ja nende termilisest püsivusest. Nitriiditud kihi kõvadus on muutumatu kuni 400 °C ega muutu oluliselt ka pikaajalisel kuumutamisel kuni 520 °C; lühiajalise kuumutamisel ei pehmene teras oluliselt ka temperatuuril kuni 650 °C. Selles seisneb nitriiditud kihi põhiline erinevus tsementiititud kihist, mis pehmeneb tunduvalt madalamatel temperatuuridel martensiidi noolutuse tagajärjel. Nitriitimise eeliseks on ka asjaolu, et puudub martensiitmuutus ega teki faasimuutusest tingitud pingeid. Nitriitimine on tavaliselt valmisdetaili viimane töötulusviis, võimaluse korral ka ilma lõpplihvimiseta.

Suure kõvaduse tõttu on nitriiditud detailid kulumiskindlad. Nitriitimise tagajärjel paraneb märgatavalt (kuni 50 %) ka terase väsimustugevus, mis on tingitud survepingete tekkimisest lämmastikku sisaldavate faaside suurema mahu tagajärjel. Hea

väsimustugevuse eelduseks on ka südamiku suur tugevus. Siit tulenevalt nitriiditakse tavaliselt pärast parendamist, mille tulemusel saadakse kõva pinnakiht ning suhteliselt kõva ja tugev südamik. Sel juhul noolutatakse tavaliselt temperatuuridel 600...700 °C, mis kõrvaldab detailis esinevad sisepinged ja materjal on hästi töödeldav, eriti pinnakiht, mille süsinikusisaldus on mõnevõrra vähenenud. Kuid ühitada võidakse ka karastamisele järgnev kõrgnoolutus ja nitriitimine.

Nitriitimise puuduseks on protsessi kõrge maksumus, tingituna eelkõige selle pikast kestusest (tavaliselt kümneid tunde), mistõttu nitriitimist kasutatakse eelkõige legeerteraste korral.

Vedelnitriitimine (*liquid nitriding*) toimub naatrium- ja kaaliumtsüaniide sisaldavates sulasoolades. Saadakse samasugune efekt nagu mittelegeer- ja legeerteraste gaasilisel nitriitimisel.

Plasma- ehk **ioonnitriitimine** (*plasma nitriding, ion nitriding*) on viimasel ajal üha laialdasemalt kasutatav nitriitimismoodus, mida tehakse ioniseeritud gaasis, mis moodustub nitriiditava detaili (katoodi) ümber; lämmastikuioonid ioniseeritud gaasist tungivad detaili pinnakihti. Selle tulemusel kuumeneb ka katood. Ioonnitriitimistemperatuur (350...600 °C) ja kestus (2...10 h) olenevad eelkõige pingest ja ionide voost ning on väiksemad kui tavanitriitimismooduste korral.

Nitrotsementiitimine

Nitrotsementiitimiseks (*carbonitriding, nitrocarburizing*) nimetatakse terase pinna kihi üheaegset süsiniku ja lämmastikuga rikastamist; tahkes ja vedelas keskkonnas toimuvat protsessi nimetatakse ka **tsüaanimiseks** (*cyaniding, cyanidation*).

Gaasnitrotsementiitimine (*gas carbonitriding*) toimub süsinikku (CO, CH₄ jt) ning lämmastikku (NH₃) sisaldavate gaaside segus. Tegemist on süsinikrikastuse ja nitriitimise kombineeritud protsessiga: kõrgematel temperatuuridel toimub eelkõige süsinikuga rikastamine, madalamatel temperatuuridel – lämmastikuga. Nitrotsementiitimine sarnaselt tsementiitimisega eeldab lõppoperatsioonina karastamist, mille tulemusel saame martensiitstruktuuri.

Nitrotsementiitimine sobib eelkõige keskmise süsinikusisaldusega mittelegeerterastele, aga ka legeerterastele, mille südamiku tugevusomadustele esitatakse täpsemad nõuded. Nitrotsementiitimist tuleks eelistada, kui eesmärgiks on õhukeste kihtide saamine (0,5 mm ja õhemad). Paksemate kihtide saamiseks on kestused pikemad kui tavalisel tsementiitimisel. Seetõttu kasutatakse nitrotsementiitimist eelkõige väiksemate detailide korral.

Pinnakihi rikastamine metallidega

Pinnakihi difuussel rikastamisel metallidega kasutatakse laialdaselt kroomi, alumiiniumi, vanaadiumi jt; neid protsesse nimetatakse vastavalt **kroomimiseks** (*chromizing*), **alumiinimiseks** (*alutizing*), **vanaadimiseks** (*vanadizing*) jne.

Nii nagu teiste termokeemiliste meetodite korral, toimub ka metallidega rikastamine tahkes, vedelas või gaasilises keskkonnas.

Metallide (kroomi, alumiiniumi, vanaadiumi jt) difusioon kulgeb võrreldes süsiniku ja lämmastikuga palju aeglasemalt, sest viimased moodustavad metallidega sisendustardlahuseid, metallid aga asendustardlahuseid. Väikesest difusioonikiirusest tingituna rikastatakse pinnakihti metallidega kõrgematel temperatuuridel (1000...1200 °C) ja pikematel kestustel; saadavad kihid on aga tunduvalt õhemad tsementiitimisel saadavaist.

Kroomimise, alumiinimise ja vanaadimise tulemusel tõuseb eelkõige kuumuspüsivus – tööks sobivad temperatuurid kuni 1000...1100 °C; süsinikteraste kroomimise ja vanaadimise tulemusel suureneb ka teraste kõvadus ja kulumiskindlus.

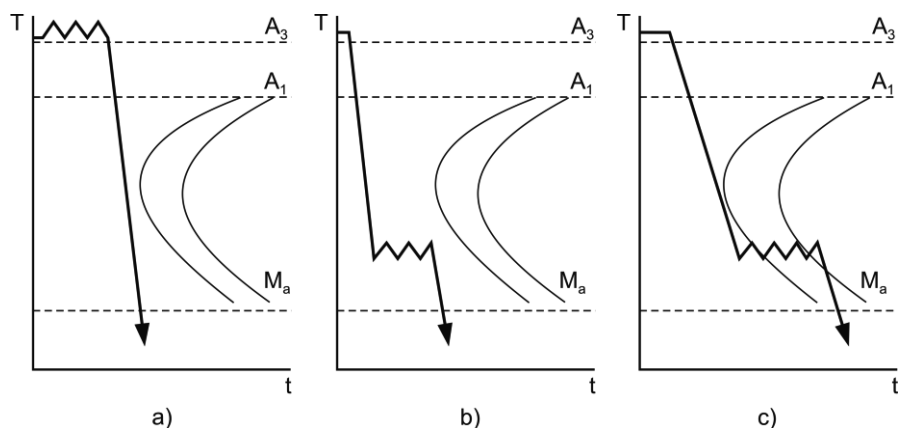
Pidades silmas pinnakihi metallidega rikastamise protsesside suurt töömahukust ja kõrget maksumust, kasutatakse neid eelkõige kallimate ja defitsiitsemate legerivate elementide kokkuhoiu eesmärgil.

Terase termomehaaniline töötlus

Termomehaaniline töötlus ehk **termomehhanotöötlus**, **TMT** (*thermo-mechanical treatment*) seisneb kahe tugevdamismooduse – plastse deformeerimise ja karastamise ühendamises, s.o austeniidi deformeerimises ja järgnevas faasimuutustes jahutamisel (martensiidi tekkes või austeniidi lagunemises). Eristatakse kolme peamist moodust:

1. Kõrgtemperatuurset termomehhanotöötlust, **KTMT** – seisneb austeniidi deformeerimises temperatuuridel üle A_3 ja järgnevas karastamises (Joonis 4.18a).
2. Madalatemperatuurset termomehhanotöötlust, **MTMT** – seisneb allajahutatud austeniidi deformeerimises temperatuuripiirkonnas A_1 -st kuni rekrystalisatsioonitemperatuurini ja järgnevas karastamises (Joonis 4.18b).
3. Isotermilist termomehhanotöötlust, **ITMT** – seisneb allajahutatud austeniidi deformeerimises beiniidi alas ja järgnevas jahutamises (Joonis 4.18c, vt ka p 4.3.1. Beiniitkarastus).

Eelistatum moodus on **MTMT** (puudub järgneval jahutamisel rekrystaliseerumise oht), kusjuures mida suurem on deformatsiooniaste, seda enam kalestub austeniit ja seda tugevam martensiit saadakse. Erinevalt **MTMT**-est austeniidi kalestus **KTMT**-e korral ei säili täielikult. Suurim tugevus saadakse **MTMT** ja **ITMT** korral, suurim sitkus aga **KTMT** korral.



Joonis 4.18. Terase termomehaanilise töötlemise viisid: a – kõrgtemperatuurne; b – madalatemperatuurne; c – isothermiline

Terase külmaga töötlus

Terase **külmaga töötlus** ehk **külmaga töötlemine** (*cold treatment, sub-zero treatment, cryogenic processing*) on karastatud terase, mille struktuuris on jääkausteniit, jahutamine temperatuurideni allapoole $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. See puudutab mittelegeer- ($C > 0,6\%$) ja kõrglegeertööriistateraseid, mille martensiitmuutuse lõpptemperatuur M_l asub allpool $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ning mille jahutamine miinuskraadidesse põhjustab täiendava martensiidi teket. Martensiidi koguse suurenemine toob aga kaasa nii terase kõvaduse kui ka detaili mahu suurenemise ja magnetomaduste paranemise. Need muutused on seda tuntavamad, mida rohkem austeniiti muutub külmaga töötlemisel martensiidiks.

Terase külmaga töötlemisel tuleb arvestada kahte olulist momenti.

1. Külmaga töötlemise temperatuur oleneb martensiitmuutuse lõpptemperatuurist M_l . Kuna muutus toimub ainult jahutamisel martensiidi tekkimise vahemikus, siis ei ole soovitatav jahutada palju allapoole kõnealusele terasele omast martensiitmuutuse lõpptemperatuuri M_l . Temperatuuri M_l asukoht oleneb terase keemilisest koostisest ja mittelegeerterastele on see mitte allpool $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$.
2. Termotöötlemisel, mis sisaldab külmaga töötlemise, tuleb arvestada ka austeniidi stabiliseerumist. Martensiitmuutuse lõpptemperatuuri piirkonnas mõjutab seisutus jääkausteniiti edasise muutuse suhtes. Seetõttu on soovitatav külmaga töödelda vahetult pärast karastust.

Külmaga töödeldakse paljusid suure süsinikusisaldusega terastööriistu, millelt nõutakse maksimaalset kõvadust. Kuna täppisdetailidelt (näiteks mõõteriistad, kaliibrid jm) nõutakse mõõtmete stabiilsust, siis vältimaks mõõtmete muutust temperatuuri kõikumisel töödeldakse ka neid külmaga.

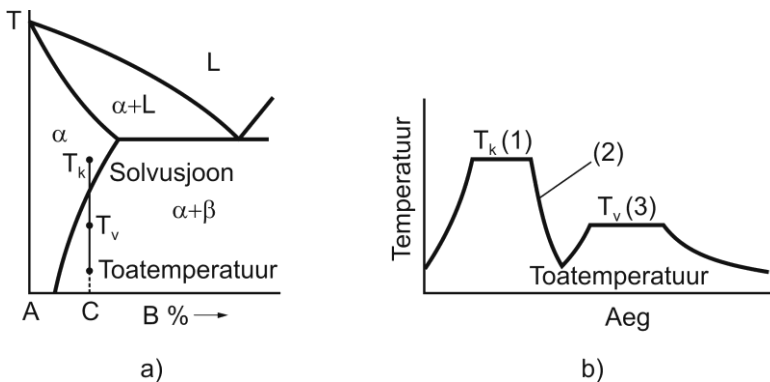
4.3.2. Mitteraumasulamite tugevdav termotöötlus

Kõik kuus p 4.3 kirjeldatud tugevnemismehhanismi on kasutatavad ka mitteraudmetallide ja -sulamite korral. Tardlahustugevdamisega on võimalik muuta ühefaasiliste materjalide tugevust. Kalestamine on arvestatav meetod, kui materjal on küllaldase plastisusega. Eutektstruktuuriga sulamid on arvestatavalt dispersioonkõvenevad. Kõikidest võimalikest viisidest kõige tõhusam mitteraudmetallide ja -sulamite tugevdamise mehhanism on sadestuskõvenemine kõvafaasi väljasadestamise kaudu. Sadestuskõvenemine eeldab lahustuvuse muutust – vähenemist temperatuuri alanemisega ja üheks selliseks süsteemiks on Al-Cu-sulamid.

Sadestuskõvenemine

Sadestuskõvenemine (*precipitation hardening*) seisneb peente osakeste (sadestiste) tekkes, mis toimivad barjääradena dislokatsioonide liikumisel, tugevdades ja kõvendades metalli. See on põhiline tugevdava termotöötluse moodus alumiiniumi-, vase-, magneesiumi- jt mitteraumasulamite korral, aga ka teatud teraste puhul (martensiitvanandatavad terased).

Eelduseks, et üks sulamisüsteem oleks sadestuskõvenev, on tardolekus lahustuvuse olemine temperatuurist (solvusjoon on kaldu) (Joonis 4.19a). Sulam peab toatemperatuuril olema kahefaasiline, kuumutamisel aga teine faas lahustub. Sulam koostisega C vastab neile tingimustele. Nimetatud termotöötlus sisaldab kolme etappi (Joonis 4.19b):

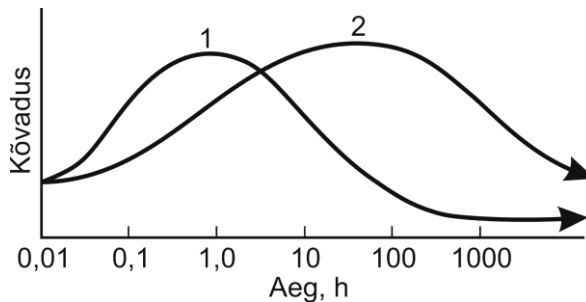


Joonis 4.19. Terase termomehaanilise töötlemise viisid: a – kõrgtemperatuurine; b – madalatemperatuurine

- 1) **tardlahustöötlus** (*solid solution treatment*), mis seisneb kuumutamisel üle solvusjoone temperatuurini T_k (tuntud ka kui karastustemperatuur) ühefaasilisse alasse. Vajalik on seisutus teise faasi täielikuks lahustumiseks esimeses;
- 2) karastamine (kiire jahutus toatemperatuurini), mille tulemuseks on üleküllastatud tardlahus α ;

3) sadestustöötlus, milleks kuumutatakse sulam temperatuurini T_v (vanandustemperatuur), s.o allpool T_k -d. Seda etappi nimetatakse ka **vanandamiseks** (*ageing*), kogu töötlust aga **vananduskõvendamiseks**. Mõningate sulamite korral toimub vananemine ka toatemperatuuril, mistõttu termin **sadestuskõvenemine** on täpsem. Kui vananemine leiab aset toatemperatuuril, on tegemist **loomuliku vanandamisega** (*natural ageing*), kui seda tehakse kõrgematel temperatuuridel, on tegemist **kunstliku vanandamisega** (*artificial ageing*).

Vanandamise/vananemise käigus kasvab sulami tugevus ja kõvadus. Soovitavate omaduste saamiseks on oluline vanandustemperatuur ja kestus. Kõrgematel vanandustemperatuuridel (Joonis 4.20, kõver 1) saadakse maksimaalne kõvadus kiiremini kui madalamatel temperatuuridel (kõver 2). Mõlemal juhul kaasneb pikaajalise vanandamise tulemusena tugevuse ja kõvaduse langus – seda nähtust nimetatakse **ülevanandamiseks** (*overageing*).



Joonis 4.20. Vanandustemperatuuri ja -kestuse mõju sadestuskõvendamisel (1 – kõrgem, 2 – madalam temperatuur)

Alumiiniumisulamite termotöötlus

Alumiiniumisulamite tugevdamiseks rakendatakse karastamist ja vanandamist, ebapüsivate struktuuride ja kristalse ehituse deformatsioonidefektide kõrvaldamiseks ka lõõmutamist.

Lõõmutus (*annealing*). Rakendatakse homogeniseerivat ja ka rekristalliseerivat lõõmutamist. Valandite homogeniseerivat lõõmutamist kasutatakse esmajoones dendriitse likvatsiooni (metalli kristallide koostise ebaühtluse) kõrvaldamiseks. Lõõmutatakse temperatuuril 450...520 °C kestusega 4...40 h, jahutatakse õhus või ahjus. Rekristalliseerivat lõõmutamist tehakse olenevalt sulami koostisest temperatuuril 350...500 °C kestusega 0,5...2 h karestumise kõrvaldamise ja tera peenendamise eesmärgil.

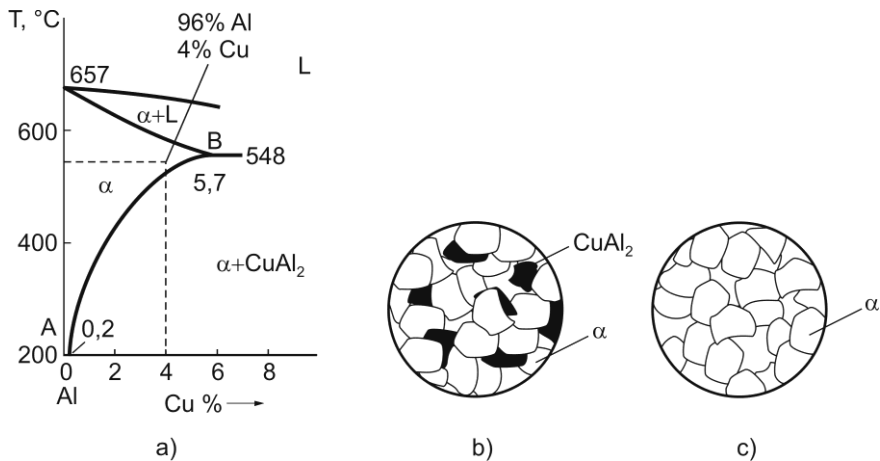
Karastus (*hardening*) on kuumutamine temperatuurini, mil sulami intermetallilised faasid lahustuvad alumiiniumis kas täielikult või osaliselt, sellel temperatuuril seisutamine ja seejärel kiire jahutamine üleküllastatud tardlahuse saamiseks. Nii on

Al-Cu- ja Al-Mg-sulamite karastustemperatuur määratud joonega AB (Joonis 4.21): kuni 5,7 % vasesisaldusega sulamite puhul – üle lahustuvusjoone AB, suurema vasesisaldusega sulamite korral allpool eutektjoont (548 °C). Karastamine toimub vees. Pärast karastamist on sulamitel üleküllastunud α -tardlahuse struktuur (sulamites vasesisaldusega üle 5 % esineb vähesel määral ka ühend CuAl_2), mistõttu nad karastatult ei ole kuigi heade tugevusomadustega (suhteliselt väike tugevus), ent on suure plastsusega.

Vanandamine (ageing) on karastamisele järgnev seisutamine toatemperatuuril mõned ööpäevad – **loomulik vanandamine (natural ageing)** või kõrgendatud temperatuuril kuni 1 ööpäev – **kunstlik vanandamine (artificial ageing)**. Vanandamise käigus toimuvad üleküllastunud α -tardlahuses muutused, mille tulemusena sulam tugevneb. Võib eristada kaht staadiumi:

- 1) loomulik (20 °C) ja madalatemperatuurisel kunstlikul vanandamisel (kuni 100...150 °C) ei täheldata üleküllastunud tardlahusest liigse vase eraldumist, toimub ainult vase aatomite ümberpaigutus tardlahuse kristallivõres ja vaserikaste alade teke;
- 2) kuumutamisel temperatuuridel 200...250 °C toimub stabiilse ühendi CuAl_2 teke.

Vanandamisel suureneb sulami kõvadus, tõmbetugevus ja voolepiir (1. staadiumil saavutatakse suhe $\sigma_y / \sigma_u = 0,6 \dots 0,7$; 2. staadiumil kuni 0,9...0,95). Seejuures väheneb aga plastsus ja sitkus. Alumiiniumisulamite termotöötlus (vanandamine) põhineb asjaolul, et nimetatud süsteemi sulamites esineb piiratud lahustuvus, mis erineb suuresti madalal ja kõrgel temperatuuril. Tüüpilisteks selle rühma sulamite esindajateks on **Al-Cu-sulamid**, mille faasidiagrammi osa on Joonisel 4.21



Joonis 4.21. Al-Cu faasidiagrammi Al-poolne osa (a) ja sulami (4% Cu) struktuuriskeemid pärast jahutamist temperatuurilt 550 °C aeglaselt (b) ja kiirelt (c)

Vase lahustuvus alumiiniumis on toatemperatuuril maksimaalselt 0,2 massiprotsenti, kuid temperatuuril 548 °C võib see ulatuda 5,7 massiprotsendini. Näiteks kui jahutada aeglaselt 5 % vasesisaldusega sulamit, saame sulami struktuuri, nagu on Joonisel 4.21b – ühendi CuAl_2 osakesed on sadestunud Al-tardlahuse terapiiridele. Kui, vastupidi, kiirelt jahutada kõrge temperatuurini kuumutatud sulamit, saab üleküllastatud Al-tardlahuse struktuuri (Joonis 4.21c). Selline tardlahus osutub ebapüsivaks ja on tendents tardlahuse kristallivõrest vaseatomite väljadifundeerimiseks CuAl_2 osakestena. Kuna Cu-sisaldus ühendis CuAl_2 on 53,5 massiprotsenti, peab toimuma märkimisväärne vase difusioon tekitamaks vaserikkaid alasid alumiiniumi kristallivõres (on eelduseks ühendi CuAl_2 osakeste tekkeks). See termotöötlusel disperssete CuAl_2 osakeste tekkele eelnev Cu difusioonist põhjustatud vaserikaste alade teke toob kaasa Al kristallivõres pingete tekke ja seetõttu suureneb kõvadus ja tugevus. Need difusiooniprotsessid Al-Cu-sulameis ja sellest tulenev kõvenemine toimuvad aeglaselt. Vähesest termilisest energiast tulenevalt ei ole Cu difusioon Al-Cu-sulameis piisav CuAl_2 ühendi tekkeks ilma temperatuuritõusuta. Temperatuuritõus toob kaasa Cu difusiooniiruse kasvu ja nii luuakse eeldused ühendi CuAl_2 tekkeks. Kõrgel temperatuuril sadestub CuAl_2 täielikult välja, mille tulemuseks kaovad pinged Al kristallivõrest, sulam pehmeneb ning selle tugevus väheneb. Seda pehmenemist nimetatakse **ülevananimiseks** (*overageing*). Sulamit, mille kõvadus on aeglaselt suurenenud antud temperatuuril vanandamise tulemusena, nimetatakse **vanandatud sulamiks** (*age hardened alloy*).

Vanandatud Al-Cu-sulameid kasutatakse ehituskonstruksioonides, lennukiehituses jm. Vask vähendab nende sulamite korrosioonikindlust, mistõttu lehtmaterjali plakeeritakse korrosioonikindluse tõstmiseks õhukese puhta alumiiniumi kihiga.

4.4. KORDAMISKÜSIMUSED

1. Mis on termotöötlus?
2. Kuidas termotöötlust liigitatakse?
3. Millised on terase protsessitermotöötlusviisid?
4. Miks pakub meile huvi lihtsustatud Fe-Fe₃C faasidiagramm termotöötluse seisukohalt?
5. Mis jooned on A_1 , A_3 ja A_{cm} teraste faasidiagrammil?
6. Millised on lõõmutusoperatsioonide eesmärgid?
7. Milliseid terase protsessitermotöötluste saab teha ilma austenitisatsioonita?
8. Mis eesmärgil kasutatakse madallõõmutust?
9. Mis vahe on täislõõmutusel ja normalisatsioonil? Tekkivad struktuurid?
10. Miks on normaliseerimine odavam võrreldes lõõmutamisega?

11. Kuidas terase koostis (C-sisaldus) mõjutab protsessitermotöötlust?
12. Millised on mitterauasulamite protsessitermotöötluste kolm eesmärki?
13. Millised on metallide tugevdamise tõhusamad mehhanismid?
14. Mis on austeniidi isothermilise lagunemise diagramm (C-kõverad)?
15. Milles seisneb martensiitmuutus? Põhiline erinevus perliitmuutusest?
16. Mis on martensiididiagramm? Millist informatsiooni see annab?
17. Millest sõltub martensiidi kõvadus? Milline on ta maksimaalne HRC?
18. Mis on austeniidi pidevjahtumise diagramm?
19. Mis juhtub martensiidiga selle kuumutamisel? Millised muutused toimuvad?
20. Millised on terase stabiilsed faasid temperatuuridel alla A_1 ?
21. Millised on martensiidi tugevuse/kõvaduse ja sitkuse peamised mõjurid?
22. Miks pole jääkausteniit soovitatav terase struktuuris? Kuidas sellest lahti saada?
23. Miks noolutatakse martensiitstruktuuriga teraseid enne kasutamist?
24. Kuidas valitakse teraste karastustemperatuure? Tooge põhjendused.
25. Mis on karastuvus? Millest see oleneb?
26. Mis on tavakarastus?
27. Mis on kriitiline jahutuskirrus karastamisel? Selle mõjurid?
28. Millised on veekarastamise eelised ja puudused?
29. Mis põhjusel tekivad jääkpinged ja praod karastamisel?
30. Mis on läbikarastuvus? Millise katse/teimiga seda määratakse?
31. Mis on pindkarastus? Kuidas kuumutatakse pindkarastamisel?
32. Millised on termokeemilise töötlemise põhiprotsessid?
33. Mis on tsementiitimine? Selle läbiviimise moodused?
34. Mis on nitriitimine? Selle eesmärgid?
35. Milles seisneb termomehaaniline töötlus? Mille poolest erineb kõrg- ja madalatemperatuurne TMT?
36. Miks töödeldakse teraseid külmaga?
37. Millised on toatemperatuuril tasakaalulise (aeglasel jahutamisel saadud) sulami Al-4 % Cu struktuuriosad?
38. Millised on alumiiniumisulamite vanandamiskõvendamise kolm operatsiooni?
39. Mis vahe on Al-sulamite loomulikul ja kunstlikul vanandamisel? Milline on kergemini kontrollitav?
40. Kuidas liigitatakse Al-sulamid lähtudes töötlustest?

5. METALSED MATERJALID

<p>5.1. RAUD JA RAUASULAMID</p> <p>5.1.1. Rauametallurgia Metallurgiaprotsessid Malmi tootmine Terase tootmine</p> <p>5.1.2. Terased Mittelegeerterased Legeerterased Teraسته tähistus Legeerkonstruktsiooniterased Korrosioonikindlad terased Legeertööriistaterased</p> <p>5.1.3. Malmid Malmide liigitus, struktuur ja omadused Lisandite mõju malmi struktuurile Malmide tähistus</p> <p>5.2. MITTERAUDMETALLID JA MITTERAUASULAMID</p> <p>5.2.1. Mitterauametallurgia Metallurgiaprotsessid Vasemetallurgia Alumiiniumimetallurgia Magneesiumimetallurgia</p>	<p>Titaanimetallurgia</p> <p>5.2.2. Vask ja vasesulamid Puhas vask Messingid Pronksid Vaseniklisulamid Vasesulamite tähistus</p> <p>5.2.3. Alumiinium ja alumiiniumisulamid Alumiinium Alumiiniumisulamid deformeeritavad valatavad Alumiiniumisulamite tähistus</p> <p>5.2.4. Muud metallid ja metallisulamid Magneesium ja magneesiumisulamid Tsink ja tsingisulamid Titaan ja titaanisulamid Nikkel ja niklisulamid Supersulamid ja rasksulavad metallid Plii, tina ja nende sulamid Väärismetallid</p> <p>5.3. KORDAMISKÜSIMUSED</p>
--	--

5.1. RAUD JA RAUASULAMID

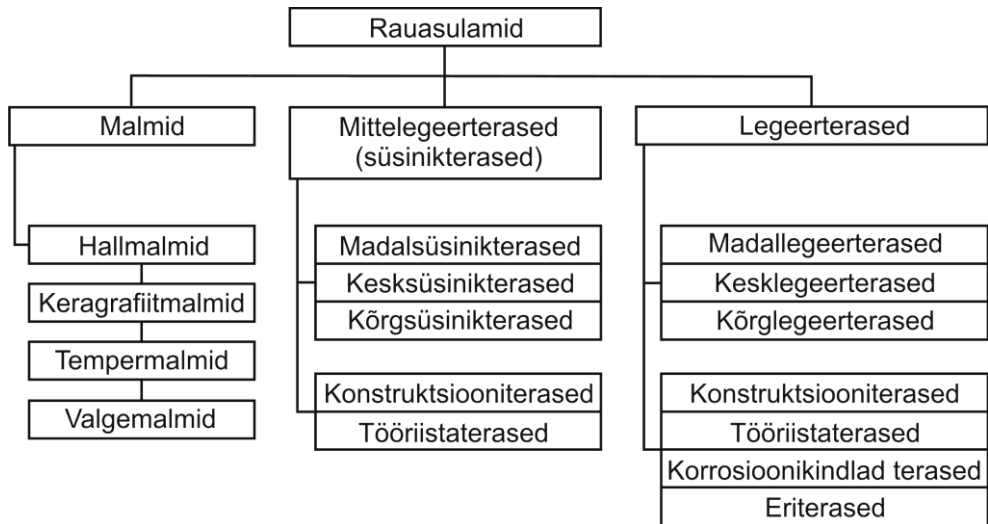
Tehnomaterjalid on kättesaadavad väga laia kasutusomaduste ja näitajatega. Enamikul juhtudel on need kontrollitavad läbi materjali saamise või detailide valmistamise. Metallid on klassikaliseks näiteks ajastust olenevatest materjalidest. Nii on nende järgi järjestatud ka ajastuid

Kiviaeg → Pronksiaeg → Rauaaeg → Komposiitmaterjalieaeg

Metallide iseärasused olenevad eelkõige sulatus- ja rafineerimisprotsessidest, eelkõige puhtusest ja lisandite tüübist ning olemusest. Tardumisprotsess mõjutab struktuuri iseärasusi, mis omakorda kandub üle ka tootele. Sellised protsessid nagu

lehe valtsimine mõjutab materjali omadusi eri suundades, mida tuleb silmas pidada järgneval töötlemisel ja kasutamisel.

Kõnealuses osas vaadeldakse rauda ja põhilisi rauasulamiteid (Joonis 5.1). Need materjalid panid aluse tööstusrevolutsioonile ca 150 aastat tagasi ja on uueaegse tsivilisatsiooni selgrooks.



Joonis 5.1. Rauasulamite liigitus

5.1.1. Rauametallurgia

Metallurgiaprotsessid

Füüsikalise-keemilise iseloomu alusel liigitatakse metallurgilised protsessid järgmiselt.

Pürometallurgia (*pyrometallurgy*) – metallurgiaharu, kus metallide ja nende sulamite tootmisel kasutatakse kõrget temperatuuri, mis tekib kütuse põlemise või teiste eksotermiliste reaktsioonide tulemusel. Pürometallurgilisi protsesse kasutatakse rauasulamite (malmi, terase, ferrosulamite), samuti mõnede teiste metallide ja nende sulamite tootmisel.

Hüdrometallurgia (*hydrometallurgy*) – metallurgiaharu, kus metallide tootmisel kasutatakse märgmeetodeid: maake, maagikontsentrante või tööstuslikke jäätmeid töödeldakse keemiliste reagentide (hapete, aluste, soolade) vesilahustega, millest puhas metall välja sadestatakse.

Püro- ja hüdrometallurgilised protsessid sageli täiendavad teineteist, näiteks sardamine enne leostamist.

Elektrometallurgia (*electrometallurgy*) – metallurgiaharu, kus metallide tootmisel maakidest ja maagikontsentratsioonidest ning metallide rafineerimiseks, sulamite tootmiseks ja neile sobiva struktuuri andmisel kasutatakse elektrivoolu. Elektrometallurgiat kasutatakse legerteraste, ferrosulamite, rasksulavate ning keemiliselt aktiivsete metallide (Ti, Cr, Mo, W, V jt) ja nende sulamite tootmisel. Elektrokeemilistest protsessidest rakendatakse peamiselt elektrolüüsi (Al, Zn, Cu jt tootmisel).

Pulbermetallurgia (*powder metallurgy*) – metallurgiaharu, mis hõlmab pulbrite (nii metalsete kui ka mittemetalsete) tootmist ja nendest toodete valmistamist. Pulbermetallurgiale on iseloomulik, et materjal ja toode valmivad üheaegselt. Pulbermetallurgilisel teel valmistatakse tooteid **rasksulavatest metallidest** (*refractory metals*), **kõvasulamitest** (*hardmetals*) jt **pulbermaterjalidest** (*powder metallurgy material*).

Sageli liigitatakse metallurgilised protsessid ka segatunnuste järgi, näiteks püroelektrometallurgia, hüdroelektrometallurgia jne.

Malmi tootmine

Malm on suure süsinikusisaldusega (> 2,14 massiprotsendi) rauasulam, mis sisaldab samuti tavalisandeid (Si, Mn, P, S) ja vahel legerivaid elemente. Eristatakse **toormalmi** (*pig iron, blast-furnace iron*) ja **valumalmi** (*foundry iron*). Toormalm on terase tootmise põhiline tooraine. Väiksem osa toormalmist töödeldakse valutsehhiides valumalmiks, millest toodetakse valandeid. Toormalmi toodetakse **kõrgahjus** (*blast furnace*).

Metallurgiline toore

Erinevalt väärismetallidest (Au, Ag, Pt) rauda nagu enamikku teisi metalle looduses praktiliselt puhtal kujul ei esine. Sellepärast kasutatakse raua ja rauasulamite tootmisel rauda sisaldavaid maake. **Maagiks** (*ore*) nimetatakse maavara, milles kasuliku **mineraali** (*ore mineral*) või puhta metalli sisaldus on piisavalt suur metalli majanduslikult põhjendatud tootmiseks.

Rauamaak (*iron ore, ironstone*) koosneb rauda sisaldavast mineraalidest ja **aherainest** (*rock, waste rock*). Levinumad rauamaagid ja neis sisalduvad mineraalid ning maakide ligikaudne rauasisaldus on Tabelis 5.1.

Tabel 5.1. Rauamaakide koostis

Maak	Mineraal ja selle koostis	Fe, %
Punane rauamaak (red iron ore)	Hematiit (<i>hematite</i>), Fe_2O_3	50...60
Magnetiline rauamaak (black iron ore; magnetic iron ore)	Magnetiit (<i>magnetite</i>), Fe_3O_4	55...65
Pruun rauamaak (brown iron ore)	Limoniit (<i>limonite</i>), $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$	30...50
Karbonaatne rauamaak (<i>spathic iron ore</i>)	Sideriit (<i>siderite</i>), $FeCO_3$	30...40

Eestis leidub nn **soorauamaak** (*bog iron ore, swamp ore*), mille mineraalse osa moodustab limoniit $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$. Rauamaaki leidub Eestis Rakvere maardlas.

Mangaanimaagis (*manganese ore*) esineb Mn oksiidide või karbonaatidena: MnO_3 , Mn_2O_3 , $MnCO_3$ jt. Mangaanimaaki kasutatakse malmi tootmisel kõrgahjudes, ferromangaani jt suure Mn-sisaldusega valumalmide tootmisel.

Räbusti (*flux, fluxing agent*) on sulatusahju viidav, sulametalli pinnale kerkivat vedelat **räbu** (*slag*) moodustav materjal, mille ülesandeks on sulametalli puhastamine lisanditest (aheraine, tuhk, S, P). Rauamaakide aheraine on tavaliselt happeline, **rändioksiidi** (*silica*) SiO_2 ülemääraga. Seetõttu kasutatakse malmi tootmisel aluselisi räbusteid, põhiliselt **lubjakivi** (*limestone*). Lubjakivi on põhiliselt **kaltsiidist** (*calcite*) $CaCO_3$ koosnev kivim. **Särdamisel** (*roasting, firing*) temperatuuridel $>900\text{ }^\circ\text{C}$ lubjakivis sisalduvad karbonaadid lagunevad ja tekivad oksiidid CaO , MgO .

Kütuse ülesandeks malmi tootmisel on olla nii soojusallikaks kui ka reagentiks raua taandamisel ehk redutseerimisel maagist. **Taandamiseks** (*reduction*) nimetatakse hapniku, kloori jne eemaldamist oksiididest, kloriididest jt metalliühenditest ja samuti maakidest, kasutades selleks **taandajaid** ehk **redutseerijaid** (*reducing agent, reducer, reductant*).

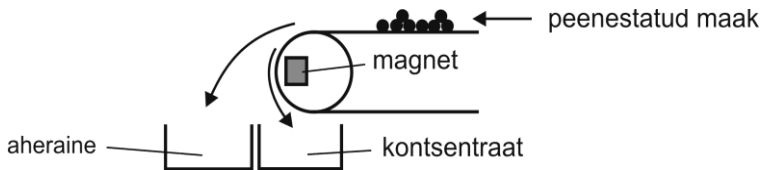
Peamiseks kütuseks on **koks** (*coke*), mida toodetakse koksistuva kivisöe õhu juurdepääsuta kuumutamisel $950\text{...}1100\text{ }^\circ\text{C}$. Koksi suur poorsus (kuni 50 %) tagab kõrge reaktsioonivõime põlemisel ja taandamisel. Koks sisaldab suures koguses (9...13 %) tuhka ja kuni 2 % S. Koksi maksumus moodustab kuni poole saadava malmi hinnast, mistõttu koksikulu vähendamiseks kasutatakse täiendavalt looduslikku gaasi, masuuti ja kivisöetolmu.

Toorme ettevalmistamine

Toorme ettevalmistust on vaja, et tõsta kõrgahju tootlikkust, vähendada koksikulu ja parandada malmi kvaliteeti. Kogu protseduur seisneb maagitüki suuruse

ühtlustamises, maagi rauasisalduse suurendamises ja kahjulike lisandite P ja S vähendamises. Tähtsamad etapid on peenestamine, sorteerimine, rikastamine ja tükistamine.

Peenestamine (*comminution, fragmentation*) ja tüki suuruse järgi **fraktsioonimine** ehk **osistamine** (*sizing, classifying*) on toorme ettevalmistamise esimesed etapid. Kõrgahju viimiseks on tükide optimaalseks suuruseks 30...100 mm. Ettevalmistavateks operatsioonideks on ka maagi magnetrikastamine ja tükistamine, kui maak on peenem kui 0,1 mm.



Joonis 5.2. Magnetseparaator

Rikastamine (*benefication, concentration, dressing*) on maagi töötlemine kasulike mineraalide eraldamiseks aherainest. Kasutatakse magnet- ja gravitatsioonirikastamist ning pesemist. Kõige rohkem kasutatakse **magnetrikastamist** (*magnetic beneficiation, magnetic concentration*), kus peenestatud magnetiline maak juhitakse transportööril magnetvälja, kus seda on võimalik eraldada mittemagnetilisest aherainest (Joonis 5.2). Nõrgalt magnetiliste maakide puhul eelneb magnetrikastamisele **magnetsärdamine** (*magnetizing roasting*), mis ühtlasi eemaldab maagist ka suure osa väävlist. **Gravitatsioonirikastamine** (*gravity beneficiation, gravity concentration, gravity separation*) toimub suure tihedusega vedelikes, kus aheraine kerkib pinnale. Odavam rikastamismeetod on veejoaga pesemine, mis võimaldab eraldada mineraalsed maagi osised kergemast aherainest. Rikastamise produkti nimetatakse **maagikonsentraadiks** (*concentrate, beneficiated ore*).

Tükistamine (*agglomeration*) on peene maagi või konsentraadi ettevalmistusprotsess – sobiva suurusega tükide saamine. Metallurgias kasutatakse selleks kahte meetodit: aglomeerimist ja granuleerimist.

Aglomeerimise (*sintering*) lõpp-produktiks on **aglomeraat** (*agglomerate*), mis saadakse veega niisutatud peenest maagikonsentraadist, peenestatud koksist ja lubjakivist. Saadud segu süüdatakse lintaglomeraatoris, kus kütus osaliselt põleb ja toimuvad keemilised reaktsioonid: lubjakivi $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$; $\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2$; osaline taandamine $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{FeO}$; silikaatide tekkimine $\text{FeO} + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{FeSiO}_3$. Tekkinud sulanud silikaat tagab osakeste kokkupaakumise – aglomeraadi tekkimise.

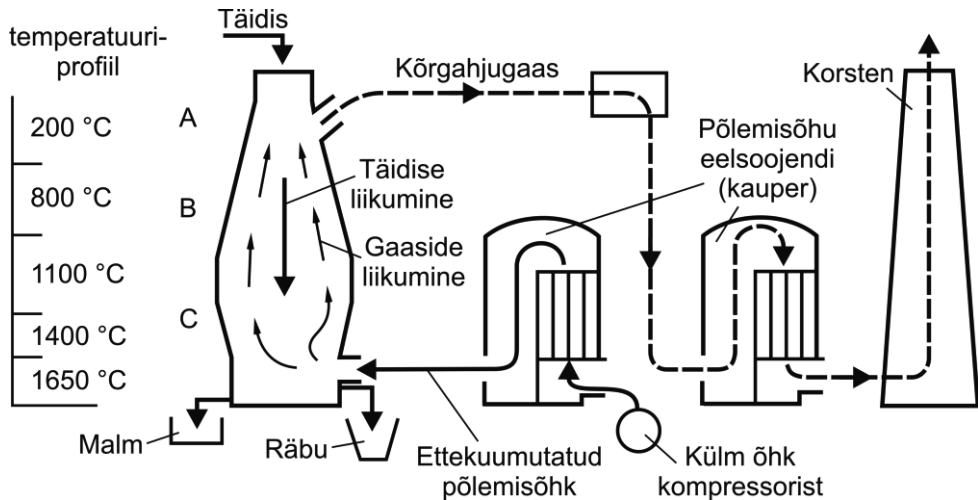
Känkimise (*pelletizing*) lõpp-produktiks on **veerkängid** (*pellets*). Veerkängude saamiseks segatakse rikastatud maagikonsentraat, sageli ka lubjakivi ning savi (kasu-

tatakse sideainena) veega ning juhitakse taldrikgranulaatoritesse, kus toimub veerkätkude mehaaniline rullimine. Edasi veerkätkud kuivatatakse ja **särratakse** (*roasting*) neile tugevuse andmiseks temperatuuridel 1200...1300 °C.

Aglomeraad ja veerkätkud erinevad oma keemilise koostise poolest, sest viimased ei sisalda taandavat koksi, mistõttu särdamisel toimub veerkätkide oksüdeerumine: $\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$.

Kõrgahjuprotsess

Kõrgahi (*blast furnace*) (Joonis 5.3) on vastuvoolu põhimõttel pideva režiimiga töötav **kaevusahi** ehk **šahtahi** (*shaft furnace*), milles **täide** (*burden, charge*) laskub pidevalt allapoole, kuumad gaasid liiguvad vastassuunas, ülespoole. Suuremate kõrgahjude kasulik maht on kuni 5000 m³ ja sellistes toodetakse kuni 5 mln tonni malmi aastas. Kõrgahju tööpõhimõte on näidatud Joonisel 5.3. Kõrgahjus toimuvad **malmisulatusel** (*iron smelting*) järgmised protsessid:



Joonis 5.3. Kõrgahju tööpõhimõte. Tsoonid: A – täidise kuumutamine, B – kaudtaandamine, C – otsetaandamine.

1. Kütuse põlemine

Ettekuumutatud põlemisõhu sissepuhumisel:



kus Q on eksotermiliselt eralduv soojushulk.

Loodusliku gaasi **põlemisel** (*combustion*):



Tekkinud põlemisproduktid reageerivad koksiga:



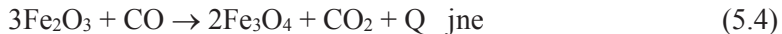
Tekib gaaside segu, kus CO on peamine raua redutseerija (taandaja).

2. Raua taandamine

Raua taandamine toimub järgmise skeemi järgi:



kusjuures taandajateks on gaasid (CO, H₂) või tahke süsinik C. Tahke süsinikuga taandamist nimetatakse **otsetaandamiseks** (*direct reduction*), gaasidega – **kaudtaandamiseks** (*indirect reduction*). Kaudtaandamine toimub peamiselt süsinikoksiidi toimel, näiteks esimesel etapil



Kaudsel taandamisel kõrgahju šahtis (Joonis 5.3, tsoon B) taandub 40...60 % Fe. Ülejäänud raud taandub otseselt, tahke süsinikuga temperatuuridel üle 950... 1000 °C tsoonis C:



3. Raua rikastamine süsinikuga

Raua rikastamine süsinikuga (*carbon pick-up*) algab temperatuuril 400...500 °C (kaevuse ülaosas) ja lõpeb 1300...1400 °C juures. Nendel temperatuuridel on taandatud raud tahkes olekus (käsnauna), mil toimub süsinikuga rikastumine:



Süsinikusisalduse suurenemisel metalli sulamistemperatuur alaneb. Süsinikusisaldusel 1,8...2 % algab temperatuuridel 1150...1200 °C rauasüsinikusulami sulamine. Sulametalli koldesse valgumisel uhub see koksi ja rikastub süsinikuga veelgi.

4. Malmi moodustumine

Koldesse kogunenud sulametall (malm) sisaldab 3,7...4 % C, kasulike lisanditena Mn, Si ja kahjulike lisanditena S, P.

Mangaan tuleb raua- ja mangaanimaagist. Tema redutseerimine metalliks toimub ahjus analoogselt rauaga (kaudselt CO abil või otseselt C abil).

Räni leidub maagi aheraines ja kütuses olevas tuhas ränidioksiidina SiO₂ ning samuti silikaatidena 2FeO · SiO₂. Räni taandamine toimub otseselt, C abil:



Fosfor esineb rauamaagis peamiselt ühendina $\text{P}_2\text{O}_5 \cdot 3\text{CaO}$ ja taandatakse kas otseselt C abil või kaudselt, gaasidega (H_2 , CO).

Väävel on eriti kahjulik lisand nii malmis kui ka terases ja S põhiallikaks on koks (sisaldab 0,5...2 % S). Kõrgahjus eraldub kuni 20 % S gaasidena SO_2 , H_2S jt. Osa väävlist ühendina FeS lahustub malmis, osa eemaldatakse räbuse aluselise räbustit kasutades reaktsiooniga



5. Räbu tekkimine

Kõrgahjus tekib maagi aheraine, räbusti ja kütusetuha kokkusulamise tulemusena keeruka koostise, suhteliselt madala sulamistemperatuuri ja väikese tihedusega räbu, mida on võimalik kõrgahju räbuavast aeg-ajalt välja lasta (Joonis 5.3). Sulatamise käigus jälgitakse pidevalt räbu koostist – vaid aluseliste oksiidide (CaO , MgO) ja happeliste oksiidide (SiO_2 , Al_2O_3) õige vahekorra puhul eraldub malmist hästi väävel ja paremini taandub mangaan.

Kõrgahju toodang

Kõrgahjudes toodetakse toor- ja valumalmi, samuti ferrosulameid. Suurim osa kõrgahju toodangust (kuni 90 %) moodustab **toormalm** (*pig iron*), mis läheb terase sulatamiseks. Toormalmide erinevate markide koostis kõigub piirides (%) 3,0...4,5 C, 0,25...2,0 Mn, 0,3...1,3 Si, 0,02...0,08 S ja 0,1...1,0 P.

Valumalmi (*foundry iron*) turustatakse **kangmalmina** (*pig iron*), mis sulatatakse valutehastes (valutsehvides) ümber ja millest toodetakse valandeid.

Ferrosulameid (*ferroalloys*) kasutatakse terase desoksüdeerimisel, legerimisel ja modifitseerimisel. Nad on suure (>10 %) legerivate elementide (Mn, Si jt.) sisaldusega rauasulamid. Kõrgahjudes toodetakse ainult ferromangaani ja ferrosiitsiumi. Teisi ferrosulameid toodetakse elektrialhjudes.

Räbu (*slag*) ligikaudne koostis on 40...50 % CaO , 38...40 % SiO_2 , 7...10 % Al_2O_3 . Kõrgahjuräbu kasutatakse räbubetooni, räbutelliste, räbuvati ja soojusisolatsioonimaterjalide tootmisel.

Kõrgahjugaas (*blast furnace gas*) on kõrgahjust väljuv gaasisegu, mis sisaldab kütuse (koksi, metaani) mittetäieliku põlemise produkte (CO 20...30 %, H_2 1...8 %) ning samuti CO_2 ja N_2 . Kõrgahjugaas puhastatakse tolmust ning ~25 % temast kasutatakse **kõrgahju õhuelsoojendite** ehk **kauperite** (*cowper stove*, *blast-furnace stove*) eelkuumutamiseks. Ülejäänud, segatuna koksi- või maagaasiga, läheb mitmesuguste kuumutus- ja sulatusahjude ning katelde kütmiseks.

Terase tootmine

Teras on rauasulam, mille süsinikusisaldus on alla 2,14 %. Praktiliselt kasutamist leiavad terased süsinikusisaldusega <1,5 %. Toodetakse **mittelegeerteraseid** ehk **süsinikteraseid** (*non-alloy steels, carbon steels*) ja **legeerteraseid** (*alloy steels*). Mõlemad sisaldavad lisaks süsinikule ja/või legeerivatele elementidele samuti tavalisandeid: Mn, Si, P, S.

Terase masstootmisel kasutatakse lähtematerjalidena toormalmi ja **terasmurdu** ehk **rauamurdu** (*iron scrap, steel scrap*). Et malmis on süsinikku ja lisandeid rohkem kui terastes, siis terase tootmise meetodite mõte on toormalmi süsiniku- ja lisandisisalduse vähendamine. Legeerteraste tootmisel tuleb täiendavalt lisada legeerivaid elemente.

Esimeseks terase hulgitootmise pürometallurgiliseks meetodiks oli Inglismaal kasutusele võetud **bessemermenetlus** (*Bessemer process, Kelly-Bessemer process*) aastast 1856. Meetod põhines toormalmi õhuga läbipuhumises bessemerkõnverteris, mille tulemusena õhus olev hapnik oksüdeeris süsiniku ja lisandid. Selle ja analoogse **toomasmenetluse** (*Thomas process*) puuduseks oli terase madal kvaliteet ja piiratud tooraine baas, kuna võis kasutada ainult kindla koostisega malme. 1864. a. võeti Prantsusmaal kasutusele **martäänmenetlus** (*open-hearth process, Siemens-Martin process*), mis oli vähem tootlik, kuid andis märksa kvaliteetsema terase. Meetod võimaldas kasutada mitmesuguse koostisega malme ja ka vanametalli – terasmurdu. Aastatel 1908...1970 oli martäänmenetlus terase tootmise põhimeetod. Praegu kasutatakse veel vähestes riikides.

Puhta hapniku tootmismeetodite väljatöötamine tegi võimalikuks **hapnikkonvertermenetluse** (*oxygen-converter process, basic oxygen process, L-D process*) kasutuselevõtmise 1952.–1953. a. Austrias *Linz-Donawitzi* tehastes, siit ka sageli kasutatav protsessi nimetus: L-D-protsess. Praegu on hapnikkonvertermenetlus terase hulgitootmise põhimeetod. Saadud teras on oma kvaliteedilt lähedane martäänmenetlusel saaduga.

Terase elektrometallurgia, kus kasutatakse elektrienergiat, võeti kasutusele XIX saj lõpul ja XX saj algul ning on täiuslikum kui pürometallurgilised konverter- ja martäänmeetod. Oksüdeeriva leegi puudumine ja väike õhu juurdepääs ahju tööruumi võimaldab luua neutraalse keskkonna ja tagab terase täielikuma desoksüdeerimise. Sulatusprotsess on elektriühjades (elektrikaar- ja induktsioonühjades) paremini juhitud, mistõttu seda kasutatakse kvaliteetsete mittelegeer- ja legeerteraste, samuti ferrosulamite tootmiseks.

Terase metallurgia protsessid

Terase tootmise lähtematerjalid on toormalm ja terasmurd. Terasi sulatamise (tootmise) põhimõte on lähtematerjalides oleva süsiniku ja lisandite selektiivne oksüdeerimine ja nende üleviimine rübusesse ja gaasilisse faasi. Siit tulenebki vajadus hapniku järele. Et süsinik ja lisandid erinevad füüsikalise-keemiliste omaduste poolest, siis igaühe eraldamiseks tuleb luua kindlad tingimused, kasutades füüsikalise keemia seadusi.

Metallurgiaprotsessid kulgevad terase sulatamisel üldjuhul neljas etapis.

1. Lähtematerjalide sulatamine ja süsteemi metall-räbu tekkimine

Massitoimeseaduse alusel on keemiliste reaktsioonide kiirus võrdeline nendes osalevate ainete kontsentratsiooniga. Et malmi põhimass on raud, siis järelkult tema kokkupuutel hapnikuga oksüdeerub sulatusseadmes eelkõige raud:



Tekkiv oksiid lahustub rübuses ja metallis ning reageerib viimases olevate kergoksüdeeruvate lisanditega Si, Mn, P vastavalt järgmistele reaktsioonidele:



Tekkivad oksiidid kerkivad rübusesse.

Lisandite oksüdeerimise kiirus oleneb peale kontsentratsiooni veel temperatuurist. Vastavalt *Le Chatelier*'i printsiibile toimuvad eksotermilised reaktsioonid intensiivsemalt madalamatel, endotermilised aga kõrgematel temperatuuridel. Seetõttu oksüdeeruvadki kõigepealt Si, Mn, P ja alles hiljem, temperatuuri tõustes, algab süsiniku oksüdeerumise endotermiline reaktsioon:



Pärast lähtematerjalide **sulatamist** (*melting*) kujuneb sulatusagregaadis kaks erineva tihedusega mittesegunenud kihti: metall ja räbu. Kui mingi aine lahustub kahes kokkupuutuvas, kuid mittesegunevas vedelikus, siis see jaguneb nendes *Nernsti* jaotusseaduse järgi kindla, temperatuurist oleneva suhtearvuga. Seega oksüdeerunud Fe, Mn, Si, P jagunevad metallis ja rübuses kindlas suhtes, mis on iseloomulik antud temperatuurile.

Eeltoodust järeldub, et sidudes okside rübuses, võib vähendada nende hulka metallis, s.t mittesoovitavaid lisandeid võib suunata metallist rübusesse. Räbu koostise reguleerimine on rübustiga metallurgiaprotsesside juhtimise põhimooduseid.

Esimese etapi põhiülesanne on kahjuliku lisandi P täielikum eemaldamine. Selleks kasutatakse aluselise voodriga sulatusseadmetes CaO küllaga aluselist räbustit. Sel juhul toimub reaktsioon järgmiselt:



Saadud fosfaat praktiliselt ei lahustu metallis ja suundub räbusse, mille fosforisisaldus suureneb. Jaotusseaduse järgi aeglustub fosfori eemaldamine aja kulgedes tekkiva tasakaalu tõttu. Seetõttu tuleb P täielikumaks eemaldamiseks teda sisaldavat räbu aegajalt eemaldada ja lisada uuesti CaO.

2. Teras keemine

Terase keemine (*bubble evolution*) algab seoses temperatuuri tõusuga ja süsiniku oksüdeerumise eeltoodud endotermilise reaktsiooni aktiveerumisega. CO (samuti CO₂) mullide eraldumist läbi metalli nimetataksegi „keemiseks“. Jutumärkides on see sõna siinkohal selle tõttu, et tegemist ei ole mitte füüsikalises mõttes keemisega (aurumullide eraldumine), vaid keemilises reaktsioonis tekkinud gaaside eraldumisega.

Teisel etapil eemaldatakse väävel järgmiste reaktsioonidega:



Reaktsioonid kulgevad nii räbus endas kui ka räbu ja metalli kontaktpinnas. Tekkinud CaS rauas ei lahustu ja siirdub räbusse. Järelikult, mida rohkem on räbus CaO (ja vähem FeO), seda täielikumalt väävel eemaldub.

Metallurgiaprotsesside 1. ja 2. etappi (lähtematerjalide sulatamine ja terase keemine) käsitletakse sageli kui sulatuse oksüdeerimisperioodi, s.t perioodi, mille kestel toimub lisandite ja süsiniku oksüdeerimine ning ettenähtud süsiniku- ja lisanditesisaldusega terase saamine.

3. Desoksüdeerimine

Terase desoksüdeerimine (*killing, deoxidizing*) on vajalik hapniku eemaldamiseks sulametallist. Lisandite ja süsiniku eemaldamiseks oli hapnik vajalik, terases endas on ta kahjulik lisand. Kasutatakse põhiliselt kahte desoksüdeerimismeetodit. **Sadestaval desoksüdeerimisel** (*bulk deoxidizing*) viiakse desoksüdeerijad sulametalli. **Difusioondesoksüdeerimisel** (*diffusive deoxidizing*) viiakse desoksüdeerijad sulametalliga kokkupuutuvasse räbusse. Mõlemal juhul kasutatakse **desoksüdeerijatena** (*deoxidizer, deoxidizing agent*) elemente, millel on hapnikuga suurem **ühtivus** ehk **afiinsus** (*affinity*) kui raual: Si, Mn, Al, Ti. Desoksüdeeritakse tavaliselt ferro-

mangaani, ferrosiliitsiumiga või ferroalumiiniumiga. Desoksüdeerimist ei tohi segamini ajada taandamise ehk redutseerimisega (vt p 5.1.1. Kõrgahjuprotsess). Desoksüdeerimine on sulametalli rafineerimise põhioperatsioon hapniku eemaldamiseks, seevastu taandamist ja taandajaid kasutatakse hapniku (kloori jne) eemaldamiseks metalliühenditest, sh maakidest.

Olenevalt desoksüdeerimise astmest saadakse **rahulik teras** (*killed steel*) (täielikult ahjus ja kopas desoksüdeeritud), **poolrahulik teras** (*semi-killed steel*) (vahepealne) ning **keevteras** (*rimmed steel*) (mittetäielikult desoksüdeeritud teras, milles „keemine“ jätkub veel terase tardumisel valuplokivormis).

4. Legeerimine

Terase legeerimine on ferrosulamite või puhaste metallide lisamine sulaterasele. Väheoksüdeeruvaid elemente (Ni, Co, Mo, Cu), mis sulatusel ning väljavalamisel (valukoppa, valuplokivormi) praktiliselt ei oksüdeeru, võib lisada meelevaldsel sulatusetapil. Kergelt oksüdeerivate elementidega (Si, Mn, Al, Cr, V, Ti jt) legeerimine tehakse kas ahjus või valukopas pärast lõplikku desoksüdeerimist.

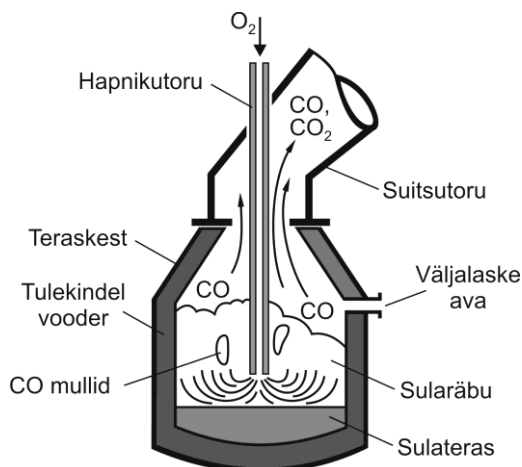
Metallurgiaprotsesside 3. ja 4. etappe (desoksüdeerimine ja legeerimine) käsitletakse sageli kui sulatuse desoksüdeerimisperioodi s.t perioodi, mille kestel toimub metalli desoksüdeerumine, jätkub väävli eemaldamine ja saavutatakse terase soovitud koostis.

Terasesulatusse põhimeetodid

Pürometallurgia **hapnikkonvertermenetlus** (*oxygen-converter process, basic oxygen process*) on praegusajal terase tootmise põhimeetod (Joonis 5.4). Tänu tehnilis-majanduslikele eelistele (suur tootlikkus) sai meetod kiire ja laia leviku, asendades martäänprotsessi.

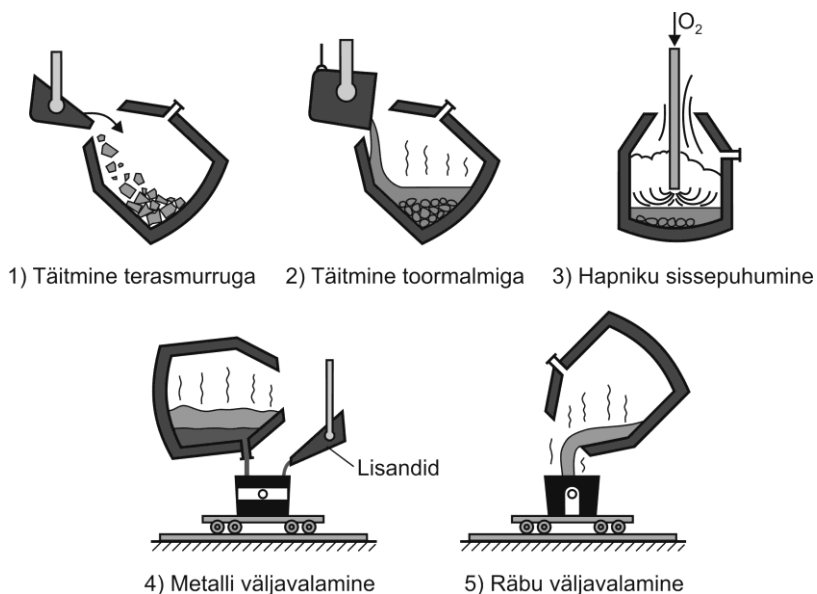
Sulatusseadme täidis koosneb 70...75 % ulatuses toormalmist ja 25...30 % teras-murrust (rauamurrust). Räbu moodustajatena lisatakse **lupja** (*lime*), mis kujutab endast **lubjakivi** (*limestone*) põletamise produkti, samuti **fluoriiti** CaF_2 (*fluorspar, fluorite*) ja rauamaaki.

Konverter koosneb terasest väliskestast ja aluselise **tulisest** ehk **tulekindlast materjalist** (*refractory*) – magnesiit- (MgO baasil materjal) või dolomiitvoodrist (MgO · CaO baasil materjal). Et aluseline vooder võimaldab kasutada rübustina lupja ja tekkivat aluselist räbu, siis on sellise voodriga konverteris võimalik peaaegu täielikult eemaldada P ja S. Konverteri mahutavus on tavaliselt 70...400 tonni, **läbipuhumise** (*blow, blowing, blasting*) kestus 25...30 min. Puhta hapniku kasutamise lisandite ja süsiniku oksüdeerimiseks tagab terase minimaalse lämmastikusisalduse (0,002...0,004 %) toodetavas terases.

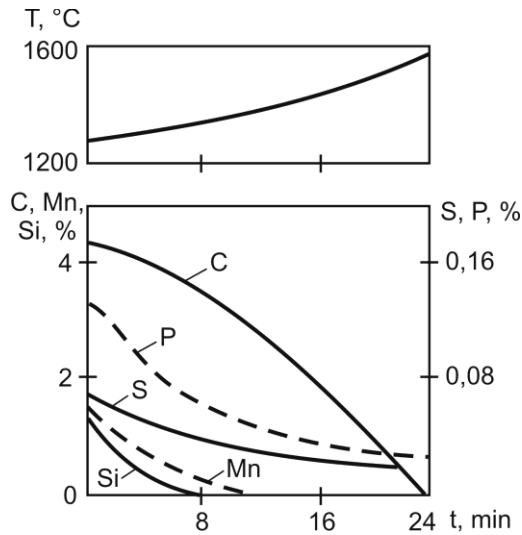


Joonis 5.4. Hapnikkonverter

Sulatustehnoloogia põhioperatsioonide järjekord ja konverteri töoasendid on Joonisel 5.5. Hapniku puhumisel konverterisse oksüdeeruvad täidises olevad lisandid ja suunduvad räbuse. Fosfori ja väävli räbuse viimiseks kasutatakse põhiliselt lupja (CaO). Teras desoksüdeeritakse hapnikkonvertermentluses ferromangaani, ferrosiitsiumi ja ferroalumiiniumiga. Sulametalli koostise ajaline muutus on Joonisel 5.6. Sobiva süsinikusisaldusega teras valmib umbes 20 minuti jooksul. Sulatusprotsessi kogupikkus (metalli väljavalamisest järgmise väljavalamiseni) on umbes 45 minutit.



Joonis 5.5. Hapnikkonvertermeetodi tehnoloogilised etapid

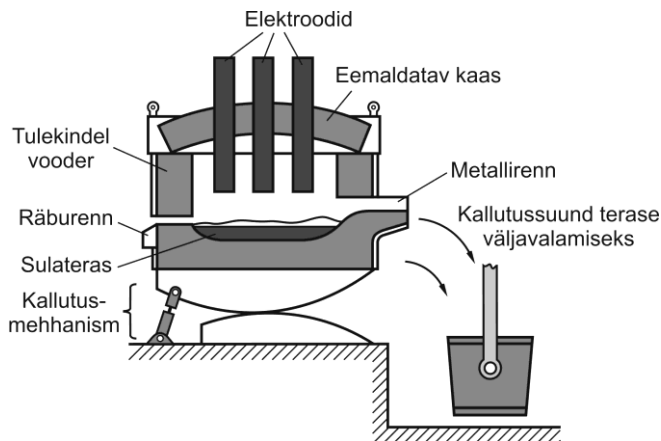


Joonis 5.6. Metalli koostise muutus ajaliselt hapnikkonvertermenetluses

Hapnikkonvertermenetlusega toodetakse rahulikku, poolrahulikku ja keevterast. Legeerteraste tootmine konverterites on üldiselt raske, mistõttu selle meetodiga toodetakse põhiliselt mittelegeer- ja madallegeerteraseid.

Elektrometallurgia

Terase **elektrometallurgia** (*electrometallurgy*) eelisteks on oksüdeeriva leegi puudumine, väike õhu juurdepääs ahju tööruumi, kõrge temperatuur ja sulatusprotsessi kerge juhitavus. Elektri ahjudes on võimalik luua neutraalne keskkond või vaakum, paremini reguleerida temperatuuri ning seega desoksüdeerimisprotsesse ja kahjulike lisandite eemaldamist. Terasse elektrometallurgias kasutatakse kahte liiki sulatusseadmeid: elektrikaar- ja induktsioonahje.



Joonis 5.7. Elektrikaarahi

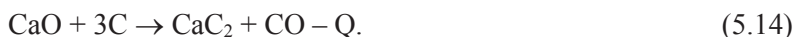
Elektrikaarahi (*arc furnace, electric arc furnace*) on ahi, kus metallide jt materjalide sulatamiseks kasutatakse elektrikaare soojust. Elektrikaar tekitatakse grafiitelektroodide (Joonis 5.7) ja metalltäite vahel, s.t ahjutäite sulatamine toimub kaare otsetoimel. Sellise ahju täpsem nimetus on **otsetoimekaarahi** (*direct-arc furnace*) erinevalt **kaudtoimekaarahjust** (*indirect-arc furnace*), kus kaar põleb elektroodide vahel. Püsiva kaarepikkuse tagamiseks saavad elektroodid automaatse liikumise allapoole. Täite laadimine toimub ülalt, pärast kaane eemaldamist. Sulatise (valmisterase) **väljavalamine** (*tapping*) toimub ahju kallutamisel. Räbu väljavalamine toimub täiteava kaudu, milleks kasutatakse kallutusmehhanismi. Ahjude mahutavus on 0,5...400 tonni. Sulatuskestus on umbes kaks tundi, protsessi kogupikkus (väljavalamisest väljavalamiseni) on umbes neli tundi.

Elektrikaarahjudes kasutatakse kahte sulatusmeetodit – oksüdeerimisperioodiga ja oksüdeerimisperioodita sulatust.

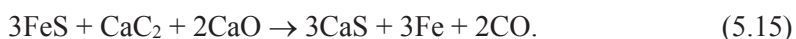
Oksüdeerimisperioodiga sulatust kasutatakse juhul, kui lähtematerjalide (põhiliselt terasmurd) kahjulike lisandite sisaldus ei rahulda. Sellisel juhtumil koosneb täide 90 % terasmurrust ja tootmisprotsessis tekkivatest metallijäätmest ning 5...10 % toormalmist. Malmi kogus valitakse selline, et sulanud metalli süsinikuisaldus ületaks 0,5...0,6 % võrra valmisterase soovitava süsinikuisalduse. Seda on vaja „keemiseks“, mis tagab metalli puhastumise hõljuvatest mittemetalsetest osakestest, lahustunud gaasidest ning koostist ja temperatuuri ühtlustava segamise.

Oksüdeerimisperioodiga sulatus jaguneb oksüdeerimis- ja desoksüdeerimisperioodiks. Oksüdeerimisperioodi põhiülesanne on P ja S eemaldamine. Selleks viiakse ahju lupja (CaO) ja ka fluoriiti CaF₂. Protsess algab täite sulamise ja süsiniku ning lisandite (Mn, Si jt) oksüdeerimisega, milleks lisatakse täitesse hapnikuallikana rauamaaki. Kasutatakse samuti hapniku sissepuhumist. Vajaduse korral, fosfori täielikumaks eemaldamiseks, valatakse fosforisisaldusega räbu aeg-ajalt välja ja tekitatakse uus räbu. Oksüdeerimisperioodi lõpus eraldub ka umbes pool vävlist. Teras sobiva süsinikuisalduse saavutamisel oksüdeerimisperiood lõpeb.

Desoksüdeerimisperioodi põhiülesanneteks on metalli desoksüdeerimine, vävli- sisalduse edasine vähendamine ja metalli soovitava koostise saavutamine. Desoksüdeerimine viiakse läbi kombineeritud sadestus- ja difusioonmeetodil. Viimasel juhul lisatakse räbusse jahvatatud koksi, lupja, ferrosiliitsiumi. Kõrgel temperatuuril lubi ja süsinik reageerivad:



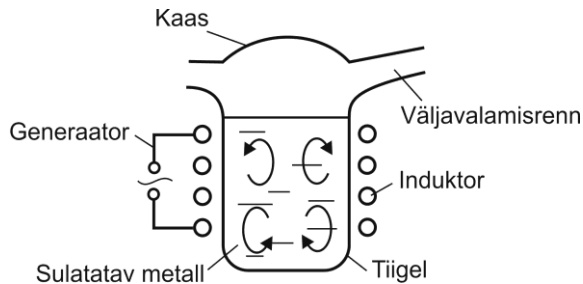
Tekkinud kaltsiumkarbiid on väga aktiivne desoksüdeerija ja tagab samuti vävli täielikuma eemaldamise reaktsiooniga:



Legeeritakse samuti kui terasesulatuse pürometallurgiliste meetodite puhul: väheoksüdeeruvad elemendid (Ni, W, Cu, Mo jt.) lisatakse metalli sulatuse käigus, kergoksüdeeruvad (Cr, V jt.) ferrosulamitena pärast desoksüdeerimise lõppu, Ti vahetult enne väljavalamist koppa.

Oksüdeerimisperiodita sulatust kasutatakse juhul, kui põhiline toormaterjal – terasmurd on koostiselt (C-, P- ja S-sisaldus) lähedane toodetavale terasele. Oksüdeerimisperiod, millega kaasneb keemine, jääb sel juhul hoopis ära.

Induktsioonahjus (*induction furnace*) toodetakse kvaliteetseid eriteraseid ja teiste metallide sulameid. Induktsioonahi (Joonis 5.8) töötab transformaatori põhimõttel, s.t elektrienergia antakse primaarahelalt sekundaarsele. Primaarmähiseks on induktor, kuhu juhitud vahelduvvool indutseerib sekundaarmähiseks olevas sulatatavas metallis pöörivoolud. Seega toimub soojuse genereerimine vahetult tiiglis olevas metallis, mis tagab agregaadid suure kasuteguriga.



Joonis 5.8. Induktsioonahi

Induktori toitmiseks kasutatakse nii kõrg- kui ka tööstussagedusega voolu olenevalt tiigli mahust ja täite takistusest. Ahjude puhul mahutavusega kuni 100 kg kasutatakse sagedusi 50...10 000 kHz, suuremates, kuni 100 tonni – tööstussagedust. Kasutatakse lahtisi või suletud induktsioonahje. Viimaste puhul saab sulatada kaitseatmosfääris või vaakumis.

Induktsioonisulatuse iseärasuseks on metalli pidev segunemine tiiglis pöörivoolude toimel, mis tagab temperatuuri ja koostise ühtlustumise. Induktsioonahjudes tehakse oksüdeerimisperiodita sulatust.

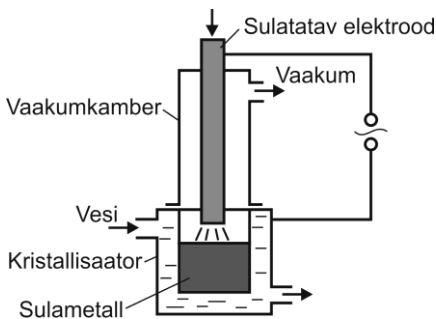
Induktsioonahjude eeliseks elektrikaarahjudega võrreldes on võimalus toota väga väikese süsinikusisaldusega teraseid (puuduvad grafiitelektroodid), elementide väike väljapõlemine (oksüdeerumine) ja terase väike lämmastikusisaldus. Puuduseks on väiksem mahutavus ja sulatustiiglite väike püsivus (10...100 sulatust).

Terase rafineerimismeetodid

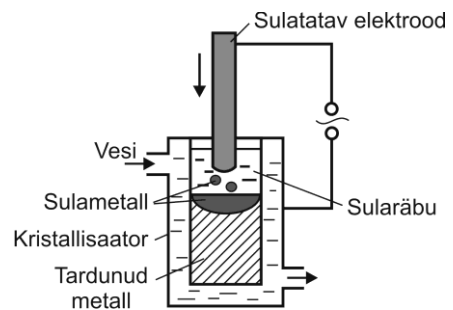
Teraste ja teiste sulamite kvaliteet oleneb olulisel määral nende puhtusest: kahjulike lisandite, lahustunud gaaside ja mittemetalsete osakeste sisaldusest. Seetõttu mõnikord ei rahulda isegi elektrihaar- ja induktsoonahjudes toodetud terase kvaliteet. Terase **rafineerimiseks** (*refining*) ja kvaliteedi parandamiseks kasutatakse ahjuvälist töötlemist kopas (vakumeerimine, töötlemine sünteetilise räbuga) või, eriti kvaliteetse terase saamiseks, erinevaid übersulatusmeetodeid (vaakumkaar-, vaakuminduktsoon-, elektronkiir-, plasmakaar- ja räbuübersulatus).

Ahjuväline **vaakumtöötlus** (*vacuum treatment, vacuum degassing*) seisneb sulaterasega täidetud kopa asetamises vaakumkambrisse, kus eralduvad metallis lahustunud gaasid ja mitmekordselt väheneb mittemetalsete sulametallis hõljuvate osakeste kogus. Kasutatakse samuti kopast väljavalatava metalli jaoks vakumeerimist. Vaakumtöötlus on odav meetod hapnikkonvertermeetodiga toodetud terase kvaliteedi tõstmiseks.

Sünteetilise räbuga töötlemine seisneb järgnevas. Sünteetiline räbu erineb oma koostiselt (50...55 % CaO, 40...45 % Al₂O₃) terasesulatusagregaadis tekkivast räbust. Sünteetiline räbu sulatatakse elektrihaarjuse ja valatakse terasvalukoppa, millesse sulatusahjust lastakse metall. Sulaterase ja räbuosakeste segunemisel toimub metalli kiire puhastamine kahjulikest lisanditest.



Joonis 5.9. Vaakumkaarübersulatus



Joonis 5.10. Räbuübersulatus

Übersulatus (*remelting*) on sulatuse eriliik, kus tavaliste meetoditega toodetud metall sulatatakse mittesoovitavate lisandite vähendamise eesmärgil ümber. Terase rafineerimisel kasutatakse **sulavelektroodiga übersulatus** (*consumable-electrode remelting*), kus metallurgiliselt puhastatav metallelektrood sulatatakse ümber elektronkiirega, elektrihaarjusega jne. Übersulatumisel vaakumis (vahel ka kaitsegaasides) toimub metalli puhastamine gaasidest ja mittemetalsetest osakestest.

Vaakumkaarübersulatusel (*vacuum-arc remelting*) sulatatakse valuplokk-elektrood elektrihaarjuse toimel. Ülesulanud metall kristalliseerub veega jahutatavas kristallisaatoris (Joonis 5.9). **Elektronkiirübersulatusel** (*electron-beam remelting*) vaakumis sulab sulatatav terasest elektrood elektronkiirte kimbus ja tilgad langevad

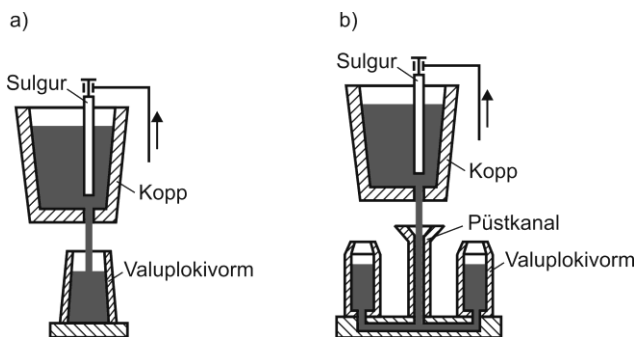
veega jahutatavasse kristallisaatorisse. **Plasmakaarübersulatuse** (*plasma-arc remelting*) puhul sulatab metalli plasmatronist väljuv plasmajuga. **Räbuübersulatatus** (*electroslag remelting*) on üks lihtsamaid ja ökonoomsemaid ning seetõttu levinuimaid kvaliteeteteraste ja -sulamite rafineerimise viise (Joonis 5.10). Valuplokkelektrood sulab soojuse toimel, mis eraldub, kui vool läbib sularäbukihi. Sulanud metalliligid, läbides räbukihi, vabanevad kahjulikest lisanditest, mitte-metalletest osakestest ja lahustunud gaasidest. Räbukihi koostisse kuuluvad fluoriit CaF_2 , lubi CaO ja **alumiiniumoksiid** (*alumina, alumiinium oxide*) Al_2O_3 .

Valuplokkide tootmine ja valuploki struktuur

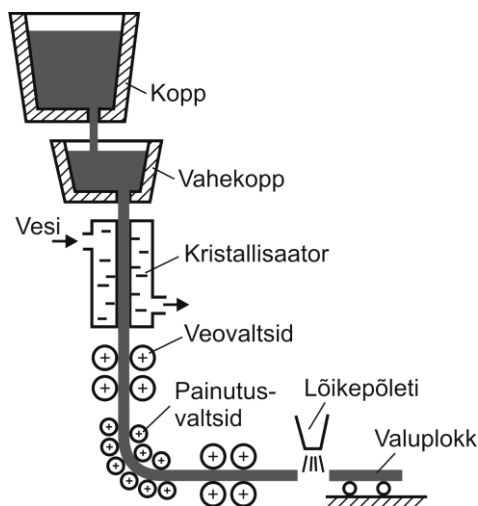
Teras tootmismeetodist olenemata valatakse valmis teras **valuplokkideks** (*ingots*), mis kuuluvad edasiseks töötlemiseks pooltoodeteks peamiselt valtsimise ja sepistamise teel. Valuplokkide saamisel läheb teras vedelast tahkesse olekusse, s.o toimub tardumine. Nii nagu sulatamisel püütakse saada kvaliteetset sulaterast, nii on vaja valuploki tardumisel saada sobiva struktuuriga, võimalikult defektivaba metalli. Sulateras juhitakse sulatusahjust valukoppa ja sealt edasi **valuplokivormi** (*ingot mold*).

Valukopad ei ole pelgalt abinõud sulametalli transportimiseks ja **valuplokivaluks** (*teeming, pouring*), vaid valukopp on samuti koht, kus toimub sulaterase täiendav töötlemine. **Kopametallurgia** (*ladle metallurgy*) all mõistetaksegi sulatusahjust väljalastud metalli (terased ja teiste metallide sulamid) täiendavat töötlemist (degaseerimine, vajaliku temperatuuri saavutamine, legerimine jms) valukopas, et parandada kvaliteeti ja tagada tardumisel soovitud struktuur.

Teras valatakse valuplokkideks põhiliselt kolme meetodit kasutades: ülaltvalu, sifoonvalu ja pidevalu. Toodetavate valuplokkide ristlõige oleneb sellest, milliste survetötlusmeetoditega (vt ptk 8. Survetötlus) neid edasi töödeldakse. Sordimetalli valtsimiseks on sobiv ruudu-, lehtmatali valtsimiseks ristküliku-, torude valtsimiseks ringi- ja sepistamiseks hulknurga või ringikujulise ristlõikega valuplokkid. Valuplokkide mass on tavaliselt 1...10 tonni piirides. Sepiseid toodetakse ka kuni 300-tonnistest valuplokkidest.



Joonis 5.11. Valuplokkide valamine: a – ülaltvalu; b – sifoonvalu



Joonis 5.12. Valuplokkide pidevvalu

Ülaltvalu (*downhill teeming, top pouring*) puhul juhitakse sulateras enamasti malmist valmistatud valuplokkivormi ülalt (Joonis 5.11a). Terasvalu puhul kasutatakse põhjas asuva avaga koppasid, mis välistavad räbu ja vähendavad mittemetalsete osakeste sattumist vormi. **Sifoonvalu** (*bottom teeming, bottom pouring*) korral (Joonis 5.11b) täidetakse üheaegselt mitu valuplokkivormi, mis tagab suurema tootlikkuse. Kuna vormi täitumine toimub sifoonvalu korral rahulikumalt, on saadavate valuplokkide pind kvaliteetsem.

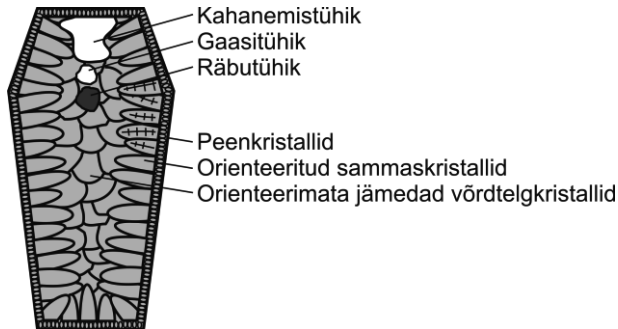
Metalli jahtumisega ja tardumisega valuplokkivormis, samuti valuvormis (vt ka p 9.2.2. Tardumine ja kahanemine) kaasneb **tardumiskahanemine** (*solidification shrinkage*), mis on tingitud sula- ja tahke metalli tiheduste erinevusest. Selle tulemusena jääb valuplokki **kahanemistühik** (*shrinkage cavity*), mis on suhteliselt suure mahuga ja paikneb valuploki viimasena tarduvas osas. Kvaliteetse valtsmetalli (sepiste) saamiseks tuleb kahanemistühikuga osa valuplokist eemaldada ja ümber sulatada. Kuna see suurendab toodetava valtsmetalli (sepiste) maksumust, siis püütakse tagada valuplokkivormi sulametalliga täielikumalt täitmist, kasutades erilist, soojustatavat ja eemaldatavat ülemist valuplokkivormi osa – valuplokkivormi kõrgendit (vt Joonis 5.11b). Kahanemistühiku maht sel juhul küll ei vähene, kuid ta jääb võimalikult valuploki ülemisse ossa.

Pidevvalu (*continuous casting, strand casting*) on tänapäevasem meetod, mis tagab suure tootlikkuse, märksa väiksema metallikao eemaldatavate jäätmete näol ja samal ajal kvaliteetsemate (kahanemistühikuteta ja räbuosakesteta) ühtlasema kristallstruktuuriga valuplokkide saamise. Pidevvalu puhul (Joonis 5.12) juhitakse sulateras kopast vahekoppa ja sealt veega jahutatavasse põhjata vasesulamist vormi, nn kristal-

lisaatorisse, mille alaosast väljub juba tardunud metall. Tardunud metall läheb valtsimisele või lõigatakse gaasipõletiga või mingil muul moel lühemateks plokkideks.

Valuploki struktuur ja terase toodang

Üldjuhul olenevad valuploki ja valandi (vt p 9.2.2) kristalliseerumisel tekkivate kristallide kuju ja suurus esmajoones soojuse äravoolu suunast ja kiirusest. Tavaliselt koosneb valuplokk kolmest peamisest tsoonist (Joonis 5.13).



Joonis 5.13. Terasvaluploki struktuur

Vormi seina läheduses on kiire jahtumise tulemusena moodustunud peeneteraline koorik, millele järgnevad seina normaali suunas orienteeritud sammakristallide tsoon ning keskme läheduses, kus soojuse äravoolu kiirus on kõikides suundades ligilähedaselt võrdne ja jahtumiskiirus väike, võrdtelgsete kristallide tsoon. Et vedelmetalli maht on suurem kui tahkel ning valuploki väliskiht tardub kõigepealt, siis jääb valuplokki kahanemistühik.

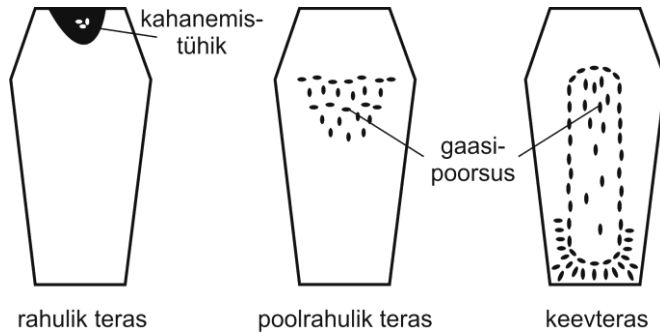
Tühikute ja pooride päritolu terasest valuplokkides ja valandites (vt p 9.2.3. Tardumis- ja kahanemisdefektid) võib olla kolmesugune:

- jahtumisel ja tardumisel tekkinud **kahanemistühik** (*shrinkage cavity*) või **kahanemispoorsus** (*shrinkage porosity*);
- valuploki vormis jätkuvast „keemisest“ tingitud **gaasipoorsus** (*gas porosity*);
- gaaside lahustuvusest tingitud gaasipoorsus või ka suuremad **gaasitühikud** (*gas cavities*).

Vedelterase jahtumisel hapniku ja teiste gaaside lahustuvus väheneb. Vedelmetallist eraldunud hapnik reageerib lahustunud süsinikuga, mille tulemusena tekib süsinikoksiid CO.

Rahulikust terasest (*killed steel*) valuplokkid tarduvad gaase eraldamata ja nad sisaldavad vaid kahanemistühikut (Joonis 5.14). Sellise terase valmistamiseks lisatakse sulatusahju ja terasvalukoppa (vajadusel ka valuploki vormi) desoksüdeerijaid sellistes kogustes, et täielikult lõppeks „keemine“ ja oleks tagatud jahtumisel metallist

eralduva hapniku reageerimine desoksüdeerijatega (Mn, Si, Al). Poore tekitava CO asemel jäävad valuplokki sel juhul ühtlaselt jaotunud tahked metallioksiidid.



Joonis 5.14. Rahulikust, poolrahulikust ja keevast terasest valuplokkide makrostruktuuride võrdlus

Poolrahulikust terasest (*semi-killed steel*) valuplokkide tardumise alguses on „keemine“ küll lõppenud, kuid sisseviidavate desoksüdeerijate (ferromangaan ja ferrosiliitsium) kogus ei väldi gaaside lahustuvuse erinevusest vedelikus ja tardunud metallis tingitud gaasipoorsuse teket. Poolrahulikust terasest valuplokkide alaosal on rahuliku terase struktuur, ülaosas tekkiv gaasipoorsus (Joonis 5.14) aitab suuresti kompenseerida tardumiskahanemist, mistõttu valuploki ülaosas märgatavat kahanemistühikut ei tekigi.

Keevterasest (*rimmed steel, unkilld steel*) valuplokkid sisaldavad nii jätkuvast „keemisest“ kui ka gaaside lahustuvuse vähenemisest tingitud gaasipoorsust. Sellisesse terasesse viiakse „keemise“ lõpetamiseks ebapiisavas koguses taandajaid (põhiliselt vaid ferromangaani). Protsessi reguleeritakse selliselt, et keevast terasest valuploki sisemises osas tekkiv gaasipoorsus kompenseerib täielikult tardumiskahanemise (kahanemine hajub kogu mahus), mistõttu kontsentreeritud kahanemistühikut ei teki (Joonis 5.14).

Enne survetöötlemist (valtsimine, sepiamine, ekstrudeerimine) tuleb rahulikust terasest valuploki ülaosa, samuti defektne pinnakiht eemaldada selleks, et valtsmetalli (sepiastesse) ei jääks defekte. Keevast ja poolrahulikust terasest valuplokkid ei sisalda kontsentreeritud kahanemistühikut, mistõttu valuplokilt enne survetöötlemist eemaldatavat materjali on vähem ja materjali kasutamistegur suurem. Nimetatud põhjusel on keevast ja poolrahulikust terasest pooltooted (valtsmetall, sepiused) odavamad, võrreldes rahulikust terasest toodetutega. Järgneval survetöötlemisel keevast ja poolrahulikust terasest valuplokkides asuvad poorid keevituvad kinni.

Rahulik teras sisaldab kõige vähem lahustunud gaase (O, N), mistõttu on ta kõige kvaliteetsem. Kõiki legerteraseid ja suure süsinikusisaldusega mittelegerteraseid

(üle 0,5 %) toodetakse ainult rahulikena. Keevteras sisaldab kõige rohkem lahustunud gaase ja metalli kvaliteet on selle tõttu kõige halvem. Keevterased on üldjuhul süsinikterased süsinikusisaldusega kuni 0,25 %. Poolrahulikud terased on samuti tavaliselt mittelegeerterased süsinikusisaldusega kuni 0,5 % ja oma kvaliteedilt on nad keev- ja rahuliku terase vahepealsed.

Terasploki struktuur (Joonis 5.13 ja 5.14) on ebaühtlane. Sama võib öelda ka keemilise koostise kohta. Keemilise koostise ebaühtluse tekkimist tardumise (kristalliseerumise) käigus nimetatakse **likvatsiooniks** ehk **segregatsiooniks** (*segregation*). Ulatuse järgi eristatakse mikro- ja makrolikvatsiooni.

Mikrolikvatsioon ehk **dendriitlikvatsioon** (*microsegregation*) esineb kristallstruktuuri ühe tera või dendriidi piires – keskel ja äärtel. Näiteks terase kristalliseerumisel on väävli- ja süsinikusisaldus dendriidi (või tera) äärtel 2 korda suurem kui keskel. Mikrolikvatsioon on kergelt kõrvaldatav valuploki kõrgtemperatuurset lõõmutust (homogenisatsiooni) kasutades.

Makrolikvatsioon ehk **tsonaallikvatsioon** (*macrosegregation*) on likvatsioon valuploki erinevate osade ulatuses. Näiteks valuploki keskel võib likvatsioonile kalduvate elementide (terastes tavaliselt S, P, C) sisaldus olla suurem või ka väiksem nende sisaldusest valuplokis keskmiselt. Makrolikvatsiooni esinemine või mitteesinemine on olnud suurel määral jahtumistingimustest.

Raua (terase) saamine maagist

Üle 80 % toodetavast toormalmist kasutatakse terase tootmiseks. Toormalmi tootmise vahepealse etapi vältimiseks ja terase omahinna alandamiseks oleks otstarbekas toota terast hoopiski skeemi järgi maak → raud → teras. Kasutamist on leidnud mitmed, vahepealse malmi tootmist vältivad meetodid.

Kõige enam on kasutamist leidnud nn rauarikaste graanulite valmistamine. Sellised maagikontsentraati ja räbustit, vahel ka koksi sisaldavad graanulid valmistatakse analoogselt graanulite valmistamisega kõrgahjudele (vt p 5.1.1. Malmi tootmine). Graanuleid särratakse taandavas keskkonnas, kus taandajateks on CO ja H₂. Taandav gaas saadakse tavaliselt loodusliku gaasi mittetäielikul põlemisel eraldi retordis reaktsioonide järgi:



Suure rauasisaldusega (88...95 %) graanulid lähevad terase sulatamiseks elektri-ahjudes, väiksema rauasisaldusega (20...80 %) graanulid kõrgahjudes malmi tootmiseks. Suure rauasisaldusega graanuleid toodetakse koksi kasutamata, mis peale majanduslike eeliste likvideerib ühe väävliallika ja tagab käsnyatset rauagraanulitest, nn **käsnyrauast** (*sponge iron*) toodetud kvaliteetse terase.

Kasutatakse ka veel teisi meetodeid k snraua tootmiseks otse maagist. Selliste protsesside üldisem nimetus on **otsetaandus** (*direct-reduction process*) või, raua tootmisel, ka **raua otsetaandus** (*direct-iron process*).

5.1.2. Terased

Läbi aegade on loodud erinevaid teraseid, pidades silmas t ostuse vajadusi ja nende loomine ja parandamine kestab t naseini. Tänapäeval valmistatavatest terastest ca 50 % ei eksisteerinud ca 10 aastat tagasi. Uued terased on järjest tugevamad, õhemad, kergemalt vormitavad ja korrosioonikindlamad. Nii on ka tänapäeva autodel metalsetest materjalidest ca 60 % terased.

Lisaks on teras taaskasutatav, kusjuures  mbert otluse käigus materjali kvaliteet ei halvene. Võrreldes alumiiniumi, klaasi või paberiga t deldakse terast kõige rohkem ümber tema magnetomaduste tõttu (kergesti sortitav).

Mitteleegerterased

Süsiniku ja tavalisandite mõju terastes

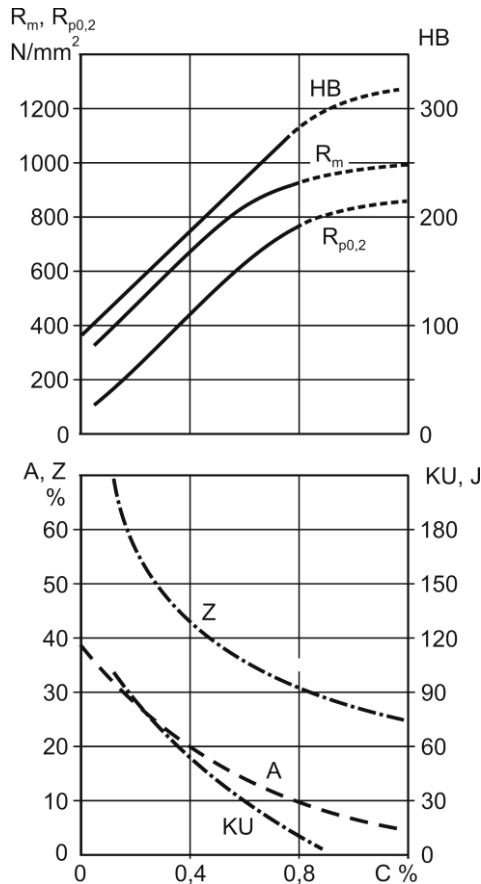
Puhta raua all mõeldakse tavaliselt tehnilist rauda, milles lisandeid, eelkõige süsinikku, on minimaalselt – alla 0,05 % (rauasüsinikusulameid C-sisaldusega üle 0,05 % nimetatakse terasteks). Tehniline raud (u 99,85 % Fe) on tuntud **armko-rauana** (*armco iron*) (nimetus tuleneb USA firma *American Rolling Mill Company* nimetuse l hendist ARMCO), millel on suur plastsus, suhteliselt hea elektrijuhtivus, suur magnetiline küllastus ja hea korrosioonikindlus.

Teras on paljukomponentne sulam, mis sisaldab süsinikku ja tavalisandeid, eelkõige Mn, Si, S, P, aga ka O, H, N jt, mis avaldavad ühel või teisel kujul mõju terase omadustele. Lisandite olemasolu terases on tingitud kas nende kõrvaldamise raskustest terase tootmisel (S, P), nende sisseviimisest terasesse desoksüdeerimise eesmärgil (Mn, Si) või nende sattumisest terasesse koos t itega maagist või sekundaarmetallist (Cr, Ni jt).

Süsinik (*carbon*). Terasse tasakaalustruktuur kooskõlas faasidiagrammiga (vt Joonis 3.20) koosneb normaaltemperatuuril ferriidist ja tsementiidist, kusjuures tsementiidi kogus terase struktuuris suureneb 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;
-  leutektoidseiks, C > 0,8 %, struktuur P + T''.

C-sisalduse suurenedes kasvab tsementiidi kogus terase struktuuris ning koos sellega terase kõvadus, tõmbetugevus ja voolepiir; vähenevad aga plastsus (katkevenivus A ja katkeahenemine Z) ning sitkusnäitajad (purustustöö KU, KV) – Joonis 5.15.



Joonis 5.15. Süsiniku mõju terase mehaanilistele omadustele

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

C-sisalduse suurenemisega kaasneb terase tiheduse (puhta raua korral $7,86 \text{ g/cm}^3$, terase C-sisaldusega 1,5 % korral $7,64 \text{ g/cm}^3$) vähenemine, suureneb eritakistus, vähenevad soojusjuhtivus ja mõningad magnetilised omadused.

Räni ja mangaan. Ränisisaldus tavalisandina ei ületa täielikult taandatud süsinik-terasest 0,6 %, mangaanisisaldus 0,8 % (Tabel 5.2). Lisandid viiakse terasesse selle desoksüdeerimise käigus; ühinedes terases oleva hapnikuga lähevad nad räbusse, lahustudes rauas parandavad nad terase omadusi.

Räni lahustununa ferriidis tõstab terase voolepiiri, mis aga halvendab terase külmdeformeeritavust (stantsimine, tõmbamine). Seetõttu kasutatakse deformeermise teel valmistatavate detailide tegemiseks väikese ränisaldusega teraseid.

Mangaan suurendab märgatavalt terase tugevust, alandamata seejuures plastsust ning samal ajal vähendab väävlisisaldusest tingitud kuumahaprusest kõrgetel temperatuuridel.

Väävel. Väävel on terases kahjulik lisand. Rauaga moodustab väävel keemilise ühendi – raudsulfiidi FeS, mis tardolekus ei lahustu rauas, kuid lahustub vedelmetallis. Keemiline ühend FeS moodustab rauaga kergsulava eutektikumi sulamistemperatuuriga 988 °C. Madalast kristallisatsioonitemperatuurist tingituna kristalliseerub FeS viimasena, paiknedes üldjuhul terapiiridel. Terase kuumutamisel kuumvormimise temperatuurini (1000...1200 °C) eutektikum sulab, muutes terase hapraks teradevaheliste sidemete nõrgenemise tõttu. Seda nähtust nimetatakse **kuumahapruseks** ehk **punahapruseks** (*hot shortness, red brittleness*).

Mangaani olemasolu terases soodustab väävliga rasksulava ühendi MnS teket (sulamistemperatuur 1670 °C), millega välditakse kuumahapruse võimalus.

Väävel vähendab terase löögisitkust, plastsust ja ka väsimustugevust. Väävlisisaldus terases on rangelt limiteeritud, olenevalt terase kvaliteedist on see kuni 0,05 %. Lõiketöödeldavuse parandamiseks võib teras sisaldada kuni 0,4 % väävlit.

Fosfor. Fosfor nagu väävelgi on kahjulik lisand terases. Fosfor, lahustudes ferriidis, moonutab selle kristallivõret, tõstab terase tõmbetugevust ja voolepiiri, kuid vähendab plastsust ja sitkust.

Fosfori eraldumine põhjustab terase haprumist toatemperatuuril, lahustudes ferriidis ja kontsentreerudes terapiiridel. Seda nähtust nimetatakse **külmahapruseks** (*cold shortness*). Fosfori nii nagu väävli sisaldus on terastes limiteeritud ja ei ületa 0,05 %.

Lämmastik, hapnik ja vesinik. Need lisandid esinevad terases mittemetalsete ühenditena, näiteks oksiididena. Mittemetalsed lisandid määravad terase metallurgilise kvaliteedi, tõstavad terase mehaaniliste omaduste, eriti plastsuse ja sitkuse anisotroopsust.

Eriti kahjulikuks lisandiks on terases lahustunud vesinik, muutes terase hapraks.

Keevitamisel soodustab vesinik terases pragude teket nii põhi- kui keevismetallis. Pinnakihi rikastamine vesinikuga (näiteks galvaanpindamisel) soodustab samuti terase haprumist; eriti ohtlik on see terase töötamisel kontaktis vesinikuga kõrgetel rõhkudel. Sellist nähtust tuntakse **vesinikahapruse** (*hydrogen embrittlement, acid brittleness*).

Mitteleegerteraste liigitus

Tabelis 5.2 on esitatud piirnormid, millest allpool on tegemist mitteleegeritud, üle selle leegeritud terasega.

Tabel 5.2. Põhiliste lisandite sisaldus mitteleegerterastes

Lisand	Sisaldus (massiprotsenti) tavalisandina kuni	Lisand	Sisaldus (massiprotsenti) tavalisandina kuni
Kroom	0,30	Räni	0,60
Nikkel	0,30	Titaan	0,05
Mangaan	1,65	Vanaadium	0,10
Molibdeen	0,08	Vask	0,40
Niobium	0,06	Volfram	0,30

Kooskõlas eurostandardiga EN 10020 **Teraste liigitus** jagunevad mitteleegerterased ehk süsinikterased järgmistesse alagruppidesse:

- mitteleegerkvaliteet**terased (*quality non-alloy steels; quality carbon steels*),
- mitteleegerväärister**ased (*high-quality non-alloy steels; high-quality carbon steels*).

Mitteleegerkvaliteetterastele pole esitatud erinõudeid termotöötuse ega mitte-metallsete lisandite osas. Nende kasutamisel on aga suuremad nõuded (näiteks haprale purunemisele vastupanu, tera suuruse, vormitavuse jm suhtes).

Mitteleegervääristerased on erinevalt kvaliteetterastest puhtamad mitte-metallsetest lisanditest ja termotöödeldavad (enamasti parendatavad või pindkarastatavad). Täpse keemilise koostise, erivalmistusviisiga ja teimingimustega on saavutatavad vastavad mehaanilised ja tarbimisomadused (suur või kitsalt piiritletud tugevus, läbikarastuvus koos nõuetega vormitavuse, keevitavuse jms suhtes). Mitteleegervääristeraste S- ja P-sisaldus on 0,020...0,025 %, purustustöö löökpaindel on vähemalt 27 J (−50 °C) – need on terased C-sisaldusega üle 0,20 %.

Tabelis 5.3 on mõningate mitteleegerteraste mehaanilised omadused.

Tabel 5.3. Süsiniku mõju normaliseeritud mitteleegerterase tõmbetugevusele ja plastsusele

Terase mark	Tõmbetugevus R_m , N/mm ²	Plastsus A , %
C22	410	25
C30	480	21
C40	550	17
C50	610	14
C60	670	11

Mitteleegerterased liigitatakse:

C-sisalduse järgi

- madalsüsinikterased (*low-carbon steels*) (C alla 0,2 %);
- kesksüsinikterased (*medium-carbon steels*) (C = 0,2...0,5 %);
- kõrgsüsinikterased (*high-carbon steels*) (C üle 0,6 %).

Kasutusotstarbe järgi on 2 põhirühki

- süsinikkonstruksiooniterased (carbon structural steels; non-alloy structural steels) (kuni 0,7 % C);
- süsiniktööriistaterased (carbon tool steels; non-alloy tool steels), (süsinikku 0,7 % ja enam).

Eraldi grupi moodustavad **hea lõiketöödeldavusega terased** (*free-cutting steels, free-machining steels*) (C = 0,12...0,4 %, S-sisaldus 0,15...0,4 %) ja **valuterased** (*cast steels*) (C = 0,15...0,55 %).

Leegerterased

Leegerivate elementide mõju terastes

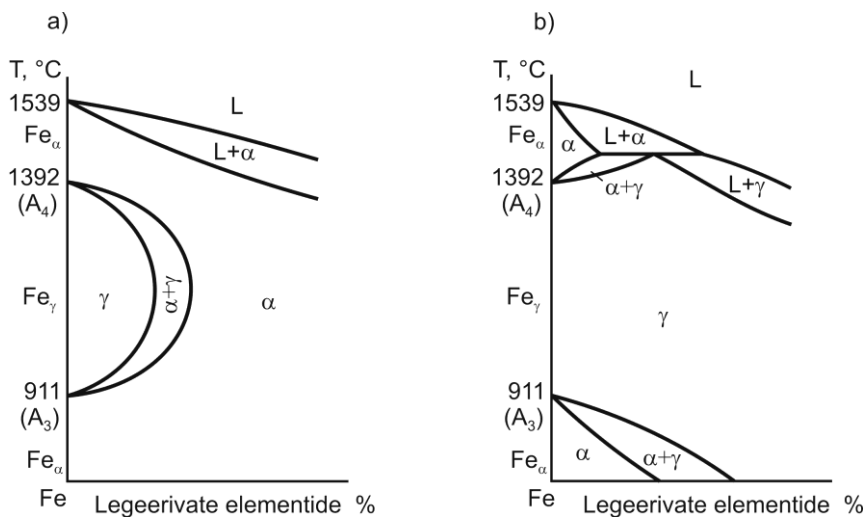
Leegerivate elementide mõju terastes on mitmene ja oleneb eelkõige sellest, millist mõju avaldavad nad rauale ning kuidas reageerivad raua ja süsinikuga (moodustavad tardlahuseid, keemilisi ühendeid või ei seda ega teist). Leegerivad elemendid avaldavad mõju terase struktuurile ja omadustele seoses sellega, et nad mõjutavad

- raua polümorfsete muutuste temperatuure A_3 ja A_4 ;
- eutektoidmuutuse temperatuuri A_1 ja eutektoidi süsinikusisaldust;
- ferriidi tugevust ja kõvadust, terase mehaanilisi omadusi, korrosiooni- ja kuumuskindlust;
- karbiidse faasi moodustumist;
- terase termotöötlust (austeniiditera kasvu, läbikarastuvust, kõvadust).

Mõju raua polümorfsete muutuste temperatuuridele

Lähtudes mõjust raua polümorfsete muutuste temperatuuridele (punktidele A_3 ja A_4), võib leegerivad elemendid jagada kahte suurde rühma:

- a) **elemendid, mis lahustuvad ferriidis kergemini kui austeniidis** (nad lähendavad polümorfse muutuse temperatuure A_3 ja A_4 teineteisele – Joonis 5.16a), s.o laiendavad temperatuurivahemikku, milles ferriit on püsiv. See ala laieneb terase leegerivate elementide sisalduse suurenemisega, kuni ferriit muutub stabiilseks kogu temperatuurivahemikus. Nii toimib eelkõige Cr, millel on α -rauaga ühesugune kristallivõre (on α -rauaga isomorfne);



Joonis 5.16. Legeerivate elementide mõju raua polümorfsete muutuste temperatuuridele: a – komponendid, mis on isomorfset α -rauaga (Cr, Si jt), b – komponendid, mis on isomorfset γ -rauaga (Mn, Ni jt)

b) **elemendid, mis lahustuvad austeniidis paremini kui ferriidis**, s.o laiendavad austeniidi püsivusala kuni toatemperatuurini (Joonis 5.16b) . Selles suunas toimib eelkõige Mn, mille kristallivõre on sama tüüpi γ -raua kristallivõrega (on isomorfne γ -rauaga).

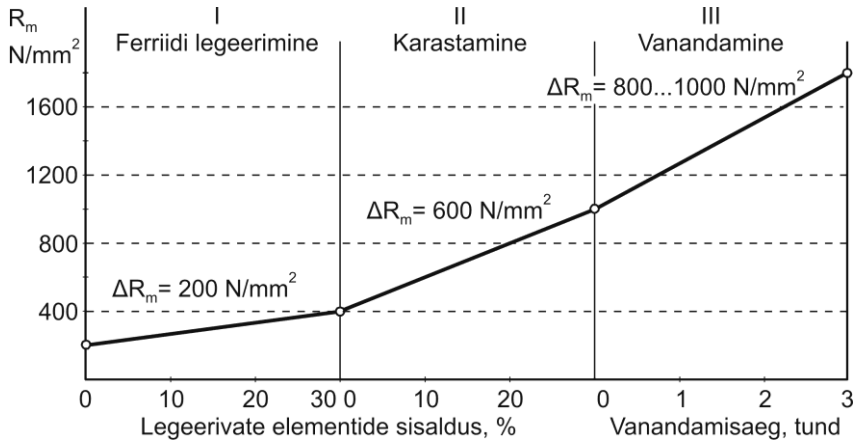
Mõju eutektoidmuutuse temperatuurile ja eutektoidi süsinikusaldusele

Nii nagu legeerivad elementid avaldavad mõju raua polümorfsete muutuste temperatuuridele (A_3 ja A_4), nii avaldavad nad mõju ka eutektoidmuutuse temperatuurile (A_1) ja eutektoidi süsinikusaldusele (punkti S koordinaatidele, Joonis 3.17). Enamik legeerivaid elemente tõstavad eutektoidmuutuse temperatuuri (v.a Mn ja Ni) ning alandavad eutektoidi süsinikusaldust. Seoses sellega avaldavad nad mõju eelkõige austeniidi lagunemisele ja erinevatel termotöötlusviisidel tekkivatele struktuuridele.

Mõju ferriidi omadustele

Legeerivate elementide mõju polümorfsete ja faasimuutuste temperatuuride kõrval rauas ja terastes on oluline nende mõju terase struktuurile ja omadustele. See mõju on eelkõige asjaolust, mis olekus on legeerivad elementid terase struktuuris ja kuidas nad mõjutavad terase struktuuri termotöötlusel. Legeerivate elementide mõju terase tugevusele avaldub eelkõige nende lahustuvuse kaudu ferriidis. Nii muutub ferriit tugevamaks legeerivate elementide sisalduse suurenemisega. Põhiliste legeerivate elementidena tõstavad nii kroom kui ka nikkel terases ferriidi ja seega ka terase tõmbetugevust (Joonis 5.17) ning voolepiiri, koos sellega kõvadust, samal ajal

vähendab kroom märgatavalt terase (ferriidi) plastsusnäitajaid (nikli mõju plastsusel kuni sisalduseni 4...6 % on väike).



Joonis 5.17. Terase tugevuse suurendamise viisid

Peen tera on terases oluline terase sitkuse seisukohalt. Tera võib peenendada normaliseerimise, kontrollitava valtsimise või mikrolegeerimise teel. Mikrolegeerivatest elementidest kasutatakse tera peenendamise eesmärgil alumiiniumi, niobiumi, titaani, vanaadiumi, lämmastikku ja boori. Mikrolegeerivad elemendid moodustavad nitriide, karbonitriide jt ühendeid, mis takistavad austeniiditera suurenemist, ümberkristalliseerimisel aga ferriiditera suurenemist.

Karbiidne faas terastes

Kõrvuti lahustuvusega ferriidis (austeniidis) moodustuvad süsiniku olemasolul terastes karbiidid, mis avaldavad mõju eelkõige terase kõvadusele. Lähtudes mõjust süsinikule, liigitatakse legerivad elemendid kahte gruppi:

- grafitiseerivad elemendid Si, Ni, Cu, Al (terastes asuvad tardlahustes);
- karbiide moodustavad legerivad elemendid.

Legeerivate elementide aktiivsuse rida karbiide moodustamise võime järgi on (paiknevad süsiniku suhtes aktiivsuse ja karbiidse faasi püsivuse suurenemise järjekorras):



Mõju terase termotötlusele

Legeerivate elementide mõju terase termotötlusele on eelkõige nende mõju austeniiditera suurenemisele kuumutamisel, martensiitmuutuse temperatuuridele ja läbikarastatavusele terase karastamisel.

Olenevalt legerivate elementide mõjust austeniiditera suurenemisele võib need liigitada kahte gruppi:

- elemendid, mis takistavad austeniiditera suurenemist – Cr, Si, W, V, Mo jt eelkõige karbiide moodustavad elemendid;
- elemendid, mis soodustavad austeniiditera suurenemist, eelkõige Mn.

Legeerivad elemendid, lähtudes nende mõjust martensiitmuutuse temperatuuridele (alg- M_a ja lõpptemperatuurile M_f), võib liigitada samuti kahte gruppi:

- elemendid, mis alandavad martensiitmuutuse temperatuure – W, Mo, Ni, Cr, Mn jt;
- elemendid, mis tõstavad martensiitmuutuse temperatuure – Al, Co jt.

Kõik legeerivad elemendid suurendavad terase läbikarastuvust, vähendades kriitilisi jahtumiskiirusi terase karastamisel. See omakorda lubab kasutada pehmemaid karastuskeskkondi ja vähendada martensiidi tekkest põhjustatud sisepingeid. Kui C-teraste läbikarastuvus piirdub umbes 10 mm, siis legeerteraste läbikarastuvus ulatub mõnekümne kuni mõnesaja millimeetrini.

Tabelis 5.4 on esitatud kokkuvõtlikult legerivate elementide mõju terastes.

Tabel 5.4. Legeerivate elementide mõju terases

Element	Sisaldus, %	Põhiline eesmärk
Alumiinium	0,95...1,3	Annab kõvu nitriite nitriiditavates terastes
Boor	0,001...0,003	Suurendab tõhusalt läbikarastuvust
Kroom	0,5...2 4...18	Suurendab läbikarastuvust Tagab korrosioonikindluse
Nikkel	2...5 12...20	Suurendab sitkust Suurendab korrosioonikindlust
Molübdeen	0,2...5	Moodustab püsikarbiide, takistab terakasvu
Räni	0,2...0,7 2 üle 2	Suurendab tugevust Tagab elastsuse vedru terastes Parandab magnetomadusi
Titaan	0,1	Väldib teradevahelist korrosiooni (seob süsinikku), vähendab martensiidi kõvadust kroomterastes.
Vanaadium	0,15	Annab püsivaid karbiide, tõstab tugevust plastuse säilimisel, soodustab peenterastruktuure
Vask	0,1...0,4	Tagab atmosfäärikorrosioonikindluse
Wolfram	6...18	Tagab kõvaduse kõrgetel temperatuuridel

Legeerteraste liigitus

Kooskõlas eurostandardiga EN 10020 **Teraste liigitus** jagunevad legeerterased:

- a) **legeerkvaliteetterasteks** (*quality alloy steels*);
- b) **legeervääristerasteks** (*high-quality alloy steels*).

Legeerqualiteetaste kasutusala on samad mis mittelegeerterastel, kuid esimesed erinevad valmistusviisi ja elementide sisalduse poolest (piinormid on esitatud Tabelis 5.2).

Legeerqualiteetaste hulka kuuluvad eelkõige keevitatavate teraskonstruksioonide, surveanumate ja -torustike terased, magnetterased, relsiterased jt.

Legeerterased liigitatakse väga mitmesuguste tunnuste järgi. Liigituse põhilisteks alusteks on kasutusala, koostis, termotöötlus ja struktuur.

Liigitus kasutusala järgi

Kasutusalaast tulenevalt liigitatakse legeerterased:

- **legeerkonstruksiooniterasteks** (*alloy structural steels*), ($C = 0,2...0,7\%$, kulumiskindlad terased $0,9...1,3\%$);
- **korrosioonikindlateks ehk roostevabadeks terasteks** (*stainless steels*);
- **legeertööriistaterasteks** (*alloy tool steels*), ($C = 0,4...1,6\%$);
- **eriterasteks** (*special steels*).

Legeerkonstruksiooniterastele esitatavad põhiohused on nende hea konstruksioonitugevus (head tugevusnäitajad, suur jäikus, suured purustustöö *KU* väärtused ja madal külmahapruslävi ja kõrge väsimustugevuse tase), hea korrosiooni- ja kulumiskindlus. Erinevalt mittelegeerkonstruksiooniterastest võib legeerkonstruksiooniteraste C-sisaldus ulatuda 1,5 %-ni.

Legeertööriistaterastele esitatavatest põhiohuetest on üks olulisemaid võime säilitada kuumenemisel kõvadus (nad peavad olema soojuskindlad), kõrvuti sellega on nõutav ka tugevus, s.o omaduste kogum kõvadus-tugevus. Siit tulenevalt on legeertööriistateraste C-sisaldus suurem kui legeerkonstruksiooniterastel, s.o 1...2 %.

Liigitus koostise järgi

Koostise järgi liigituse aluseks on legeerivad elemendid ja nende sisaldus. Eelkõige on liigituse aluseks legeerivad elemendid: kroomterased (põhiline legeeriv element Cr), mangaanterased (eelkõige Mn-ga legeeritud), nikkelterased (eelkõige Ni-ga legeeritud), kroomnikkelterased (Cr ja Ni-ga legeeritud), kroommangaanterased (Cr ja Mn-ga legeeritud), kroommangaanräniterased (Cr, Mn ja Si-ga legeeritud, tuntud ka kromansiilidena) jt.

Legeerivate elementide sisaldusest tulenevalt liigitatakse nii legeerkonstruksiooni- kui ka legeertööriistaterased madal-, kesk- ja kõrglegeerterasteks: legeerivaid elemente üksikult vastavalt kuni 2,5 %; 2,5...5 % ja üle 5 %.

Liigitus termotöötuse järgi

Lähtudes legeerteraste tüüpilistest termotöötuse moodustest, liigitatakse legeerterased kolme põhilisse gruppi: tsementiiditavad, parendatavad ning nitriiditavad ja nitrotsementiiditavad terased.

Tsementiiditavate legeerteraste hulka kuuluvad madala C-sisaldusega (kuni 0,25 %) kroom-, kroommangaan-, kroomnikkel-, kroommolübdeen- jt terased. Nende teraste tüüpiline termotöötus seisneb süsinikrikastamises (T_{karb} 900...950 °C), ühe- või kahekordses karastamises (T_{kar} 820...920 °C) ning madalnoolutamises (T_{nool} 150...210 °C) (vt p 4.3.1). Saadakse pind kõvadusega kuni 62 HRC ning südamik kõvadusega kuni 40 HRC.

Parendatavate legeerteraste hulka kuuluvad keskmise C-sisaldusega (0,3...0,5 %) madallegeerkonstruktsiooniterased: kroom-, mangaan-, kroommangaan-, kroommolübdeen-, kroomvanaadium-, kroomnikkelmolübdeen- jt terased. Parendatavate legeerteraste tüüpiline termotöötus on karastamine (T_{kar} 820...880 °C) õlis või vees ning kõrgnoolutamine (T_{nool} 540...680 °C). Sellise termotöötuse tulemusena tekib struktuur (noolutusmartensiit), millel on kõrge voolepiir ja mis on sitke ning pingete kontsentratsiooni suhtes madala tundlikkusega. Põhiline nõue parendatavatele terastele on nende suur läbikarastuvus.

Nitriiditavad ja nitrotsementiiditavad legeerterased on madala (0,1...0,2 %) või keskmise süsinikisisaldusega (0,3...0,4 %) legeerivate elementidena kroomi, alumiiniumi, molübdeeni ja vanaadiumi sisaldavad terased. Nende teraste termotöötus seisneb karastamises (T_{kar} 840...980 °C) vees või õlis järgneva kõrgnoolutamisega (570...700 °C) ning nitriitimises (T_{nitr} 490...520 °C). Kaks viimast operatsiooni võivad olla ka ühitatud. Nitriitimise tulemusena saadakse suure tõmbetugevuse ja voolepiiriga ning pinnakõvadusega (800...950 HV) terased.

Teraste tähistus

Teraste tähistamisel eurostandardiga EN 10027 **Teraste tähistussüsteem** kasutatakse kahte tähist:

- terase margitähis (*steel name*);
- terase tunnusnumbrit (*steel number*).

Teraste margitähistussüsteem põhineb teraste keemilise koostise, kasutusalaade ja mehaaniliste ning füüsikaliste omaduste iseloomustamisel. Lähtudes tähistuse eesmärgist, liigitatakse margitähised 2 põhilisse gruppi:

1. Terased, mille tähistus põhineb nende kasutusel ja mehaanilistel või füüsikalistel omadustel.
2. Terased, mille tähistus põhineb nende keemilisel koostisel.

I grupi terastest markeeritakse voolepiiri järgi konstruktsiooniteraseid (teraskonstruktsiooniterastel täht **S** margi ees, millele järgneb voolepiir R_e , N/mm², masinakonstruktsiooniterastel täht **E**, survemahutite terastel täht **P**), tõmbetugevuse järgi relsi-teraseid ja eelpingesarrusteraseid (täht **R** või **Y** vastavalt margi ees, millele järgneb tõmbetugevus R_m , N/mm²).

Teraskonstruktsiooniterastel järgneb margitähises voolepiirile purustustöö näitaja, näiteks S355J0 ($R_e = 355$ N/mm², J0 – purustustöö tähis (Tabel 5.5)).

Tabel 5.5. Purustustöö tähised terase margitähises

Temperatuur °C	Purustustöö KV, J		
	27	40	60
+20	JR	KR	LR
0	J0	K0	L0
-20	J2	K2	L2
-30	J3	K3	L3
-40	J4	K4	L4
-50	J5	K5	L5
-60	J6	K6	L6

Keemilise koostise järgi markeeritavate (II grupi) teraste põhilised margitähiste sümbolid on:

- mittelegeerterased (v.a hea lõiketöödeldavusega terased) Mn-sisaldusega < 1 %;
 - 1) tähis C,
 - 2) C-sisaldus x 100 näitav number; näiteks C35 (35 – C % x100), G-C35 (G-valuteras);
- mittelegeerterased Mn-sisaldusega ≥ 1 %, hea lõiketöödeldavusega mittelegeerterased ning madal- ja kesklegeerterased (legeeriva elemendi sisaldus < 5 %);
 - 1) C-sisaldus x 100 näitav number,
 - 2) legeerivate elementide keemilised sümbolid sisalduse alanemise või võrdse sisalduse korral tähestikulises järjestuses,
 - 3) legeerivate elementide sisaldust näitavad numbrid x kordaja (Tabel 5.6),

näiteks 28 Mn6 (28 – C % x 100, 6 – Mn % jagatud neljaga, s.o 1,5 %);

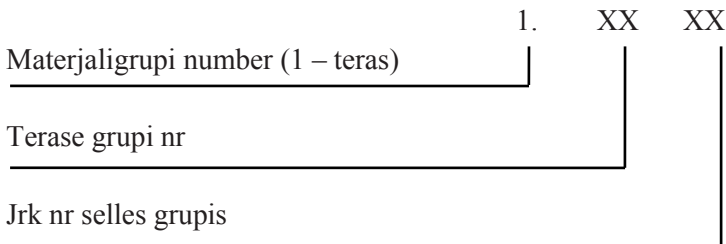
Tabel 5.6. Legeerivate elementide kordajad margitähises

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

- kõrgleegerterased (v.a kiirlõiketerased), milles vähemalt ühe legeriva elemendi sisaldus on $\geq 5\%$;
- 1) tähis X,
- 2) C-sisaldus x 100 näitav number,
- 3) legerivate elementide keemilised sümbolid sisalduse alanemise või võrdse sisalduse korral tähestikulises järjestuses,
- 4) legerivate elementide sisaldust näitavad numbrid,

näiteks X5CrNi18-10 (X – kõrgleegerituse tunnus, 5 – C% x 100, 18 % Cr, 10 % Ni);

Teraste tunnusnumbrite süsteem põhineb Saksa tunnusnumbrite süsteemil. Tunnusnumber on 5-positsiooniline



Terase gruppi iseloomustab kahekohaline numbriline tähis, millele järgneb 2-kohaline järjekorranumber selle terase grupis. Vajadusel lisatakse lisanumbrid pärast järjekorranumbrit ja nad iseloomustavad terase saamisviisi ja töötlust.

Legeerkonstruksiooniterased

Teraskonstruksiooniterased

Konstruksiooniterasteks (*structural steels*) on madallegeerterased, milleks on väikese süsinikusisaldusega (kuni 0,25 %) suhteliselt vähe (1...2 %) legerivaid elemente, peamiselt Si ja Mn sisaldavad terased.

Valtsmetalli kujul kasutatakse neid ehitus- ja masinaehituskonstruktsioonides, milliseid üldjuhul ei allutata termotötlusele, s.t teraste omadused tagatakse nende valmistamisel.

Hea keevitavus on teraskonstruksiooniteraste peamine tehnoloogiline omadus: keevisõmbluses ei tohi tekkida külm- ja kuumpragusid ja selle mehaanilised omadused peavad olema lähedased põhimetalli omadustele.

Kuna paljud teraskonstruksioonid töötavad tihti madalatel temperatuuridel ja dünaamilistel koormustel, siis üheks tähtsamaks omaduste näitajaks on külmahapruslävi. Tabelis 5.7 on mõningate teraskonstruksiooni- (S) ja masinaehituskonstruktsiooniteraste (E) mehaanilised omadused.

Tabel 5.7. Mõningate kuumvaltsitud konstruktsiooniteraste margid ja omadused

Terase mark	Mehaanilised omadused			
	$R_{p0,2},^*$ N/mm ²	$A,$ %	KV (T, °C), J	CEV**
S185	185	18	–	–
S235	235	26	(+20...–20) 27	0,35...0,40
S275	275	23	(+20...–20) 27	0,40...0,44
S355	355	22	(+20...–20) 27...40	0,45...0,49
E295	295	20	–	–
E335	335	16	–	–
E360	360	11	–	–

* Valtsmetalli paksusel kuni 16 mm, ** süsinikekvivalent.

Survemahutite terased (*steels for pressure vessels*)

Tegemist on eelkõige **külmvormitavate kõrgvoolavate terastega** (*cold forming steels with high yield strength*). Teraste hea deformeeritavuse (stantsitavuse) tagamiseks peab suhe $R_{p0,2}/R_m$ olema piires 0,5...0,65 ja katkevenivus A vähemalt 20 %. Teraste C-sisaldus on piires 0,1...0,2 % (stantsitavus on seda halvem, mida suurem on terase C-sisaldus). Räni tõstab voolepiiri, halvendades aga terase stantsitavust. Seetõttu kasutatakse C-terastest eelkõige keevteraseid, mille desoksüdeerimisel ei ole Si kasutatud. Külmdeformatsioonist tingitud kalestumisefekti suurendamiseks lisatakse mikrolegeerelemente (Al, Nb, Ti, V ja N), mis sidudes lämmastikku ja moodustades nitriide (AlN, VN) soodustavad tugevnemist. Peale selle mõjutab stantsitavust ka ferriiditera suurus.

Mõningate külmvormitavate kõrgvoolavate teraste omadused on Tabelis 5.8.

Tabel 5.8. Mõningate külmvormitavate keevitatavate normaliseeritud lehtteraste mehaanilised omadused

Terase mark	Mehaanilised omadused			KV^*, J
	$R_m,$ N/mm ²	$R_{p0,2}, N/mm^2$	$A, \%$	
P275N	370	275	23	(+20)
P355N	470	355	50	50
P460N	540	460	50	(–20) 30

* Paksusel kuni 16 mm ristisuunas.

Tsementiitidavad terased (*case-hardening steels*)

Tsementiitumiseks kasutatakse madalsüsinikteraseid (0,1...0,25 % C). Pärast süsinikrikastamist, karastamist ja madalnoolutamist on nende pinnakõvadus 58...62 HRC, südamik kõvadus aga 30...42 HRC. Tsementiitavate teraste südamik peab olema heade mehaaniliste omadustega, eriti tähtis on kõrge voolepiir, mille tagab eelkõige peenterastruktuur. Ka pinnakihis on oluline peeneteraline struktuur – jämeteraline tsementiititud kihi struktuur toob kaasa pinnakihis kontaktväsimustugevuse languse.

Tsementiititud kihi tüüpiliseks mikrostruktuuriks on eutektoidsele või üleutektoidsele karastatud terasele omane struktuur: pinnakihis martensiit või martensiit + sekundaarne tsementiit (võrguna), mis sügavuti muutub sujuvalt martensiit-ferriitseks. Tsementiititud kihi efektiivne paksus on tavaliselt 0,5...2 mm, erandjuhtudel suurte kontaktkoormuste korral aga 5...6 mm. Tulemuseks on suur pinnakõvadus ja sitke südamik.

Pikemalt on tsementiitumisest juttu õpiku p 4.3.1 (Tsementiitimine).

Parendatavad terased (*hardening and tempering steels*)

Masinaosade valmistamiseks kasutatavad terased peavad olema töökindlad, s.t nendel peavad olema head tugevusnäitajad R_m ja $R_{p0,2}$, vastuvõetav külmahapruslävi T_{50} ja löögisitkus KV .

Mitteleegerkesksüsinikkonstruksiooniteraste (0,3...0,5 % C) mehaanilised omadused ilma termotötluseta on ligikaudu järgmised: $R_m = 500 \text{ N/mm}^2$, $R_{p0,2} = 300 \text{ N/mm}^2$, $A = 20 \%$.

Termotöötlemine võimaldab oluliselt parandada mitteleegerkonstruksiooniteraste mehaaniliste omaduste kompleksi. Ühekordsel töötlemisel – normaliseerimisel – moodustub lõppstruktuur austeniidi laguproduktidest; kahekordsel töötlemisel – parendamisel (karastamine + kõrgnoolutamine) – aga noolutusmartensiidist. Viimane moodus annab võimaluse saada paremaid omadusi: näiteks kui terase tõmbetugevus on mõlemal juhul 800 N/mm^2 , on teised näitajad (A , KV) pärast parendamist võrreldes normaliseerimisega tunduvalt paremad. Legeerivad elemendid terastes mõjutavad neid omadusi. Kõik legeerivad elemendid peale alumiiniumi ja koobalti alandavad martensiitmuutuse temperatuure ning suurendavad terase läbikarastuvust (v.a koobalt) ja alandavad seega parendatud terase külmahaprusläve. Teiselt poolt aga legeerivad elemendid, lahustudes ferriidis, tugevdavad seda ja tõstavad külmahaprusläve. Sellest tulenevalt peab legeerimine olema võimalikult väike, et ta mõjutaks positiivselt ainult läbikarastuvust.

Ainus legeeriv element, mis ei tõsta külmahaprusläve, on nikkel. Samas parandab nikkel ka terase sitkust (nii ise kui koos kroomiga), mistõttu on kroom ja nikkel tähtsaimad legeerivad elemendid.

Parendatavad legeerterased on kesksüsinikterased (0,3...0,5 % C) ja neis on 3...5 % legerivaid elemente. Nende termotöötlus seisneb karastamises (üldjuhul õlis, mõnikord sulasoolas või õhus) ja kõrgnoolutamises temperatuuril 550...600 °C. Pärast sellist termotöötlust saame teraste struktuuri, mis talub hästi löökkoormusi.

Vaatamata erinevale koostisele, on parendatud legeerteraste mehaanilised omadused ligilähedased (Tabel 5.9): $R_m = 800...1200 \text{ N/mm}^2$, $R_{p0,2} = 600...800 \text{ N/mm}^2$, $KV = 30...45 \text{ J}$. Olenevalt legerimisastmest on külmahapruslävi T_{50} piires + 50...-120 °C ja läbikarastuvus (kriitiline diameeter D_{95}) 10...120 mm.

Oluliselt mõjutavad teraste omadusi kahjulikud lisandid: fosfor ja väävel ning lahustunud gaasid (O, H, N). Vääristerastes on kahjulike lisandite S- ja P-sisaldus vastavalt alla 0,015 % ja 0,025 %. Väike väävli- ja fosforisisaldus on saavutatavad ainult puhta tooraine kasutamisel ja väike gaaside lahustuvus vedela metalli vakuimeerimisel. Peeneteralist struktuuri (tera nr 10...12) saab ainult kõrgtemperatuurse termomehaanilise töötlemisega.

Tabel 5.9. Mõningate parendatud teraste mehaanilised omadused

Terase grupp ja mark		R_m , N/mm ²	R_e , N/mm ²	A, %	KV (20 °C), J
Mittelegeerterased					
	C45	650...800	375...430	16...17	–
Legeerterased					
Cr-teras	41Cr4	800...1100	560...660	12...14	30...35
Cr-V-teras	51CrV4	900...1200	700...800	10...12	30
Cr-Mo-teras	34CrMo4	800...1100	550...650	10...12	35...45
Cr-Ni-Mo-teras	34CrNiMo4	900...1200	700...800	11...12	35...45

Nitriiditavad terased (*nitriding steels*)

Nitriitimise peamine erinevus tsementiitimisest on protsessi madalam temperatuur (500...560 °C), mistõttu ei toimu struktuurimuutusi ja detail ei deformeeru. Madalamate temperatuuride kasutamine välistab tera suurenemise. Võrreldes tsementiiditud kihiga on nitriiditud kiht õhem: kõige levinumas keskkonnas – ammoniaagis nitriitimisel on kihi paksus 0,2...0,8 mm. Üldjuhul on nitriitimine viimane operatsioon pärast pinna viimistlevat mehaanilist töötlemist.

Nitriitimiseks kõige levinum teras on kroommolübdeenalumiiniumteras, mille koostises olevad legerivad elemendid moodustavad lämmastikuga nitriidid (CrN, MoN, AlN), mis annavad suure pinnakõvaduse (800...900 HV). Peale nitriitimist ei vaja teras karastamist. Terasa puuduseks võib lugeda nõuet täpselt kinni pidada nitriitimisrežiimi parameetritest seeria- ja hulgitootmisel. Väikeseeriatootmisel kasutatakse nitriitimisel vähetundlikke, kuid ka madalamate omadustega parendatavaid konstruktsiooniteraseid.

Kõrgtugevad terased (*high-strength steels*)

Nüüdisaegne tehnika vajab konstruktsioonimaterjale tugevuspiiriga 1500 N/mm² ja enam. Kesk- ja kõrgsüsiniklegerteraste korral on pärast karastamist ja madalat noolutamist see tugevusnäitaja küll saavutatav, kuid ainult plastsuse ja sitkuse arvel. Seetõttu sobivad need terased ainult tööks staatilise koormuse tingimustes. Dünaamilised koormused eeldavad ka teatud sitkust.

Noolutamisel martensiitstruktuurist eralduv karbiidne faas soodustab terase habrast purunemist. Purunemispragu läheb suurenemisel üle terapiiride eelkõige habraste karbiidiosakeste kaudu. See on nn **interkristalne** ehk **terasine purunemine** (*transcrystalline failure*). Siit tulenevalt saab sitkust tõsta enamasti kahel viisil:

- struktuuri terade peenendamise; sel eesmärgil kasutatakse tavaliselt terase kõrgtemperatuurset termomehaanilist töötlemist;
- madala süsinikusisaldusega terase kasutamise, vältides nii habraste karbiidide tekke; tugevus aga saavutatakse dislokatsioonide liikumist takistavate ultrapeente intermetalliidide osakeste moodustumisega struktuuris.

Viimati nimetatud sitkuse tõstmise viisi kasutatakse kõrgtugevate teraste termotöötlemisel; need terased on tuntud **martensiitvanandatavate terastena** (*maraging steels*). Neis tekib karastamisel süsinikuvaba martensiit ja selle vanandamisel (umbes 500 °C juures) intermetalliidne faas (tavaliselt NiTi, Ni₃Ti). Sellise terase omadused on järgmised: $R_m = 1800 \dots 2000$ N/mm², $R_{p0,2} = 1500$ N/mm², $A = 10 \dots 12$ %. Seega iseloomustavad seda terast peale suure tugevuse ka anomaalselt kõrged plastsuse ja sitkuse näitajad.

Teraste tugevdamise viisid on näidatud Joonisel 5.17.

Korrosioonikindlad terased

Konstruktsiooniterastest, mis töötavad eritingimustes (kõrgetel ja madalatel temperatuuridel, abrasiivsetes või korrodeerivates keskkondades, magnetahelates, radioaktiivse kiirguse tingimustes jne), moodustavad suure grupi eriterased ja -sulamid. Nende talitlusomadused tagatakse spetsiaalse legerimisega. Edaspidi vaadeldakse põhilisi eriteraseid – **roostevabu teraseid** (*stainless steels*).

Olenevalt keskkonnast, milles töötab materjal, eristatakse keemilist ja elektrokeemilist korrosiooni. Keemilise korrosiooni põhjustab kuivade gaaside või mitte-elektrolüütiliste vedelike mõju, elektrokeemiline korrosioon tekib vedelate elektrolüütide (soolade lahused, happed, leelised, niiske õhk) toimel metallidele. See korrosiooni liik on kõige levinum ja ohtlik (vt p 1.2.1. Metallide korrosioon).

Kroomterased. Elektrokeemilise korrosiooni takistamiseks legeritakse elementidega, mis suurendavad sulami elektrokeemilist potentsiaali (vt Joonis 1.1). Kõige tugevamalt mõjub raua elektrokeemilisele potentsiaalile legerimine kroomiga.

Roostevabu teraseid legeritakse kroomiga kolmel tasemel: 13, 17 või 27 % Cr, kusujuures kroomisisalduse suurenemisega suureneb ka terase korrosioonikindlus.

Süsinik halvendab terase korrosioonikindlust, sest moodustab kroomiga karbiide, vähendades sellega kroomi kogust, mis lahustub rauas. Süsinik on aga vajalik karastatud terase kõvaduse ja kulumiskindluse tagamiseks. 13 %-lise Cr-sisaldusega teraste C-sisaldus võib olla 0,1...0,4 %.

Vähesese süsinikusisaldusega (0,08...0,2 %) ja 13 % Cr-sisaldusega kroomiterastel on suurem löögisitkus ja neid kasutatakse väheagressiivsetes tingimustes (hüdropresside klapid, toiduainetööstuse segistid). Suurema süsinikusisaldusega Cr-terased (0,3...0,4 % C) omandavad pärast karastamist martensiitstruktuuri kõvadusega 40...50 HRC, mis lubab neid kasutada lõike- ja mõõteriistade, kirurgiainstrumentide, toiduainetööstuse seadmete, nugaude, tigude jms valmistamiseks.

Suurema Cr-sisaldusega (17 % ja enam) kroomiterased ei ole karastatavad, kuna neis puudub faasimuutus ja tegemist on feriiitterastega. Nimetatud terastest tehakse toiduaine- ja kergetööstuses kasutatavate soojusvahetite korrosioonikindlad torud.

Kroomiteraste peamine puudus on selles, et nende omadusi muudab oluliselt süsinik (eriti terastes 13 % Cr), mis teeb nad valmistamisel ja kasutamisel ebastabiilseks. Terased 17 ja 25 % Cr-ga on halvasti keevitatavad, sest keevisõmbeluse alas tera järsult suureneb, mis teeb terase hapraks.

Kroomnikkelterased. Korrosioonikindluse parandamiseks ja omaduste stabiliseerimiseks legeritakse teraseid kroomi kõrval ka nikli ja titaaniga. Tavalised selle grupi terased süsinikusisaldusega $\leq 0,12\%$ sisaldavad 18 % Cr, 10...12 % Ni ja vähesel määral Ti või Nb. Neil terastel on pärast karastamist vees temperatuurilt 1100...1150 °C austeniitstruktuur. Võrreldes kroomterastega on kroomnikkelterastel parem korrosioonikindlus. Nad on pehmed, plastsed, mittemagnetilised, hästi deformeeritavad ja keevitatavad; nende tugevus on väike ($R_m = 500...600 \text{ N/mm}^2$, $R_{p0,2} = 200...250 \text{ N/mm}^2$), mis pärast plastset deformeerimist veidi suureneb.

Nii nagu feriiitterastes, vähendab süsinik ka austeniitateraste korrosioonikindlust, moodustades kroomiga karbiidi Cr_{23}C_6 . Eriti ohtlik on see keevitamisel. Keevisõmbeluse aeglasel jahtumisel tekib selles kahefaasiline struktuur: kroomkarbiid ja madala kroomisisaldusega austeniit. See protsess toimub peamiselt terapiiridel, mis kaotavad korrosioonikindluse, tekib nn kristallidevaheline korrosioon. Selle vältimiseks legeritakse terast titaaniga, mõnikord niobiumiga või tantaaliga. Kõik need on tugevad karbiide moodustavad metallid, mis seovad terases oleva süsiniku ega luba sellel reageerida kroomiga.

Nikli defitsiitsuse ja kalliduse tõttu asendatakse ta mõnes roostevabas terases odavamaga mangaaniga või valmistatakse kahekihilised plakeeritud terased, kus pealmine õhuke kiht on kallist kroomnikkelterasest, põhiosa aga tavalisest süsinikterasest.

Tabel 5.10. Mõningate korrosioonikindlate külmvaltslehtteraste mehaanilised omadused ja kasutus

Terase grupp ja mark	R_m , N/mm ²	$R_{p0,2}$, N/mm ²	A, %	Kasutus
Ferriitterased				
X6Cr13	400...600	240	19	Toiduainetööstus- ja majapidamisseadmed
X6Cr17	450...60	260	20	Sööginõud ja -riistad, karikad
Martensiitterased				
X30Cr13	740/800 ¹	-/600	15/10	Vedrud, poldid, mutrid
X46Cr13	789/850 ¹	245/650	12/10	Noad, masinaosad
Austeniitterased				
X2CrNi18-9	520...670	220	45	Majapidamismahutid, toiduainetööstuseadmed
X6CrNiTi18-10	520...720	220	40	Keemiatööstusseadmed

¹⁾ Tardlahuslõõmutatud/ parendatud

Kulumiskindlad terased

Üldjuhul on masinaosade kulumine tingitud kas nende omavahelisest hõõrdumisest või töökeskkonna mõjust neile. Eristatakse mehaanilist, korrosioon-mehaanilist ja elektroerosioonkulumist (vt p 1.3.4. Kulumine).

Mehaanilise kulumise üks levinumaid kulumisliike on abrasiivkulumine, mida tekitab kõvade osakeste (abrasiivi) lõikav, kraapiv või paljukordne deformeeriv toime. Vastupanu abrasiivkulumisele on otseselt seotud kuluva materjali pinna kõvadusega, millest tulenevalt kasutatakse kulumiskindluse tõstmiseks selliseid pindtugevdamise meetodeid nagu legeerimist, pindkarastamist, termokeemilist töötlemist ja pindamist.

Vähem tõhus on läbilegeerimine (pinna kulumiskindluse tagamiseks sisseviidavatest legeerivatest elementidest kasutatakse ära ainult 2...3 % detaili läbimõõdu 100 mm korral), eriti efektiivne on aga kõvade pinnete pealekandmine erinevate pindamis-moodustega: leek-, plasma- ja detonatsioonpihustamise, sulatamise, pealekeevitamise, sadestamise jm viisil.

Legeerterastest kasutatakse kulumiskindlate terastena tsementiitud teraseid, suurema C-sisaldusega kroomi, mangaani, volframi jt elementidega legeeritud teraseid. Kulumiskindlate teraste hulka kuulub **Hadfieldi teras** (*Hadfields steel*), mis on ette nähtud tööks eelkõige hõõrd- ja löökkulumise ning intensiivse plastse deformatsiooni tingimustes. *Hadfieldi* teras sisaldab 1,1...1,3 % C ja 12...13 % Mn, mis karastatult on plastne ja suhteliselt pehme, samas mangaani sisaldav austeniit kalestub anomaalselt

plastsel deformatsioonil, omandades kõvaduse 50...55 HRC. Nimetatud terase patenteeris *Hadfield* 1883. a. Esiialgu leidis see kasutamist vanglatrellide valmistamiseks (sellise trelli saagimine oli võimatu just metalli kiire karestumise ja kõvaduse suurenemise tõttu). Praegu kasutatakse *Hadfieldi* terast laialt tingimustes, kus hõõrdkulumine on seotud suurte survetega: ekskavaatorikoppade hambad, roomikmasinate roomikute lülid, raudteepöörangud jms.

Legeertööriistaterased

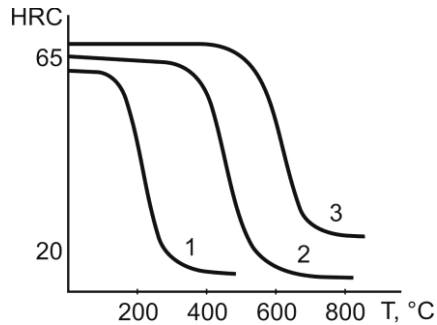
Tööriistaterased moodustavad suure teraste grupi, mida iseloomustavad suur kõvadus, tugevus ja kulumiskindlus – omadused, mis on vajalikud metallide lõike- ja survetöötleamiseks, s.o kogum kõvadus-tugevus ja võime need säilitada kuumenemisel – **soojuskindlus** (*heat resistance*). Eelkõige kõvaduse nõudest tulenevalt on tööriistateraste süsinikusisaldus tavaliselt suurem, võrreldes konstruktsiooniterastega (1...2 %).

Soojuskindlus on lõikeriistade tähtsaim omadus. XIX sajandi lõpuni oli ainsaks metalli lõikamise materjaliks kõrgsüsinikteras. XX sajandi algul leiutasid *F. Taylor* ja *A. White* lõiketerase, millele anti nimetus *rapid* (ingl k kiire) – kiirlõiketeras. Umbes 20 aastat hiljem patenteeris saksa firma *Krupp* esimese paagutatud kõvasulami kaubandusliku nimetuse *widia* (nagu teemant) all. Need kaks on peamised lõikematerjalid, millel põhineb nüüdisaegne metallitööstus.

Soojuskindluse järgi liigitatakse tööriistaterased järgmiselt: mittesoojuskindlad, poolsoojuskindlad ja soojuskindlad terased. Kasutusala järgi jaotatakse nad lõike- ja mõõteriistaterasteks, stantsiterasteks (külm- ja kuumstantsiterased) ja kiirlõiketerasteks.

Toatemperatuuril ei erine tööriistaterased väga palju tugevuse ja kõvaduse poolest. Kuumenemine lõikamisel teeb nende erinevuse väga suureks, kuna soojuskindlus ja lõikeomadused on omavahel tihedalt seotud. Joonisel 5.18 on näidatud erinevate tööriistamaterjaligruppide soojuskindlus – kõvaduse olenevus kuumenemistemperatuurist. Nii piirdub mittelegeertööriistateraste soojuskindlus 200...250 °C-ga, kiirlõiketerastel 500...700 °C-ga, kõvasulamite lõikeomadused säilivad ka temperatuuridel 800...900 °C.

Tööriistamaterjali soojuskindlus on otseselt seotud lõikeriista püsivusega. Nii võimaldab kiirlõiketeraste soojuskindluse suurendamine 600 °C-lt 650 °C-ni pikendada lõikeriistade püsivusaega 2...3 korda, aga edasine soojuskindluse suurendamine 700 °C-ni pikendab püsivusaega juba 10...15 korda.



Joonis 5.18. Peamiste tööriistateraste gruppide kõvaduse olenevus temperatuurist: 1 – mittelegeerteras, 2 – leegerteras, 3 – kiirlõiketeras

Mittesoojuskindlad tööriistaterased

Terased, millel puudub soojuskindlus, saavutavad suure kõvaduse, tugevuse ja kulumiskindluse karastamisel martensiitmuutuse tulemusena, kuid need omadused säilivad ainult madalatemperatuurisel kuumutamisel. Lõiketöötlusel kuumenemisel üle 200...300 °C toimuvad muutused martensiitstruktuuris, mistõttu vähenevad kõvadus (Joonis 5.18), kulumiskindlus ja tugevus. Siia tööriistateraste gruppi kuuluvad peamiselt suure süsinikusisaldusega mittelegeerteras ja mõned madallegeerteras. Nende kõvadus pärast karastamist vees on 59...64 HRC ja neil on väike läbikarastuvus. Selle tulemusena on nendest tehtud tööriistad pehme mittekarastunud südamikuga ja suhteliselt õhukese karastatud pinnakihiga. Seda asjaolu tuleb arvestada tööriistade konstrueerimisel; mitmekordsel teritamisel kaotavad lõikeriistad ruttu oma lõikevõime.

Mittellegeertööriistaterased. Peamised mittelegeertööriistateraste iseärasused on seotud austeniidi väikese püsivusega perliidi ja beiniidi alas. Karastatud terase struktuuris esineb kuni 10 % jääkausteniiti. Pärast karastamist vees on teraste 0,7...1,2 % C kõvadus 62...64 HRC, seejuures läbimõõdu 15...25 mm korral on suure kõvaduse ja küllaldase paksusega pinnakiht, üle 30 mm läbimõõdu korral aga on karastatud kiht liiga õhuke, mis ei võimalda neid teraseid kasutada suurte mõõdukatel koormustel töötavate tööriistade valmistamiseks.

Mittellegeerteraste eelis on pinna suur kõvadus pärast karastamist ja terase suur sitkus pärast lõõmutamist, asjaolu, mis võimaldab ulatuslikult kasutada plastset deformeermist tööriistade valmistamisel – rullimist (keermepuurid), sälkamist (saed), täkkimist (viilid). Nende peamine puudus on väike läbikarastuvus, mis tingib nende karastamist vees, kusjuures tekivad suured sisepinged ja deformatsioonid ning suureneb kalduvus karastuspragude tekkimisele.

Madallegeertööriistaterased. Teraste legerimine räni ja kroomiga suurendab läbikarastuvust ja püsivust noolutuse vastu – soojuskindlust. Mangaani lisamine suuren-

dab jääkausteniidi sisaldust pärast karastamist, mis omakorda vähendab karastusdeformatsioone. Rasksulav volfram annab terasele suurima kõvaduse, mistõttu 5 %-se volframisaldusega vene terast nimetatakse teemantteraseks.

Ka madallegeerteraste soojuskindlus jääb väikeseks, kuid nende läbikarastuvus võrreldes süsinikterastega on tunduvalt suurem. Madallegeerterastest tööriistade korral kasutatakse õlikarastust või astekarastust sulasoolas, mille tulemusena väheneb kalduvus deformeerumisele ja pragude tekkimisele. See on eriti oluline paljude keeruka kujuga lõikeriistade, nagu puuride, lõikekammide, hõõritsate jt valmistamisel.

Madallegeertööriistateraste eraldi grupi moodustavad **mõõteriistaterased** (*instrumental steels, measuring-tool steels*). Mõõteriistad peavad olema kestval kasutamisel kulumiskindlad ja muutumatute mõõtmetega, mis eeldab nende struktuuri stabiilsust, pinna head kvaliteeti jms. Kuna mõõteriistade valmistamisel kasutatakse üldjuhul karastamist, siis selle käigus on ebasoovitatav jääkausteniidi teke, mis hiljem mõõteriista kasutamisel võib vananemise tõttu esile kutsuda mõõtmete muutusi.

Mõõteriistu valmistatakse üleeutektoidsetest kroom-, kroomränni-, kroommangaan- jt terastest, mida karastatakse suure kõvaduseni (60...64 HRC). Vananemisprotsesside aeglustamiseks kasutatakse karastamist võimalikult madalalt temperatuurilt ja sellele järgnevat külмага töötlemist (-50...-80 °C) jääkausteniidi koguse vähendamiseks. Suurema kulumiskindluse tagamiseks noolutatakse mõõteriistu võimalikult madalal temperatuuril (120...140 °C), aga kaua (24...48 tundi). Tasapinnalised mõõteriistad (kaliibrid, joonlauad, šabloonid) valmistatakse tsementiiditavatest mittelegeerterastest, keeruka kujuga kaliibrid nitriiditavatest terastest. Kasutatakse ka reguleeritava läbikarastuvusega teraseid pindkarastatult, eriti stabiilsete mõõtmetega mõõteriistade valmistamisel, sest karastatud kiht nendes on suhteliselt õhuke.

Poolsoojuskindlad tööriistaterased

Selle teraste grupi moodustavad kroomiga (3 kuni 18 %) ning rasksulavaid karbiide moodustavate elementidega (volfram, molübdeen, vanaadium) legeeritud terased.

Sarnaselt mittesoojuskindlate terastega omandavad nad karastamisel martensiitmuutuse tagajärjel suure kõvaduse ja tugevuse. Kuid noolutamisel temperatuurivahemikus 300...500 °C jätkub neis terastes kõrglegeeritud martensiidi teke ja eralduvad karbiidid, millel on suurem vastupanuvõime koaguleerumisele, mistõttu need terased säilitavad kõvaduse ja tugevuse kõrgemal temperatuuril kui mittesoojuskindlad terased. Selle grupi terastest on tuntumad **stantsiterased** (*die steels*), neist valmistatakse metallide survetöötlustööriistu (stantsid, pressvormid, valtsirullid jm). Lähtudes tööriistade töötingimustest ja nende valmistamiseks kasutatavatele terastele esitatavatest nõuetest, liigitatakse stantsiterased **külmstantsiterasteks** (*cold-work die steels*) ja **kuumstantsiterasteks** (*hot-work die steels*).

Külmstantsiterased. Külmstantside valmistamisel on laia kasutuse leidnud suure kroomisisaldusega terased. Kõrge kulumiskindlus, hea soojusjuhtivus ja vähe-deformeeritavus lubab valmistada nendest terastest keeruka kujuga survetöötlus-tööriistu (rullimisplaadid, tõmbesilmad, pressvormid).

Kroomiga kõrglegeeritud tööriistaterased sisaldavad 12 % Cr ja 1,2...2,3 % C. Oma mikrostruktuuri poolest on 12 % Cr-sisaldusega terased ligilähedased kiirlõike-terastele. Karbiide moodustavate elementide, eelkõige kroomi-, molübdeeni- ja vanaadiumisisaldus suurendavad läbikarastuvust. Need terased sisaldavad palju karbiide (13...20 %), mis tagab nende soojuskindluse ja suure kulumiskindluse. Mo ja V soodustavad peeneteralise struktuuri säilimist, mis mõjub tugevusele. Need omadused võimaldavad kasutada 12 % Cr sisaldavaid teraseid suurte külmdeformeerimise stantside ja puidutööriistade valmistamiseks.

Kuumstantsiterased. Kuumstantsiterastele esitatakse võrreldes külmstantsiterastega erinõudeid:

- kuumustugevus, tagamaks stantsimaterjali vastupanu kuumutamisel, mille tulemusena stants ei kulu ja säilitab töömõõtmed, olles kontaktis kuuma metalliga;
- soojuskindlus, millest oleneb stantsimaterjali mehaaniliste omaduste (eelkõige kõvadus) püsivus temperatuuri pikaajalisel mõjul;
- termokindlus, mis tagab stantsimaterjali omaduste püsivuse termotsükli korral.

Nimetatud omaduste tagamiseks peab kuumstantsiteras sisaldama mitte üle 0,5...0,6 % C, mis tagab hea sitkuse, ja 1,4...1,8 % Ni või Mo, mis tagab hea läbikarastuvuse. Kõige paremini vastavad nendele tingimustele terased, kus nikkel on asendatud odavamaga – mangaaniga; neid teraseid kasutatakse kõige raske- mates tingimustes töötavate stantside (vasarstantsid) valmistamisel. Kergemates tingimustes töötavate stantside (press-stantsid) korral kasutatakse väiksema süsinikusisaldusega (0,3...0,4 %) niklit mittesisaldavaid teraseid; suurem sitkus neis on tagatud väiksema C-sisaldusega.

Soojuskindlad tööriistaterased

Soojuskindlate teraste kõvadus, tugevus ja kulumiskindlus saavutatakse järgmiste protsesside tulemusena:

- a) kas martensiitmuutuse tulemusena karastamisel või
- b) disperse kõvenemise tulemusena noolutamisel suhteliselt kõrgel temperatuuril (500... 650 °C), kui eralduvad tugevdavad faasid.

Enamikule terastele on sellisteks faasideks volframi, molübdeeni ja vanaadiumi jt rasksulavate metallide keerukad karbiidid – tegemist on **karbiidse noolutus-kõvadusega terastega** (*tempered carbide hardness steels*). Mõnele terasele ja

sulamile on aga nendeks intermetalliidid – tegemist on **intermetalliidse nooluskõvadusega terastega** (*tempered intermetallic hardness steels*). Nimetatud metallide karbiidid moodustuvad ja koaguleeruvad temperatuuril 500...650 °C, intermetalliidid aga veelgi kõrgemal temperatuuril (650...750 °C), mistõttu nende teraste omadused säilivad kasutamisel kõrge temperatuurini. Karbiididega tugevdatud terased sisaldavad üle 0,6 % süsinikku ja on tuntud eelkõige **kiirlõiketerastena** (*high speed steels, HSS*), mis on üks iseloomulikumaid ja enim kasutatavaid tööriistateraste gruppe.

Karbiidse nooluskõvadusega teraste süsinikusisaldus on ca 1 %, põhiliseks legerivaks elemendiks volfram. Esimesed kiirlõiketerased olid valmistatud volframi-sisaldusega 18 ja 9 %, hiljem, 1970. aastate algul asendati volframi defitsiidist tingituna W osaliselt molübdeeni ja kroomiga, kuigi täielik volframi asendamine nendes on võimatu.

Suure W-sisaldusega austeniidist saadakse kõrgsüsinikteraste karastamisel kõva martensiit (64...65 HRC). Järgnev mitmeastmeline noolutamine (sekundaarne karastamine) või külma töötlemine järgneva noolutamiseega on vajalik struktuuri jäänud jääkausteniidi koguse vähendamiseks.

Intermetalliidse nooluskõvadusega teraste põhilised legerivad elemendid on Co, W ja Mo, mis moodustavad intermetalliide Co_7W_6 (ϵ -faas) või $(Co, Fe)_7W_6$, $(Co, Fe)_7Mo_6$ (ν -faas). Selle teraserühma süsinikusisaldus on väike (0,1...0,25 %), legerivatest elementidest sisaldavad terased 20...25 % Co, 11...20 % W, ca 7 % Mo, vähesel määral ka Cr ja V.

Intermetalliidse nooluskõvadusega terastest tööriistade püsivusaeg ületab ainult volframi sisaldavast (18 % W) terasest tööriista püsivusaja. Eriti ilmnevad selle teraserühma eelised väikese ettenihkega ja jahutusvedeliketa töötlusel.

Tabel 5.11. Mõningate tööriistateraste omadused ja kasutus

Terasse grupp ja mark	Kõvadus		Kasutus
	Väljastus-olekus HB30	Karastatult/noolutatult HRC	
Mittelegeerterased			
C80U	190	N200/64 N300/54	Meislid, noad, külmekestusioonivormid
C105U	195	N200/64 N300/55	Lihtsad lõikeriistad, mulgustustornid, spiraalpuurid, viilid
Legeerkülm tööriistaterased			
102Cr6	230	N200/61 N400/50	Puurid, freesilõiketerad, treipingi pöördtsentrid
X210 Cr12	250	N200/62 N400/57	Stantsid, kammlõikurid, lõikeriistad
Legeerkuum tööriistaterased			
50CrMoV13-15	240	N400/54 N600/48	Plastvormid, pressvormid, kuumtükeldusnoad
X40CrMoV5-1	230	N400/54 N600/48	Sepistusvormid, ekstrusioonitööriistad
Kiirlõiketerased			
HS6-5-2-5	270	N560/64	Spiraalpuurid, keermelõikurid, freesilõiketerad, saelehed
HS10-4-3-10	270	N560/66	Automaatpinkide treiterad

5.1.3. Malmid

Malmide liigitus, struktuur ja omadused

Koostiselt erineb malm terasest suurema süsinikusalduse poolest (üle 2,14 % C). Malmil on madalam sulamistemperatuur ning ta struktuuris esineb süsinik peamiselt grafiidina (erandiks on valgemalm). Malmil on võrdlemisi head valuomadused (vähene kahanemine, hea vedelvoolavus), mistõttu sobib valandite valmistamiseks (70...80 % valanditest). Suurest süsinikusaldusest tulenevast grafiidist grafiitmalmides ja tsementiidist valgemalmis ei ole malmid sepistatavad.

Malmide liigitus

Malmid liigitatakse süsiniku oleku järgi kahte gruppi:

- 1) malmid, kus kogu süsinik on seotud olekus tsementiidi (Fe_3C) kujul. Need on **seotud süsinikuga malmid** ehk **valgemalmid**;
- 2) malmid, kus kogu süsinik või suurem osa sellest on vabas olekus. Need on **grafiitmalmid** ehk **vaba grafiidiga malmid**. Neist tuntumad on hallmalmid.

Valgemalm (*white cast iron*). Niisuguse nimetuse on see saanud murdepinna tuhmvalge värvuse järgi. Mikrostruktuuris on valgemalmi tunnuseks ledeburiit (eutektikum), mis koosneb tekkimisel ($\text{L} \rightarrow \text{A} + \text{T}$) austeniidist ja tsementiidist. Eutektoidtemperatuuril muutub austeniit perliidiks ($\text{A} \rightarrow \text{F} + \text{T}$) ning toatemperatuuril koosneb ledeburiit ferriidist ja tsementiidist.

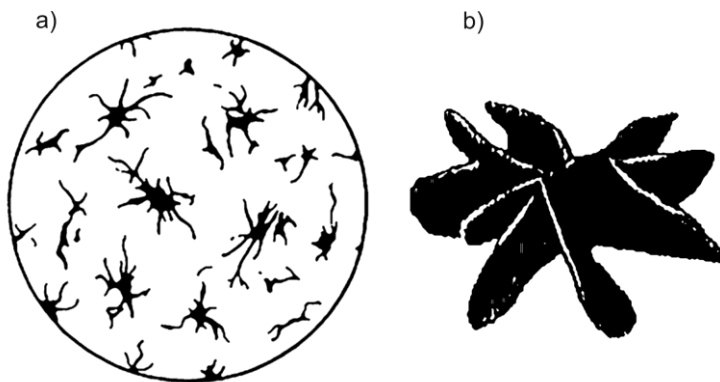
Kooskõlas Fe- Fe_3C faasidiagrammiga (Joonis 3.17) liigitatakse valgemalmid järgnevalt:

- alaeutektsed, struktuuriga $\text{P} + \text{T}'' + \text{Le}$ (Joonis 3.22a),
- eutektsed, struktuuriga Le (Joonis 3.18),
- üleutektsed, struktuuriga $\text{Le} + \text{T}$ (Joonis 3.22b).

Põhiliselt leiab valgemalmidest kasutamist alaeutektmalm ja seda enamasti temperalmi tootmisel.

Grafiitmalmid (*graphite cast irons*) jagunevad omakorda järgmiselt:

- 1) **liblegrafiitmalm** ehk **hallmalm** (*lamellar graphite cast iron, flake graphite cast iron, grey cast iron*), kus kogu süsinik või suurem osa sellest esineb vabas olekus **liblegrafiidi** (*lamellar graphite, flake graphite*) kujul (Joonis 5.19);



Joonis 5.19. Liblegrafiitmalm: mikrostruktuur (a), grafiidiosakeste kuju (b)

- 2) **keragrafiitmalm** (*spheroidal graphite cast iron, nodular graphite cast iron, ductile cast iron*), kus kogu süsinik või suurem osa sellest on vabas olekus **kera/mügargrafiidina** (*spheroidal graphite, nodular graphite*) (Joonis 5.20).

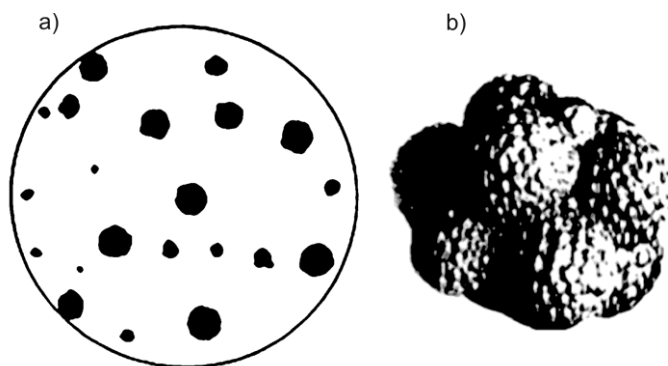
Sellise kujuga grafiidi teket soodustab eelkõige erilisandite – modifikaatorite sisseviimine sulamalmi.

Keragrafiidiga malmi saadakse modifitseerimise teel. Keragrafiidi tekitamiseks kasutatakse modifikaatorina magneesiumi (samuti ka tseeriumi ja teisi), mille sisaldus malmis peaks olema *ca* 0,05 %. Enamikul juhtudel kasutatakse modifitseerimiseks magneesiumirikkaid lisanulameid (ligatuure);

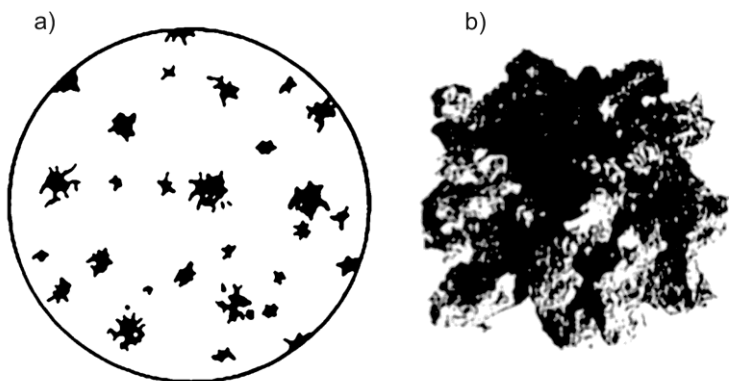
- 3) **tempermalm** (*malleable cast iron*), kus kogu süsinik või suurem osa sellest esineb vabas olekus **pesagrafiidi** ehk **lõõmutussüsiniku** (*annealing graphite, temper graphite*) kujul (Joonis 5.21). Lõõmutussüsinik tekib valgemalmis olevast tsementiidist valgemalmist valandite pikaajalise lõõmutamise tulemusena.

Tempermalmi saamisel on olulisim, et malmi tardumisel ei tekiks grafiiti. Osaliselt eraldunud liblegrafiit jääb selliseks ka lõõmutuse järel ning saadakse malm, mille omadused on lähedased hallmalmi omadustele.

Tempermalmi vajalik lähtestruktuur (valgemalm) kindlustatakse keemilise koostise ja jahtumiskiiruse õige valikuga. Keemilise koostise määramisel tuleb arvestada ka valuomadustega, kuna tempermalmist valandid on suhteliselt õhukeseseinalised ning vorm täitub sulametalliga raskelt. Kuigi tempermalmi süsinikusisalduse lubatud piirid on 2,2...2,8 %, ei saa seda vabalt valida. Õhukeseseinaliste valandite puhul sobib vedelvoolavuse parandamiseks suurem süsinikusisaldus. Kuigi lubatud ränisisaldus on piires 0,6...1,4 %, tuleb paksemaseinaliste valandite korral võtta väiksem ränisisaldus suurema süsinikusisalduse juures. Üldiselt peab malmi koostis olema lähedane piirile (vt Joonis 5.24, ala I), millest alates hakkab grafiit sulametallist eralduma.



Joonis 5.20. Keragrafiitmalm: mikrostruktuur (a), grafiidiosakeste kuju (b)



Joonis 5.21. Tempermalm: mikrostruktuur (a), grafiidiosakeste kuju (b)

Mangaanisisaldus kõigub tempermalms 0,4...0,6 % piires. Mida rohkem seda on, seda kauem kestab lõõmutamine. Mangaanisisaldus valitakse olenevalt väävlisisaldusest (on kuni 0,15 %), see peab olema 4...8 korda suurem väävlisisaldusest. Fosforisisaldus peab olema 0,1...0,2 %, et parandada vedelvoolavust; selle piiri ületamisel aga alaneb oluliselt vastupidavus löökkoormustele.

Tempermalmi hinnast moodustavad põhilise osa kulutused lõõmutamisele, kuna see on pikaajaline ja kallid operatsioon. Lõõmutamiseks asetatakse valandid metallkastidesse, mis täidetakse liivaga. Liiva halva soojusjuhtivuse tõttu võib kuumutamine lõõmutustemperatuurini kesta kuni 30 tundi. Enne seisutamist lõõmutustemperatuuril koosneb malmi struktuur austeniidist ja tsementiidist. Lõõmutuskestus sõltub sellest, kui palju on grafitisatsioonikeskmeid ja kui ruttu nad tekivad. Lõõmutusrežiim (eelkõige mahajahutus) oleneb sellest, kas tahame perliitse või ferriitse metallfaasiga tempermalmi. Lõõmutamise kiirendamiseks tuleb luua vajalikud tingimused kiiremaks grafitisatsioonikeskmete tekkeks (eelkarastus, eelnev madalatemperatuurne lõõmutus, modifitseerimine). Lõõmutuskestus sõltub olulisel määral ka temperatuurist ja on malms 0,8 % Si temperatuuril 1100 °C ca 0,5 tundi, temperatuuril 900 °C – 30 tundi.

Liiga kõrgel lõõmutustemperatuuril muutub aga tekkiva grafiidi kuju (hakkab sarnanema liblegrafiidiga) ning koos sellega halvenevad tempermalmi mehaanilised omadused. Selleks et saada ferriittempermalmi, tuleb valandeid pärast lõõmutustemperatuurilt allajahutamist hoida temperatuuril allpool faasipiiri A_1 , mil perliidis olev tsementiit laguneb, või läbida see vahemik aeglaselt jahutades. Perliitmalmi saamiseks jäetakse seisutus ära – jahutatakse vahetult lõõmutustemperatuurilt toatemperatuurini. Tempermalmidest kasutatakse põhiliselt sitkemaid ferriitmalme. Perliittempermalmi kasutatakse siis, kui nõutakse suuremat tugevust ja kulumiskindlust.

Malmi struktuur

Metalse põhimassi struktuurist lähtudes jagunevad grafiitmalmid järgmistesse liikidesse:

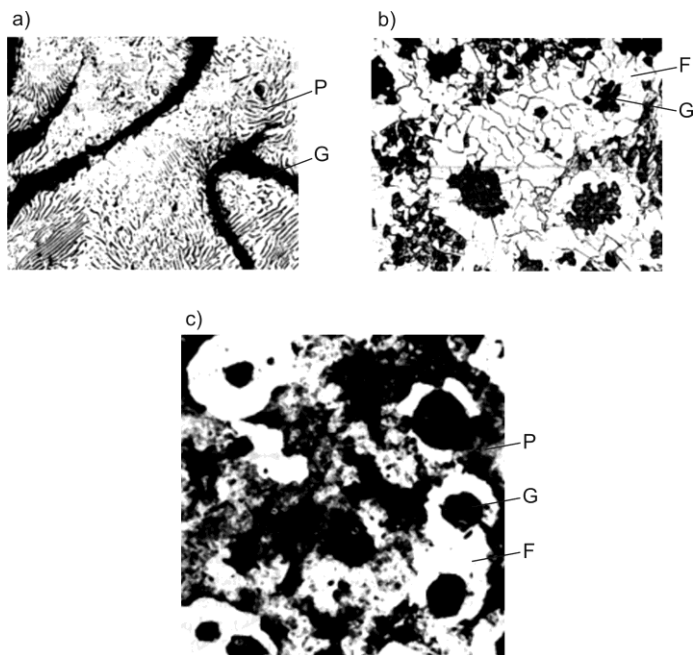
- 1) **perliitmalm** (*pearlitic cast iron*) (Joonis 5.22a – perliithallmalm), mille struktuur koosneb perliidist ja grafiidist. Kuna perliit on suure tugevusega, kuid väikese plastisusega struktuuriosa, siis samasugused on ka malmid (sellel ei ole tähtsust hallmalmi jaoks, kuna see on igal juhul väikese plastisusega ja habras);
- 2) **ferriitmalm** (*ferritic cast iron*) (Joonis 5.22b – ferriittempermalm), mille struktuur koosneb ferriidist ja grafiidist. Ferriidi tõttu on malmil väike kõvadus ja tugevus, kuid suurem plastisus;
- 3) **ferriitperliitmalm** (*ferritic-pearlitic cast iron*) (Joonis 5.22c – ferriitperliitkeragrafiitmalm), mille struktuuris on ferriit ja perliit ning grafiidiosakesed. Niisugune struktuur on väga sagedane hallmalmi puhul, kuna erinevate jahtumiskiiruste tõttu (valandid on erinevate seinapaksustega) ei ole võimalik saada 100 %-lise perliitstruktuuriga malmi;
- 4) kui ferriit- või perliitstruktuur saadakse tempermalmide korral termotöötlemisega – lõõmutamisega, siis teiste malmiliikide (hall- ja keragrafiitmalm) korral tekib see jahtumise protsessis. Üldjuhul esineb grafiitmalmides kõrvuti perliidiga struktuuris ka ferriit.

Malmide liigitamisel struktuuri järgi peab arvestama, et tänapäeval kasutatakse malmi tootmisel mõnikord sarnast modifitseerimist keragrafiitmalmiga, viies sisse modifikaatoreid väiksemas koguses ning saadakse libe- ja keragrafiitmalmi vahepealne grafiidi kuju. Need malmid on tuntud **kompaktgrafiit-** ehk **vermikulaargrafiitmalmidena** (*compacted graphite cast irons*).

Grafiitmalme liigitatakse eelkõige siiski grafiidi kuju järgi ning alles siis metalse põhimassi struktuuri järgi, näiteks perliitne hallmalm, perliitne tempermalm jm.

Seega tuleb meeles pidada, et perliit või ferriit ei määra malmi liiki, kuigi enamasti on hallmalm perliitse ja tempermalm ferriitse struktuuriga. Malmi omadused aga olenevad metalsest põhimassist ja nende järgi valitakse malmi kasutusala.

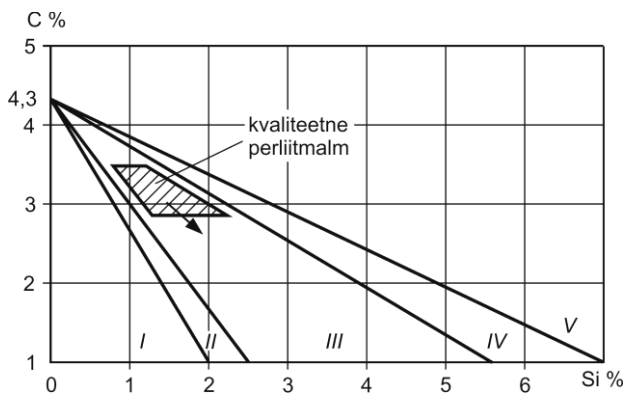
Praktika on näidanud, et ühes ja sama malmvalandis ühe ja sama keemilise koostise korral võib malmil olla mitmesuguseid struktuure. Valandi õhemates osades ja pinnakihis on malmil väiksem grafitisatsiooniate kui valandi massiivsemates osades ja keskel. Teiste sõnadega, seal, kus jahtumiskiirus on suurem, tekib rohkem tsementiiti (vastavalt ka rohkem perliiti), ja seal, kus malm jahtub aeglasemalt, tekib rohkem grafiiti ning vähem tsementiiti (vastavalt vähem perliiti ning rohkem ferriiti).



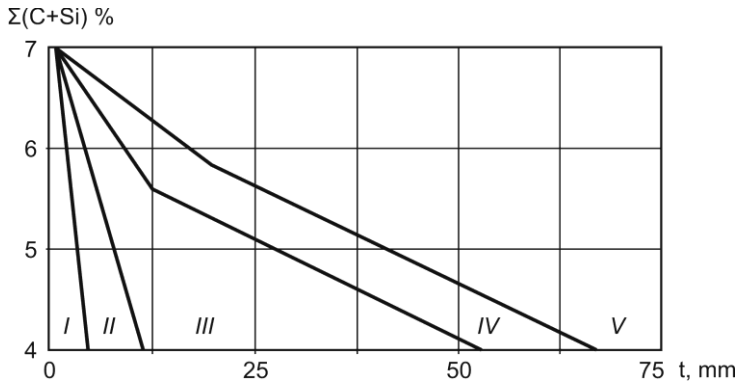
Joonis 5.22. Erineva metalse põhimassiga malmid: a – perliitmalm, b – ferriitmalm, c – ferriit-perliitmalm

Sellest järeldub, et malmidel tuleb vajaliku struktuuri saamiseks peale koostise võtta arvesse ka jahtumiskiirust. Mida suurem on valandi seinapaksus, seda aeglasem on valandi jahtumine.

Varieerides ühelt poolt C- ja Si-sisaldust (Joonis 5.23), teiselt poolt jahtumiskiirust (Joonis 5.24), võib saada malmi metalse põhimassi erineva struktuuri.



Joonis 5.23. Malmi struktuuridiagramm – C- ja Si-sisalduse mõju malmi struktuurile (*Maureri* diagramm): I – valgemalm, II – poolmalm, III – perliithallmalm, IV – ferriitperliithallmalm, V – ferriithallmalm



Joonis 5.24. Malmi struktuuridiagramm – keemilise koostise (C- ja Si-sisaldus) ja jahtumiskiiruse (valandi seinapaksuse) mõju malmi struktuurile (*Klingensteini* diagramm): alad I...V, vt Joonis 5.23

Malmi omadused

Malmi omadused olenevad selle struktuurist. Valgemalm on väga kõva ja habras, hallmalmi kõvadus on tunduvalt väiksem, kuid liblegrafiidi tõttu on see samuti habras. Tempermalmil ja keragrafiitmalmil on teatav sitkus (vastupidavus löökkoormustele) ning seetõttu kasutatakse neid selliste valandite valmistamiseks, mis töötavad märkimisväärsel dünaamilistel koormustel.

Grafiiti sisaldava malmi mehaanilised omadused olenevad selle struktuurist, peamiselt grafiidiosakeste kujust (Tabel 5.11). Malmi võib vaadelda terasena, milles esinevat grafiiti võib käsitleda kui pragusid. Sel juhul olenevad mehaanilised omadused grafiidiosakeste hulgast, kujust ja jaotusest metalse põhimassis. Mida väiksemad on grafiidiosakesed, seda paremad on mehaanilised omadused.

Tabel 5.12. Grafiitmalmide mehaanilised omadused

Malmi liik	Tõmbetugevus $R_m, N/mm^2$	Kõvadus HB	Katkevenivus $A, \%$
Hallmalm (liblegrafiitmalm)	100...350	190...275	~ 0
Keragrafiitmalm	350...900	140...360	22...2
Tempermalm (pesagrafiitmalm)	300...800	100...320	12...1,5

Tugevusnäitajate suurenemisega ei kaasne kõvaduse olulist suurenemist (oleneb metalsest põhimassist), küll võib isegi suurendada malmi sitkust. See näitab veel kord, et malmi mehaanilisi omadusi saab muuta peamiselt grafiidiosakeste kuju, suuruse ning hulga muutmisega, kõvadust aga läbi metalse põhimassi (Tabel 5.11).

Tabel 5.13. Malmi kõvaduse olenevus termotöötlustest ja sellest tingitud metalse põhimassi struktuurist

Termotöötlus	Struktuur	Kõvadus, HB
Lõõmutamine	Ferriit	100...160
Normaliseerimine	Perliit	160...220
Normaliseerimine + noolutamine	Teraline perliit	220...300
Isotermkarastamine	Beiniit	300...380
Karastamine	Martensiit	380...600
Karastamine, kõrglegeeritud malm	Austeniit	140...220
Pindkarastamine	Perliitmartensiit	380...550

Liblegrafiidiga malme tõmbetugevusega üle 200 N/mm² saadakse modifitseerimise teel ning neid nimetatakse ka **modifitseeritud hallmalmideks** (*modified grey cast irons*). Need malmid on peeneteralise perliitse metalse põhimassiga ja peente ning hajutatud grafiidiosakestega. Modifitseerimiseks kasutatakse valdavalt modifitseerivaid sulameid ferrosiliitsiumi (sisaldab ca 75 % Si) või siis silikokaaltsiumi.

Liblegrafiit annab malmile terve rea väärtuslikke omadusi, eelkõige hea konstruktsioonitugevuse (vähetundlikkus pingekontsentratsioonile, suur vastupanu väsimusele). Tundlikkus pingekontsentratsioonide suhtes suureneb malmi mehaaniliste omaduste tõusuga. Nii on näiteks tempermalm ja keragrafiitmalm tunduvalt tundlikumad pingekontsentratsioonide suhtes kui hallmalm. Seetõttu ei ole alati õigustatud keragrafiitmalmi ja terase kasutamine. Ka väsimustugevuse võrdlus võlli puhul näitab seda.

Suhteliselt nõrkade löökkormuste puhul võib malm paljudel juhtudel olla parem kui teras, kuid eelis kaob suurematel koormustel.

Lisandite mõju malmi struktuurile

Tavalisandid malmis

Malm ei ole mitte kahekomponentne rauasüsinikusulam, vaid sisaldab tavalisandeina samu elemente mis teraski, s.o räni, mangaani, väävlit ja fosforit, kuid suuremates kogustes kui teras. Need lisandid mõjutavad oluliselt grafiidi ja metalse põhimassi teket ja järelikult ka malmi struktuuri ning omadusi.

Räni. Räni mõju malmis on suurem kui ühegi teise tavalisandi mõju. Väikese Si-sisalduse puhul moodustub räni tardlahus rauas ning tema mõju grafitisatsioonile sama hästi kui puudub. Räni mõju grafitisatsiooniprotsessile hakkab järsult avalduma alates Si-sisaldusest 1...1,5 % ja on suurim 3...3,5 % Si-sisalduse juures. Siit tulenevalt on Si-sisaldus hallmalmis tavaliselt 1,2...3,5 % (väiksem suurtes, suurem väikestes valandites). Räni koos süsinikuga määrab tekkiva malmi struktuuri – nii vaba grafiidi olemasolu kui ka metalse põhimassi struktuuri (Joonis 5.24).

Suurema Si-sisalduse puhul austeniit küllastub ning moodustub ebapüsiv ränikarbiid, üle 10 % Si-sisalduse puhul moodustuvad rauaga intermetalliidsed ühendid ning selle tulemusena saadakse valgemalmi struktuur.

Mangaan. Mangaan tavalisandina viiakse malmi väävli sidumiseks (moodustub MnS) ja selle kahjuliku mõju vähendamiseks. Siit tulenevalt peab Mn-sisaldus malmis ületama teatud protsendi ($Mn \% = 1,7 \times S \% + 0,35$), et siduda väävlit ja kõrvaldada väävli takistavat toimet vaba grafiidi tekkele. Teiselt poolt mangaan, moodustades tsementiidile sarnase karbiidi Mn_3C , soodustab valgemalmi teket, s.o vähenevad eeldused vaba grafiidi tekkeks. Siit tulenevalt peaks olema Mn-sisaldus grafiitmalmides ca 0,5 %, valgemalmis 0,5...1,0 %.

Väävel ja fosfor. Väävli ja fosfori mõju omadustele on vaadeldud teraste puhul (p 5.1.2.) ning see kehtib ka malmide korral. Tavaliselt on aga S- ja P-sisaldus malmides suurem kui terastes.

Väävli mõjul halveneb malmi valatavus ning seetõttu on väikevalandite korral väävlisisalduse ülemmääraks 0,08 %, suuremate valandite korral lubatakse kuni 0,1...0,12 % väävlit.

Fosfor on malmides erinevalt terastest vedelvoolavust parandav lisand ning seetõttu lubatakse malmides teda ka rohkem kui terastes (0,1...0,2 %).

Legeerivad elemendid malmides

Mõnevõrra kasutatakse ka malmi legeerimist, kuigi tunduvalt vähemas ulatuses kui terastel (vt p 5.1.4).

Legeerivateks elementideks malmides on samad elemendid mis terasteski, nagu mangaan, räni, kroom, nikkel, molübdeen, vask jt. Lähtudes legeerivate lisandite mõjust grafiidi tekkele, liigitatakse need kahte gruppi:

- grafiidi teket soodustavad ehk grafitiseerivad lisandid (Si, Ni, Al, Cu, Ti),
- grafiidi teket takistavad lisandid (Mn, Cr, S, O₂)

Mangaan. Mangaan suurendab malmi tugevust ja kõvadust, mistõttu on ta põhiline legeeriv lisand kulumiskindlates libe- ja keragrafiidiga malmides; kõrglegeeritud mangaanmalmides 5...10 % Mn.

Räni. Räni legeeriva elemendina viiakse malmi selle korrosioonikindluse tõstmiseks (tavaliselt 6...8 %, happekindlates malmides 14...15 %), kuid samal ajal muutub malm hapramaks. Räni on kroomi kõrval põhiline legeeriv lisand kuumuskindlates ja kuumustugevates malmides.

Kroom. Kroom legeeriva elemendina malmis takistab grafitiseerumist ning muudab malmi struktuuri peeneteralisemaks. Selle tulemusena tõstab kroom malmi tugevust ja kõvadust. Kroom malmi struktuuris stabiliseerib karbiide ja takistab nende lagunemist

kõrgel temperatuuril. Cr-sisaldus kuumustugevates legeermalmides võib ulatuda 15...35 %.

Nikkel. Nikkel soodustab malmis nagu teraseski ühelt poolt austeniitstruktuuri säilimist toatemperatuuril (alates 5 % Ni), teiselt poolt grafitiseerumist – saadakse austeniitmaatriksiga grafiidiosakestega struktuur. Faasimuutuse mitteesinemisest tulevalt saadakse temperatuurist vähesõltuva joonpaisumisega malm. Üheks selliseks malmiks on nn **niresist** (*ni-resist*), mis sisaldab 2...4 % C, 14...30 % Ni, 4...7 % Cu, 0,5...3,5 % Cr ja 1 % Mo. Korrosioonikindluse tagamiseks lisatakse 15...25 % Ni, mis garanteerib tugeva vastupanu korrosioonile paljudes hapetes ja kõrgendatud temperatuuridel. Hea kulumiskindluse tagab malm koostisega 2,6...3,0 % C, 4...5 % Ni, 2...5 % Cr ja kuni 2 % Si. Sellisel malmil on ledeburiitmaatriksiga martensiitstruktuur kõvadusega kuni 600 *HV*.

Malmide tähistus

Malmide tähistus põhineb eurostandardil EN 1560 **Malmi margitähistussüsteem**.

Euroopa margitähistusest tulenevalt järgneb margitähises tähisele EN malmi tähis **GJ**, millele järgneb grafiidi struktuuri tähis (vt Tabel 5.14).

Tabel 5.14. Malmi margitähis tulenevalt grafiidiosakeste kujust

Tähis	Grafiidiosakeste kuju
GJL	Liblegrafiit (lamellgrafiit)
GJS	Keragrafiit (sferoidaalgrafiit)
GJM	Pesagrafiit (lõõmutussüsinik)(GJMW–valge, GJMB–must tempermalm)
GJV	Vermikulaargrafiit
GJN	Vabagrafiit puudub (C on seotud ledeburiidis olevas tsementiidis)

Sümbolile järgnevad numbrid, mis näitavad minimaalset tõmbetugevust R_m , N/mm² või Brinelli kõvadust HB (hallmalmid, näiteks GJL-200 või GJL-HB195), tõmbetugevust R_m , N/mm² ja katkevenivust A % või Brinelli kõvadust HB (keragrafiitmalmid, näiteks GJS-600-3 või GJS-HB230) või tõmbetugevust R_m , N/mm² ja katkevenivust A % (tempermalmid, näiteks GJMB-600-3) (Tabel 5.15).

Malmide tunnusnumbrite süsteemist tulenevalt järgneb tunnusnumbri tähisele EN malmi liigi tähis:

JL – hallmalm

JS – keragrafiitmalm

JM – tempermalm

ning sellele 4-kohaline numbretähis (markeerimisel tugevuse või kõvaduse järgi) (Tabel 5.15).

Tabel 5.15. Malmide margitähistus ja tunnusnumbrid

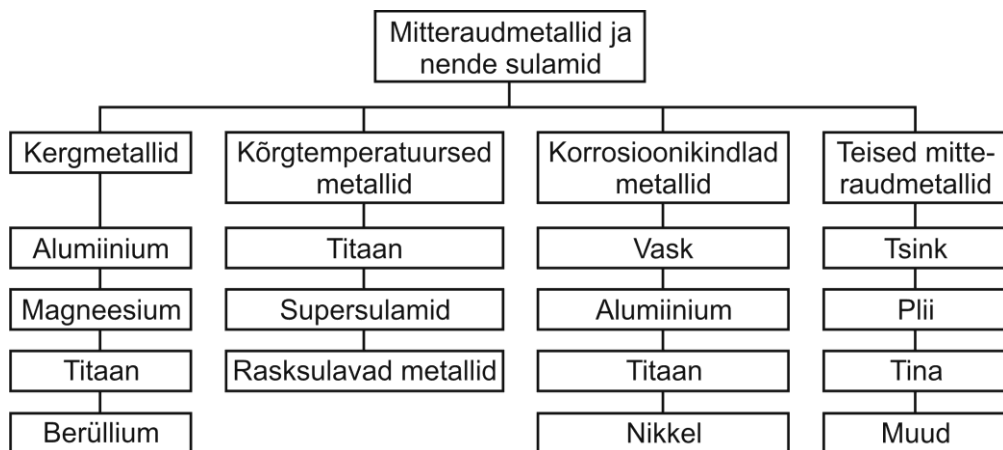
Margitähis R_m ja A järgi	Tunnusnumber	Margitähis HB järgi	Tunnusnumber
Hallmalm			
EN-GJL-100 -350	EN-JL1010 -JL1060	EN-GJL-HB155 -HB255	EN-JL2010 -JL2060
Keragrafiitmalm			
EN-GJS-350-22-LT -350-22-RT -900-2	EN-JS1015 -JS1014 -JS1090	EN-GJS-HB130 -HB330	EN-JS2010 -JS2090
Tempermalm			
EN-GJMW-350-4 -550-4	EN-JM1010 -JM1050	-	-
EN-GJMB-300-6 -800-1	EN-JM1110 -JM1200	-	-

5.2. MITTERAUDMETALLID JA MITTERAUASULAMID

Mitteraudmetallide ja mitterauasulamite roll nüüdisaja tootearenduses on kasvavalt tähtis tänu nende arvukusele ja laias vahemikus varieeruvatele omadustele. Kuigi nad on kallimad rauasulameist (terastest ja malmidest), on neil mitmed eelised, omadused või omaduste kombinatsioonid, mida pole võimalik saavutada rauasulamite korral. Nendeks on:

- 1) hea korrosioonikindlus,
- 2) lihtne töödeldavus,
- 3) head elektrilised ja soojuslikud omadused,
- 4) kergekaalulisus,
- 5) värvus.

Peaaegu kõigil mitterauasulamitel on vähemalt kaks eespool loetletud eelist. Mitterauasulamite mõningad atraktiivsed omadused on rühmitatult esitatud Joonisel 5.25.



Joonis 5.25. Peamiste mitteraudmetallide ja mitteraudsulamide liigitus põhiliste omaduste järgi

Üldiselt jääb mitteraudsulamide tugevus alla teraste tugevusele, nende elastsusmoodul on tavaliselt väiksem, mis tingib ka nende allajäämise terastele, kui jäikus on vajalik. Samas teeb nende kergem töödeldavus nad külgetõmbavamaiks. Tänu madalamale sulamistemperatuurile on nad hästi valatavad nii liivsavi- kui ka püsi- ja survevaluvormidesse. Madal sulamistemperatuur ja hea plastsus ning väike voolepiir teeb nad sobivamaiks külmdedeformeeritavaiks materjalideks. Ka hea lõiketöödeldavus iseloomustab enamikku mitteraudsulameid. Parem töödeldavus kompenseerib sageli mitteraudmetallide kõrgema hinna ning teeb nad sobivamaiks kasutada teraste asemel. Võib-olla keevitatavuse poolest jäävad mitteraudsulamid mõnevõrra alla terastele, aga ka see puudus on kõrvaldatav uueaegseid liitetechnoloogiasid kasutades.

5.2.1. Mitteraudmetallurgia

Metallurgiaprotsessid

Umbes 20 % kõikidest tehnikas kasutatavatest metallisulameist on **mitteraudsulamid** (*non-ferrous alloys*) ja 80 % **rauasulamid** (*ferrous alloys*). Mitteraudsulamide eelised rauasulamide ees on enamikul juhtudel suurem korrosioonikindlus ja head tehnoloogilised omadused: surve- ja lõiketöödeldavus. Samas konstruktsioonimaterjalina jäävad nad normaaltingimustes rauasulamidele (terastele) alla tugevuse, jäikuse ja tehnoloogilistest omadustest keevitatavuse poolest.

Mitteraudmetallurgias (*non-ferrous metallurgy*), varem tuntud värvilises metallurgias kasutatavate metallurgiliste meetodite spekter on laiem kui **rauametallurgias** (*ferrous metallurgy*): kasutatakse püro-, hüdro- ja elektrometallurgiat ning mitmesuguseid segameetodeid (vt p 5.1.1. Metallurgiaprotsesside liigitus).

Pürometallurgilistes protsessides kasutatakse särdamist ja nagu terastegi tootmisel, sulatamist maagist või mittemetalletest vaheproduktidest ning metalletest lähtematerjalidest. Algul saadakse mittetäielikult puhastatud **rafineerimata metall** ehk **toormetall** (*unrefined metal, impure metal, crude metal*), mis puhastatakse ehk **rafineeritakse** (*refining*), kas lisandite oksüdeerimist kasutades või elektrolüütiliselt. Vaakumis kergelt aurustuvaid metalle (näiteks Mg) rafineeritakse metallurgilise destilleerimise teel vaakumis.

Hüdrometallurgilisi protsesse kasutatakse enamasti kasuliku mineraali väikese sisaldusega maakide töötlemisel. Maaki töödeldakse hapete, aluste või soolade vesilahustega, millest sadestatakse välja toodetav metall (näiteks oksiidsete ja hüdrokarbonaatsete vasemaakide töötlemine).

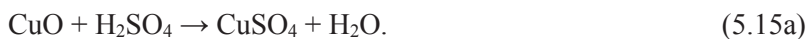
Elektrometallurgilistest protsessidest kasutatakse valdavalt elektrolüüsi. Elektrolüüs toimub soolade vesilahustes normaaltemperatuuril või sulatatud soolades kõrgetel temperatuuridel (Al elektrolüüs). Tavaliselt eelnevad elektrometallurgilistele hüdرو-, püro- või mingid teised keemilised metallurgilised protsessid.

Vasemetallurgia

Kõik vasemaagid on rauamaakidega võrreldes metalli väikese sisaldusega: maakide vasesisaldus on enamasti 1...2 %. Sageli esineb vaske polümetalletes, s.t mitmete erinevate metallide ühendeid sisaldavates maakides. Enamik vasemaakidest on sulfiididena: mineraali CuFeS_2 sisaldav **vaskrähk** (*chalcopyrite, yellow copper ore*) ja mineraali Cu_2S sisaldav **vasklääk** (*chalcosite*). Harvem esineb oksiidseid (mineraalid Cu_2O , CuO) või hüdrokarbonaatseid vasemaake (mineraalid CuCO_3 , $\text{Cu}(\text{OH})_2$ jt).

Ligikaudselt 90 % vasest toodetakse pürometallurgiliste meetoditega ja 10 % hüdrometallurgiat kasutades.

Hüdrometallurgiat kasutatakse oksiidsete ja hüdrokarbonaatsete maakide puhul. Vask viiakse lahusesse väävelhappe abil:



Vasesoola vesilahusest sadestatakse vask välja asendusreaktsioonil:

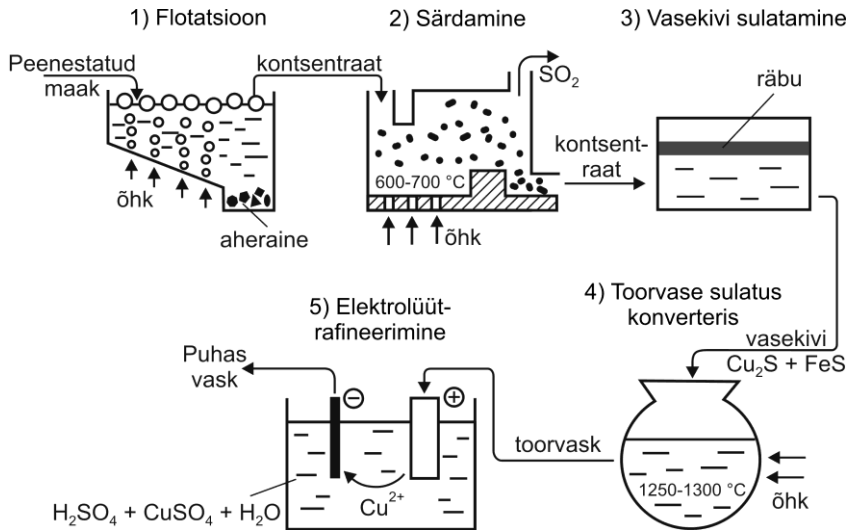


Saadud vase puhtus ulatub kuni 70 %.

Pürometallurgilise meetodi kasutamisel rikastatakse maak flotatsioonmeetodil.

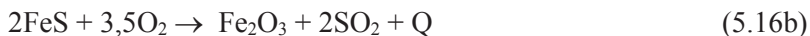
Flotatsioon (*flotation*) on rikastamismeetod, mis põhineb vedelasse keskkonda dispergeeritud materjali komponentide erineval määrguvusel. Komponentide erinev määrguvus vedelikus tagatakse flotatsioonreagentide viimise ga vedelikumahutisse,

tekitamaks maagiosakestel veega mittemärguva kihi. Vee ja sobiva reagenti emulsioonis aheraine märgub ja langeb mahuti põhja. Peenestatud maak ei märgu, temale kleepuvad sissepuhutava õhu mullid ning maagiosakesed jäävad vahuna vedeliku pinnale, kust need aeg-ajalt eemaldatakse (Joonis 5.26).



Joonis 5.26. Vase pürometallurgia

Flotatsioonil saadud maagikontsentraadi (10...35 % Cu) vävlisisaldust vähendatakse **keevkihis** (*fluidized bed*) **särdamise** (*roasting*) teel temperatuuridel 600...700 °C. Vajaliku temperatuuri saavutamiseks kasutatakse peale vedelkütuse ka väavli ja rualisandi oksüdeerumisel eralduvat soojust:



Vaheprodukt – **särdamissaadus** ehk **särdis** (*calcine, roast*) sulatatakse šaht-, leek- või elektrikaarahjus temperatuuridel 1500...1600 °C nn **kivikssulatuse** (*matte smelting*) käigus. Sulatamisel tekib kaks segunematut kihti: **vasekivi** (*copper matte*) kiht, mille koostisosadeks on vasesulfiidid (Cu₂S + FeS) ja räbukiht (FeO, SiO₂, CaO jt oksiidid).

Sulanud vasekivist saadakse **toorvask** (*blister copper*) vasekivi konverteris õhuga läbipuhumise teel (õhus olev lämmastik on vase suhtes inertgaas). Õhuhapnik oksüdeerib vase- ja raudsulfiidid:



ja loob tingimused vase saamiseks:



räbusti räbu

Saadud toorvask sisaldab 98,5...99,5 % Cu ja terve rea kahjulikke lisandeid, nagu Fe, Bi, Pb, S, O₂ jt. Kõik lisandid, eriti hapnik, halvendavad elektrijuhtivust. Vismut ja plii mõjuvad vasesulamites analoogselt väävliga rauasulamites – nad tekitavad kuumahaprust. Väävel ja hapnik halvendavad vase ja vasesulamite plastsust.

Puhas vask saadakse elektrolüütrafinaerimist kasutades (Joonis 5.26). Elektrolüüdi moodustab CuSO₄ ja H₂SO₄ vesilahus, anoodiks on toorvask, katoodiks puhtast elektrolüütilisest vasest õhukesed lehed. Alalisvoolu läbimisel lahustub anood elektroosiliselt – anoodi toorvask loovutab elektrone, s.t oksüdeerub ja elektrolüüdivanni satuvad positiivselt laetud vase ioonid Cu²⁺. Katoodil toimub vaseioonide redutseerimine:



Lisandid, sh Au, Ag jt sadestuvad vanni põhja ja saadakse elektrolüütiliselt puhas (99,95...99,99 % Cu) vask.

Alumiiniummetallurgia

Peamine alumiiniumimaak on **boksiit** (*bauxite*), mis sisaldab alumiiniumoksiidi Al₂O₃, samuti raua, räni ja teiste elementide oksüüde.

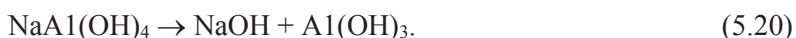
Tänapäevased Al tootmistehnoloogiad ei võimalda veel Al otse maakidest toota. Tootmisprotsess jaguneb kolme ossa:

- 1) **alumiiniumoksiidi** (*alumina, aluminium oxide*) Al₂O₃ saamine;
- 2) alumiiniumoksiidi elektrolüüs Al saamiseks;
- 3) rafineerimine.

Protsess algab (Joonis 5.27) **naatriumaluminaadi** (*sodium aluminate*) NaAl(OH)₄ saamisest, milleks peenestatud Al₂O₃ sisaldavat maaki töödeldakse **naatriumhüdrosüüdiga** (*sodium hydroxide, caustic*) autoklaavis temperatuuril 175 °C:



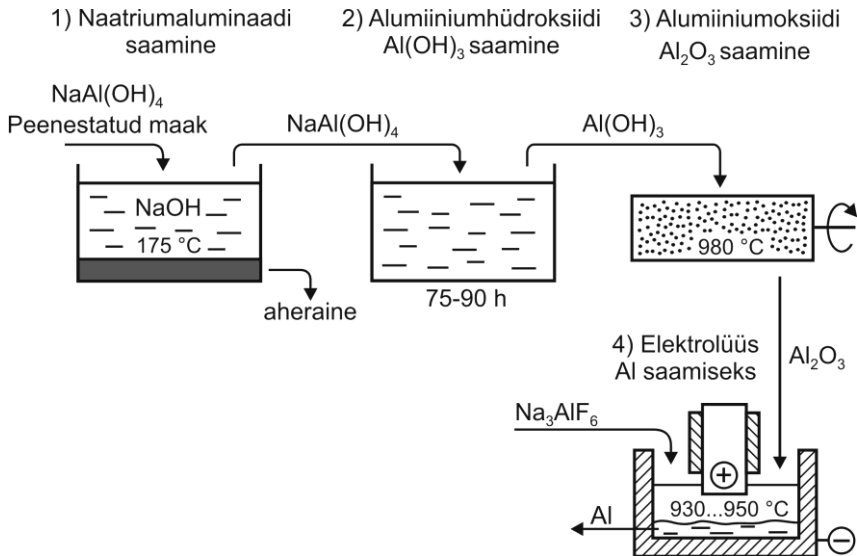
Saadud NaAl(OH)₄ vesilahus pumbatakse settepaaki, kus aeglase (75...90 tundi) hüdrolüüsi tulemusel settib lahusest kristalne alumiiniumhüdrosüüd Al(OH)₃:



Alumiiniumhüdroksiid eraldatakse filtreerides, misjärel toimub **kaltsineerimine** ehk **kaltsineeriv särdamine** (*calcination, calcining*) – kuumutamine temperatuuril 980 °C vee eemaldamiseks



Arvestades Al_2O_3 suurt keemilist püsivust ja Al keemilist aktiivsust ei toodeta alumiiniumi pürometallurgiliselt, mis põhineks redutseerimisreaktsioonil, vaid elektrolüütilisel teel. Elektrolüüsil ei saa elektrolüüdina kasutada vesilahust, kuna Al on negatiivsema elektrodipotentsiaaliga (–1,67 V) kui vesinik, s.t vesilahuse kasutamisel eralduks katoodil vesinik, aga mitte Al. Seetõttu kasutatakse elektrolüüdina Al_2O_3 8...10 % lahust **krüoliidis** (*cryolite, sodium aluminium fluoride*) Na_3AlF_6 . Elektrolüüt kuumeneb ja sulab elektrivoolu toimel. Vanni töötemperatuur, mille juures Al_2O_3 dissotsieerub, on 930...950 °C:



Joonis 5.27. Alumiiniumi elektrometallurgia

Katoodil Al redutseerub:



Anoodil eraldub hapnik, mis põhjustab süsinikelektroodi kulumist:



Et süsinikanood hapnikuga reageerides pidevalt lüheneb, kasvatatakse seda ülevalt juurde koks-pigi massiga. Vanni põhja (katoodile) kogunev sula Al imetakse välja sifoonidega.

Puhast Al nagu puhast Cu vajatakse kõige enam elektrijuhina (kaablitööstus): Al elektrijuhtivus moodustab 60 % puhta Cu omast. Al rafineerimiseks kasutatakse rafineerimist klooriga (sula Al läbipuhumine klooriga) või elektrolüütilist rafineerimist. Viimane tagab metalli suurema puhtuse.

Magneesiumimetallurgia

Magneesium esineb maakides peamiselt karbonaatidena – **magneesiidina** (*magnesite*) $MgCO_3$, **dolomiidina** (*dolomite*) $MgCO_3 \cdot CaCO_3$ ning kloriididena – peamiselt **karnalliidina** (*carnallite*) $MgCl_2 \cdot KCl \cdot 6H_2O$. Magneesiumi toodetakse suurtes kogustes ka mereveest (sisaldab umbes 0,13 % $MgCl_2$).

Puhta Mg saamiseks kasutatakse analoogselt Al tootmisega elektrometallurgiat – magneesiumisoolade elektrolüüsi. Vähempuhta Mg saamisel kasutatakse ka pürometallurgia meetodeid.

Magneesiumi elektrometallurgia. Olenemata maagist (karbonaatsed, kloriidsed) on vaja lähtematerjalid töödelda $MgCl_2$ saamiseks, millele järgneb $MgCl_2$ elektrolüüs. Magnesiit või dolomiit rikastatakse ja seejärel särratakse temperatuuridel 850...900 °C karbonaatide lagundamiseks:



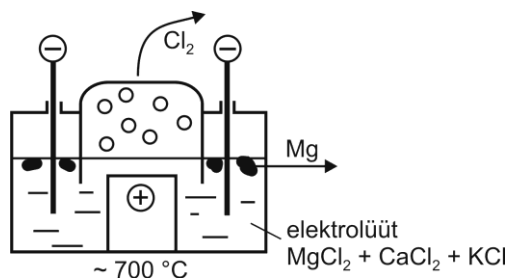
Magneesiumkloriid saadakse MgO töötlemisel gaasilise klooriga süsiniku juuresolekul temperatuuridel 800...900 °C:



Karnalliidi töötlemine erineb magneesiidi ja dolomiidi omast: kuuma veega töötlemisel eemaldatakse lisandid (NaCl jt.), misjärel särdamise ja sellele järgneva sulatamise teel eemaldatakse hüdraatvesi. Saadud produkt sisaldab ca 50 % $MgCl_2$.

Mg ei ole võimalik elektrolüüsida soolade vesilahustest tema madala elektrodipotentsiaali (-2,34 V) tõttu, kuna katoodil eralduks sel juhul vesinik. Mg elektrolüüsil kasutatakse elektrolüüdina kloriidide segu: $MgCl_2 + CaCl + KCl$ jt. Elektrolüüdi koostis valitakse selline, et ta tihedus ületaks Mg tiheduse. Mg elektrolüüs toimub temperatuuril ~ 700 °C šamottvooderdisega **elektrolüüseris** (*electrolyzer*) (Joonis 5.28), kus anoodiks on grafiit ja katoodiks terasplaadid. Elektrolüüdis sisalduv $MgCl_2$ dissotsieerub ioonideks:



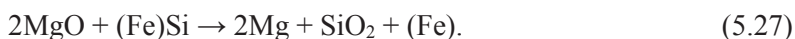


Joonis 5.28. Magneesiumi elektrometallurgia

Magneesium eraldub katoodil ja tõuseb oma väikese tiheduse tõttu tilkadena pinnale, kus eemaldatakse perioodiliselt. Anoodil eraldub gaasiline kloor, mis leiab tootmis-tsükliks uut kasutamist. Elektrolüüsi protsessis lisatakse vanni pidevalt MgCl_2 tooret juurde.

Mg rafineerimiseks kasutatakse rübustitega ümbersulatamist (meenutab terase kvaliteedi tõstmist sünteetiliste rübudega töödeldes) või vaakumis destilleerimist. Viimasel juhul Mg (keemistemperatuur 1091°C) aurustatakse vaakumis ja kondenseeritakse. Saadava Mg puhtus ulatub 99,99 %-ni.

Magneesiumi pürometallurgia seisneb Mg **taandamises** ehk **redutseerimises** (*reduction*) räni või süsinikuga. Vastavalt taandajale tuntakse **silikotermiat** (*silicothermy*) või **karbotermiat** (*carbothermym*). Pürometallurgiline meetod võimaldab magneesiidi või dolomiidi töötlemisel vältida vahepealset magneesiumkloriidi saamise protsessi. Silikotermilise meetodi puhul on lähtematerjaliks säratud dolomiidi või magneesiidi ja ferrosiliitsiumi segust pressitud briketid, mida kuumutatakse retort-ahjudes. Toimub Mg taandamine:



Taandatud Mg sublimeerib (aurustub) ja aurud, sattudes veega jahutatava kondensaatori pinnale, kristalliseeruvad Mg kristallideks. Kristallid sulatatakse vaakum-ahjudes ja valatakse valuplokkideks.

Karbotermia on eelnevaga analoogne, kusjuures taandajana kasutatakse kaltsiumkarbiidi CaC_2 :



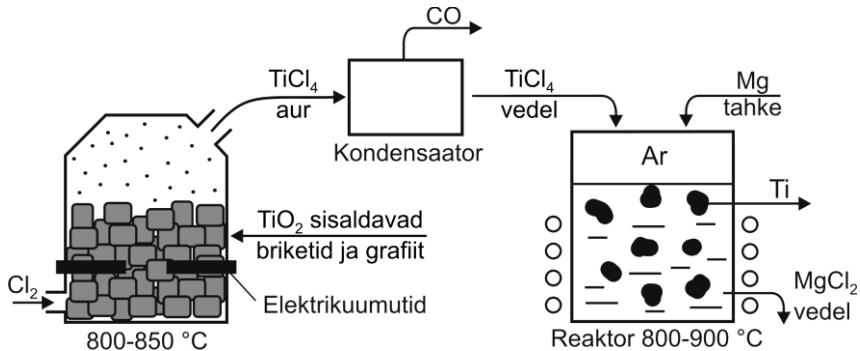
Titaanimetallurgia

Titaani leidub maakides põhiliselt oksiididena – **rutiilina** (*rutile*) TiO_2 või **ilme- niidina** (*ilmenite*) FeTiO_2 .

Titaanimaak (rutiil, ilmeniit) rikastatakse kas flotatsiooni või magnetrikastamist kasutades. Ti edasine tootmine kontsentradiist on raske ülesanne, kuna Ti on

keemiliselt väga aktiivne metall, mis reageerib kõrgendatud temperatuuridel hapniku ja lämmastikuga, vedelas olekus aga kõikide tuntud tulekindlate materjalidega. Ti tootmisel kasutatakse kõige rohkem **metallotermiat** (*metallothermy*), täpsemalt magnotermiat (metallotermiat magneesiumiga). Metallotermia all mõistetakse metallide tootmist taandamise teel taandatavast metallist keemiliselt aktiivsemate metallidega. Näiteks alaliigid: silikotermia, alumotermia, magnotermia.

Titaani tootmise etapid on järgmised (Joonis 5.29).



Joonis 5.29. Titaani tootmine

1. Titaankloriidi TiCl₄ saamine elektrišahtajudes. Ahju alumine osa on täidetud grafiidi ja briketeeritud täidisega (rutiil + koks + kivisööpigi). Temperatuurini 800...850 °C kuumutatud ahju juhitakse kloor ning toimub reaktsioon:



TiCl₄ aurude kondenseerimisel tekib punakas vedelik, mis **fraktsioondestilleeritakse** (*fractional distillation, fractionation*) puhta TiCl₄ eraldamiseks teistest kloriididest.

2. Käsntitaani saamine titaankloriidist. Titaankloriid taandatakse magneesiumiga neutraalses atmosfääris (Ar, He) temperatuuril 800...900 °C. Sulamagneesiumi läbipuhumisel gaasilise titaantetrakloriidiga:



Taandatud Ti osakesed paakuvad poorseks **käsntitaaniks** (*sponge titanium*), mille pooridesse jääb MgCl₂ ja Mg.

3. Käsntitaani rafineerimine. See seisneb **metallurgilises destilleerimises** (*metallurgical distillation*), mille käigus Mg ja MgCl₂ aurustuvad ja sadestuvad kondensaatoris.
4. Titaanist valuplokkide saamiseks käsntitaan peenestatakse ja saadud pulbrist pressitakse elektroodid kaitsekeskkonnaga (vaakum, Ar) elektrikaarahjus

ümbersulatamiseks. Titaanisulamitest valuplokkide saamiseks lisatakse käsntitaani pulbrile lisaks legerivate elementide pulbrid.

5.2.2. Vask ja vasesulamid

Vask on olnud üks tähtsam tehnometall enam kui 6000 aastat. Puhta metallina on vask olnud elektrotehnikatööstuse selgroog. Ta on samuti arvukate sulamite, nagu messingid ja pronksid, põhikomponent. Võrreldes teiste tehnomaterjalidega, on vase ja vasesulamite olulised omadused järgmised:

- 1) hea elektri- ja soojuhtivus;
- 2) suur tugevus samaaegse suure plastsusega;
- 3) korrosioonikindlus paljudes keskkondades.

Tänapäeval on palju äärmiselt kasulikke vasesulameid, kuid metalli kõrgest hinnast tingituna on need paljudel juhtudel asendumas odavamate materjalidega, nagu alumiiniumisulamid ja plastid.

Puhas vask

Sulatusmetallurgia (püro- või elektrometallurgia) teel saadakse **toorvaske** (*blister copper*), mis sisaldab 98,5...99,5 % Cu ja lisandina rauda, väävlit, hapnikku. Toorvask rafineeritakse, mille tulemusena saadakse puhas elektrolüütiline vask ehk katoodvask vasesisaldusega 99,2...99,8 %.

Puhta vase (99,8 % Cu) põhilised omadused on Tabelis 5.15.

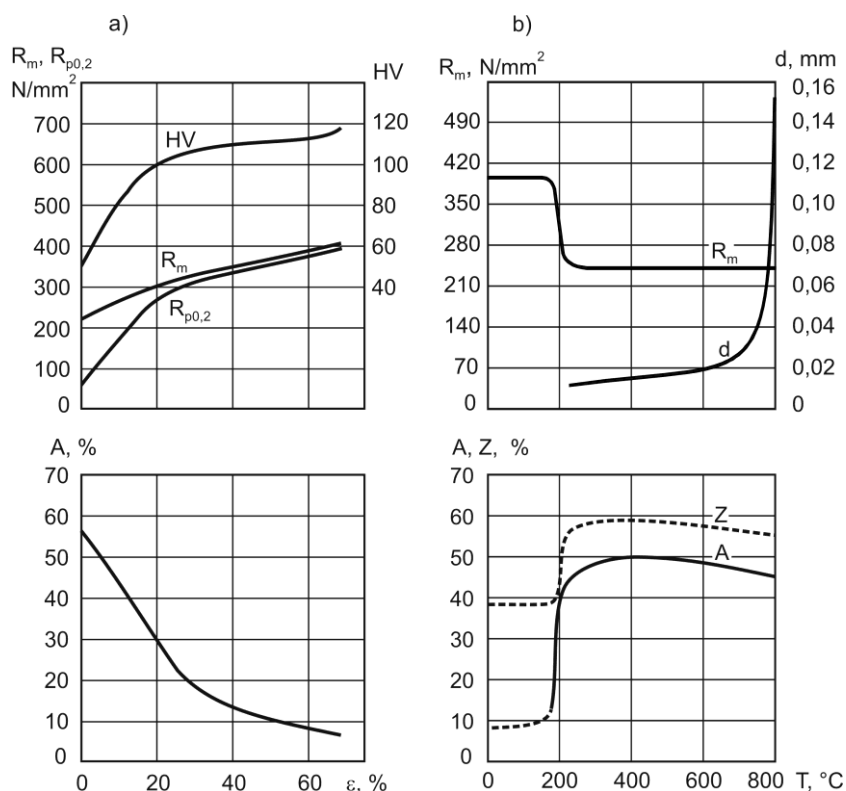
Lõõmutatud vase elektrijuhtivus ($1/\rho$) temperatuuril 20 °C on 58 ($\Omega \cdot \text{mm}$)⁻¹, mis on võetud elektrijuhtivuse standardiks ja võrdub 100 %-ga IACS järgi (*International Annealed Copper Standard*). Lõõmutatud olekus puhta vase tõmbetugevus on ca 200 N/mm², plastsus ligi 60 %.

Puhta vase nagu alumiiniumigi mehaanilised omadused sõltuvad suuresti deformatsiooniastmest külmdeformeerimisel ja kalestunud metalli järgnevast lõõmutamisest (Joonis 5.30a). Rekristallisatsioonitemperatuur on vase puhtusastmest: elektrolüütvasel on see ca 200 °C, fosforit sisaldaval vasel ca 300 °C. Lõõmutamisel väheneb tõmbetugevus (Joonis 5.30b), suurenevad plastsusnäitajad ja märgatavalt ka terasuurus.

Tabel 5.15. Puhta vase (99,8% Cu) põhilised omadused

Omadus	Tähis	Väärtus
Sulamistemperatuur	$T_s, ^\circ\text{C}$	1083
Kristallivõre	–	K12
Tihedus	$\rho, \text{g/cm}^3$	8,96
Normaalelastsusmoodul	$E, \text{N/mm}^2$	$122 \cdot 10^3$
Tõmbetugevus	$R_m, \text{N/mm}^2$	200
Eritakistus 20 °C	$\rho, \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	$1,8 \cdot 10^{-8}$
Soojusjuhtivustegur	$\lambda, \text{W/m}\cdot\text{K}$	390
Joonpaisumistegur	$\alpha, 1/\text{K}$	$17 \cdot 10^{-6}$
Korrosioonikindlus	–	Väga hea

Puhta vase kasutusala jaoks elektrotehnika on (igasugused elektrimähised ja -juhtmed), arhitektuur (pindade katmine), kodune majapidamine, toiduaine- ja keemiatööstus (mitmesugused nõud ja mahutid, soojusvahetid jm).

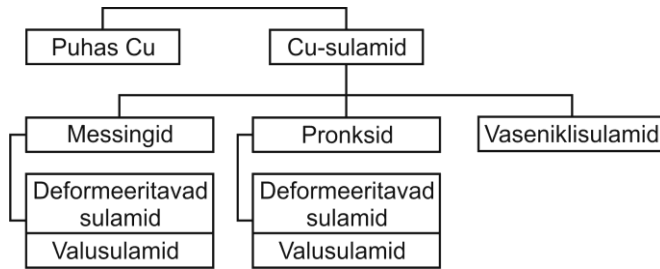


Joonis 5.30. Deformeerimise (a) ja sellele järgneva lõõmutamise mõju deformeeritud (deformatsiooniate 60 %) vase mehaanilistele omadustele (b)

Vaske legeeritakse väga mitmesuguste elementidega ja saadakse kasulikke sulameid.

Vasesulamid liigitatakse, lähtudes keemilisest koostisest ja neist toodete valmistusviisi järgi järgmiselt (Joonis 5.31):

- vasesingisulamid – **messingid** ehk **valgevased** (*brasses*),
- vasetina, vasealumiiniumi- jt sulamid – **pronksid** (*bronzes*),
- **vaseniklisulamid** (*cupro-nickels*).



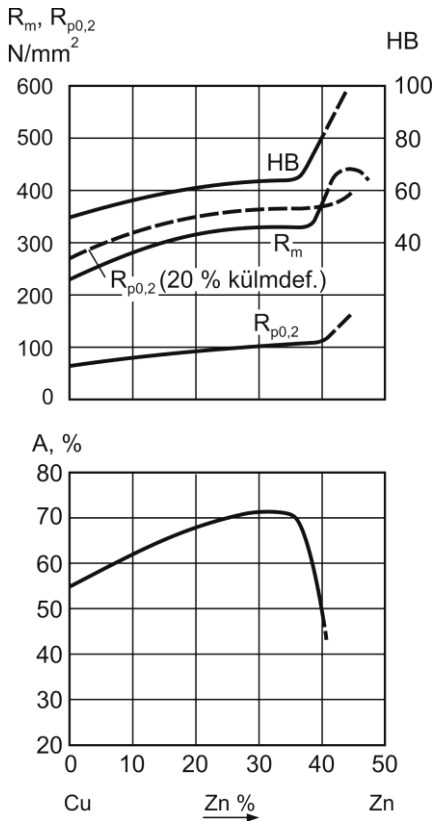
Joonis 5.31. Vasesulamite liigitus koostise ja neist toodete valmistusviisi järgi

Messingid

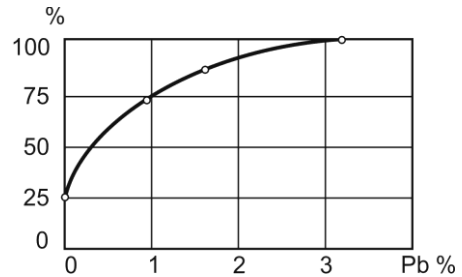
Tsingi lisamine vasele soodustab sulami tugevuse suurenemist eelkõige tänu tsingi lahustumisele vases; samuti suureneb ka sulami plastsus (Joonis 5.32), mis on ebaharilik. Kõrge plastsusega sulamitena on tuntud 10...20 % Zn-sisaldusega messingid, nn **tombakud** (*gliding metals*), mida kasutatakse juveelitööstuses (suveniirmärgid jt), soojusvahetite valmistamiseks hea soojusjuhtivuse tõttu, ja 30 % Zn-sisaldusega messing, nn **hülsimessing** (*catridge brass*), mida kasutatakse mürsukestade valmistamiseks. Deformeeritava messingi Zn-sisaldus piirdub tavaliselt 35 %-ga. Edasine Zn-sisalduse tõus toob kaasa messingi plastsuse vähenemise, kuid sulam on mõnevõrra odavam. Cu/Zn vahekorras 70/30 ühefaasiliste α -messingite omadusi võib mõnevõrra parandada väikestes kogustes teiste lisandite sisseviimisega. Väikestes kogustes Sn ja Al lisamine parandab messingi korrosioonikindlust merevees, 1...2 % Pb lisamine parandab aga messingi lõiketöödeldavust (Joonis 5.33). **Hea lõiketöödeldavusega messing** (*free cutting brass*) sisaldab ca 40 % Zn ja 1...2 % Pb (selle messingi suhtes võrreldakse teiste vasesulamite lõiketöödeldavust).

Tulenevalt Cu-Zn-süsteemi faasidiagrammist jagunevad enim kasutatavad Cu-Zn-sulamid ühefaasilisteks (α -messingid) või kahefaasilisteks ($\alpha + \beta$ messingid).

Ühefaasilised α -messingid on plastsed ja sobivad külmsurvetöötluks, kuna vask annab tsingiga ühefaasilise tardlahuse Zn-lahustuvusega kuni 39 %. Suurematel Zn-sisaldustel lisanduvad struktuuri keemilised ühendid (β - ja γ -faas), mis on kõvad ja haprad, mistõttu neid faase sisaldavad sulamid on samuti survetöödeldavad, kuid kõrgematel temperatuuridel; nad on ka valatavad.



Joonis 5.32. Messingi mehaaniliste omaduste sõltuvus Zn-sisaldusest



Joonis 5.33. Plii mõju messingi lõiketöeldavusele

Kahefaasilised ($\alpha + \beta$)-messingid koosnevad tardlahusest α ja keemilisest ühendist β ning nad on vormitavad kuumsurvetöötlemise või valamise teel. Kasutatavamad ($\alpha + \beta$)-messingid on Cu/Zn vahekorras 60/40, need on tuntud **muntsmetallina** (*Muntz metal*) (Tabel 5.16). Omaduste parandamise eesmärgil legeeritakse ($\alpha + \beta$)-messingeid teiste elementidega: väikestes kogustes Pb lisamine tagab hea lõiketöeldavuse; selliste lisandite nagu Mn, Sn, Al, Fe või Ni lisamine tõstab märgatavalt messingi tugevust. Mn-sisaldavad sulamid on tuntud ka kõrgtugevate messingitena. Neid kasutatakse valatuna (head valuomadused tänu väikesele kristallisatsioonivahemikule) või kuumsurvetöödelduna. Üle 50 % Zn-sisaldusega messingeid praktiliselt ei kasutata, kuna struktuuri tulev γ -faas teeb sulamid hapraks.

Messingid ei nõua sulatise desoksüdeerimist enne vormi valamist, kuna esiteks alandab Zn tunduvalt messingi sulamistemperatuuri (on ca 900 °C), teiseks tõrjub osa Zn lendumine sulatisest hapnikku (kerged tsingiaurud moodustavad vedelmetalli pinnal kaitsva keskkonna).

Tabelis 5.16 on esitatud mõningate vasesulamite omadused.

Tabel 5.16. Vase ja mõningate vasesulamite koostis, omadused ja kasutus

Sulam	Koostis	Olek*	Tõmbe- tugevus R_m , N/mm ²	Omadused, kasutus		
Puhas vask	99,8 % Cu	L	220	Hea elektrijuhtivusega, voolujuhid Keemiaseadmed, sügavtõmmatud tooted		
		K	350			
	99,5 % Cu	L	220			
		K	400			
Messingid <u>α-messingid</u> Tombak	90 % Cu 10 % Zn	L	280	Juvelitooted, rakenduskunst		
		K	510			
	Pooltombak 80 % Cu 20 % Zn	L	310			
		K	510			
	Hülsimessing 70 % Cu 30 % Zn	L	325			
		K	700			
	<u>$\alpha+\beta$-messingid</u> Muntsmetall	60 % Cu; 40 % Zn	VO		375	Kondensaatorid ja soojusvahetid
	Hea lõiketöõdel- davusega messing	58 % Cu; 40 % Zn; 2 % Pb	L		380	Sobilik automaatpinkidel detailide valmistamiseks
			K		590	
Pronksid Tinapronks (fosforpronks)	10 % Sn; 0,5 % P; ülejä Cu	VO	280	Üldotstarbelised valandid ja laagrid		
Tinapronks (punapronks)	10 % Sn; 2 % Zn; ülejä Cu	VO	300	Survetihedad valandid, pumpade osad		
Alumiiniumpronks	5 % Al, ülejä Cu 10 % Al, ülejä Cu	VO	700	Mündimetall (vasekarva) Kõrgtugevad valandid ja sepsed		
		VO	700			
Vaseniklisulamid Mündimelhior	25 % Ni, Cu ülejä	L	360	Mündimetall (hõbedane)		
		K	600			
	Uushõbe 18 % Ni, 20 % Zn, Cu ülejä	L	375			
		K	650			

* L – lõõmutatud; K – kalestatud; VO – väljastamisolek (valatud või kuumtöödeldud).

Pronksid

Tinapronksid

Tinapronkside (*tin bronzes*) Sn-sisaldus ei ületa kasutatavais Cu-Sn-sulameis 20 %. Survetöödeldavate tardlahuse struktuuriga sulamite Sn-sisaldus ei ületa tavaliselt 7 %; need sulamid on plastsed, hästi survetöödeldavad, kuid ka kiirelt kalestuvad ning neid kasutatakse mitterauasulameist vedrude, müntide ja ornamentaalse pronkspleki valmistamiseks. Tõsi, valusulameis tuleb juba alates 5 % Sn-sisaldusest struktuuri mõningal määral keemiline ühend tingituna eelkõige nende sulamite laiaast kristallisatsioonintervallist (likvidus- ja solidusjoone vahest). Seetõttu tekivad kristalliseerumise algstaadiumis tinavaesed kristallid, selle lõppstaadiumis aga tinarikkad keemilist ühendit sisaldavad kristallid. See sulami keemilise koostise ebahühtlus – likvatsioon – on kõrvaldatav pikaajalise lõõmutamisega; lõpptulemuseks on valandi suur poorsus. Seetõttu pole need sulamid sobivad survetöötlemiseks ja neid kasutatakse eelkõige valatud olekus. Tinapronksid vajavad enne valamist desoksüdeerimist, milleks kasutatakse fosforit. Vajaliku fosforikoguse lisamisel peetakse silmas, et sulam sisaldaks pärast desoksüdeerimist teatud jääkfosforit (kuni 1 %). Selliseid tinapronkse nimetatakse **fosforpronksideks** (*phosphor bronzes*). Jääkfosfor tõstab tinapronksi tugevust.

Kahefaasiliste tinapronkside põhiline kasutusala on laagrimaterjalid. Kahefaasiline struktuur sobib selleotstarbelistele materjalidele, kuna α -tardlahuse struktuuriga maatriks tagab laagri hea sissetöötavuse ja vastupanu löökidele, väga kõvad ja haprad keemiliste ühendite osakesed kannavad koormust ja tagavad hea kulumiskindluse (vt p 5.2.4, Joonis 5.42).

Tinapronksidesse lisatakse ka tsinki ja pliid: Zn lisatakse sulami valuomaduste parandamiseks ja ka sulami odavamiseks. Tsinki sisaldavat tinapronksi nimetatakse ka **relvametalliks** (*gun-metal*), kuna varasematel aegadel valati neist raskeid suurtükke. Väikestes kogustes Pb lisamine parandab tinapronkside löiketöödeldavust, suurtes kogustes (kuni 25 %) lisatakse pliid laagrimaterjalina kasutatavatesse **pliipronksidesse** (*lead bronzes*).

Alumiiniumpronksid

Alumiiniumpronkside (*aluminium bronzes*) omadused on sarnased tinapronkside omadega. Need sulamid on eelkõige ühefaasilised ja hea külmsurvetöödeldavusega; neid kasutatakse ka mündimetallina. Kahefaasilisi Al-pronkse kasutatakse eelkõige valatult või detailide valmistamiseks kuumsurvetöötamise teel. Alumiiniumpronkse Al-sisaldusega *ca* 10 % (Tabel 5.16) kasutatakse laeva sõukruvide, klappide, pumpade jms merelistes tingimustes töötavate seadmete või nende osade valmistamiseks.

Ränipronksid

Räni lahustuvus vases piirdub temperatuuril 850 °C 5,3 %-ga ja väheneb temperatuuri alanedes. Tehnikas kasutatavad **ränipronksid** (*silicon bronzes, silicon-coppers*) sisaldavad tavaliselt 3 % Si ja on homogeense ühefaasilise struktuuriga. Tavaliselt on ränipronksid legeritud väikestes kogustes Mn-ga (kuni 1 %). Ühefaasilisest struktuurist tulenevalt on ränipronksid hästi survetöödeldavad nii külmalt kui ka kuumalt. Ränipronkside omadused on ligilähedased tinapronkside omadustele, mistõttu neid kasutatakse sageli tinapronkside asemel.

Berülliumpronksid

Berülliumpronksid (*beryllium bronzes, beryllium-coppers*) Be-sisaldusega kuni 2,7 % on suurima tugevusega vasesulamid. Sulamid on termotöödeldavad (karastatavad ja vanandatavad) nagu Al-Cu-sulamid, mille tulemusena saavutatakse tugevus koos karestusega kuni 1400 N/mm². Enim kasutatav berülliumpronks sisaldab 2 % Be, kuid teistes sulamites on Be-sisaldus 0,4...2,7 % koos väikestes kogustes Co ja Ni-ga. Berülliumpronksi kasutatakse korrosioonikindlate vedrude ja membraanide, sädet mitteandvate tööriistade jm valmistamiseks.

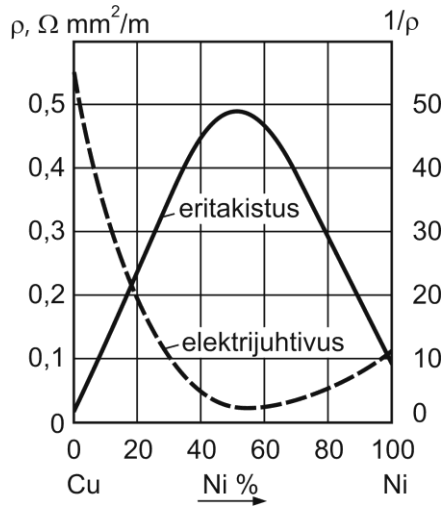
Vaseniklisulamid

Nikkel on piiramatult lahustuv vases (vt faasidiagrammi p 3.2, Joonis 3.4 b) ning **vaseniklisulamid** (*cupronickels*) on tugevad ja plastsed sulamid. Vaseniklisulamid on suurepärase korrosioonikindlusega ja eriliste elektriliste omadustega (vt. Joonis 5.34).

Cu-Ni-sulamite joonpaisumistegur Ni-sisaldusel 40...50 % on nullilähedane, samas on elektrieritakistus aga maksimaalne. Väike joonpaisumistegur säilib kuni temperatuurini 500 °C, mistõttu **konstantaana** (*constantan*) tuntud Cu-Ni-sulamit (55 % Cu, 45 % Ni) kasutatakse elektri- ja täppisseadmes, kus esinevad suured temperatuurikõikumised.

Korrosioonikindlad vaseniklisulamid sisaldavad ca 30 % Ni ja vähesel määral Fe ning Mn, mistõttu nad on eriti püsivad merevees. Mõningate vaseniklisulamite koostis ja omadused on Tabelis 5.16.

Vaseniklisulamid Ni-sisaldusega 20...25 % on tuntud mündimetallina – **mündimelhiorina** (*coin cupronickel, British silver*). Teisteks nimetatud vaseniklisulami kasutusvaldkondadeks on soojusvahetid, jahutussüsteemid, laevaehituses jt. Tsingi lisamisel Cu-Ni-sulamitesse saadakse sulam (45...75 % Cu, 10...20 % Ni, 20...35 % Zn), mis on tuntud **uushõbedana** ehk **alpakana** (*nickel silver, German silver, newsilver*). Uushõbe on väga plastne sulam, mille põhiliseks kasutusvaldkonnaks on juveelitööstus (dekoratiivesemed, terariistad). Tavaliselt kaetakse need õhukese hõbedakihi, andes neile hõbedase väljanägemise.



Joonis 5.34. Cu-Ni-sulamite eritakistuse ja elektrijuhtivuse sõltuvus koostisest

Vasesulamite tähistus

Vase ja vasesulamite margitähistus põhineb eurostandarditel EN1412 ja EN1982

Vase ja vasesulamite tähistus, mille järgi kasutatakse kahte tähist:

- 1) margitähist (see määrab keemilise koostise), mis koosneb tähttähistest **Cu**, millele järgneb puhta Cu korral vase tüüpi iseloomustavaid suurtähti, näiteks Cu-ETP jt, sulamite korral legerivate elementide sümbolid ja nende nominaalsisaldus (täisarv %), näiteks CuZn36Pb3, valusulamite korral lisandub eesliide G või erivaluviiside tähised (GS – liivvormvalu, GM – püsi-vormvalu, GZ – tsentrifugaalvalu, GS – pidevalu, GP – survevormvalu), näiteks G-CuSn10;
- 2) tunnusnumbrit (materjali margi numbretähis). Tunnusnumber sisaldab kaheko-halist tähttähist (esimene täht C – vase baasil materjal; teine täht C – valusu-lam, W – deformeeritav sulam jt), millele järgnevad materjaligrupi tähistavad kolm numbrit (000...999) ja materjaligrupi tähttähis (puhas vask – A või B, madallegeeritud Cu-sulamid (legerivaid elemente < 5 %) – C või D, Cu-Al-sulamid – G, Cu-Zn-sulamid – L, Cu-Ni-sulamid – H jne), näiteks CW101C (CuBe2), CC508L (CuZn37).

Cu ja vasesulamite oleku (omaduste) tähistamiseks tuuakse margitähise järel tähed, mis näitavad

- A – katkevenivust,
- B – vedru paindetugevust,
- D – tõmmatud, mehaanilisi omadusi määratlemata,
- G – terasuurst,
- H – Vickersi kõvadust,

M – valmistusolekus, mehaanilisi omadusi määratlemata,
 R – tõmbetugevust,
 Y – tinglikku voolepiiri,

millele järgnevad (v.a D, G, M) vastavaid mehaanilisi omadusi näitavad arvud, näiteks

Cu-OF - A007 (katkevenivus 7 %),
 CuZn37 - G020 (terasuurus 20 μm),
 CuZn37 - H150 (kõvadus 150 HV),
 CuZn39Pb3 - R500 (tõmbetugevus 500 N/mm²).

5.2.3. Alumiinium ja alumiiniumisulamid

Alumiiniumi on üldiselt tööstuslikult kasutatud ainult *ca* 125 aastat; praegusajal järjestub ta mahult ja kulude poolest teiseks terase järel. Siit on alumiinium ja alumiiniumisulamid olulised väga paljudes majandusharudes: transpordis, konteineri- ja pakenditööstuses, ehituses, elektrotehnikas, masinaehituses jt. Alumiiniumi ja alumiiniumisulamite kui tehnomaterjalide unikaalsed ja külgetõmbavad omadused on nende kergus (tihedus 2,7 g/cm³), korrosioonikindlus, hea elektri- ja soojusjuhtivus, töödeldavus ja peaaegu piiramatult viimistletavus. Tõsi, alumiiniumisulamite hind võrreldes teraste omaga on neli-viis korda suurem. Samas moodustab alumiiniumi ja alumiiniumisulamite taaskasutusel vajalik energia ainult 5 % energiast, mida on vaja alumiiniumi tootmiseks.

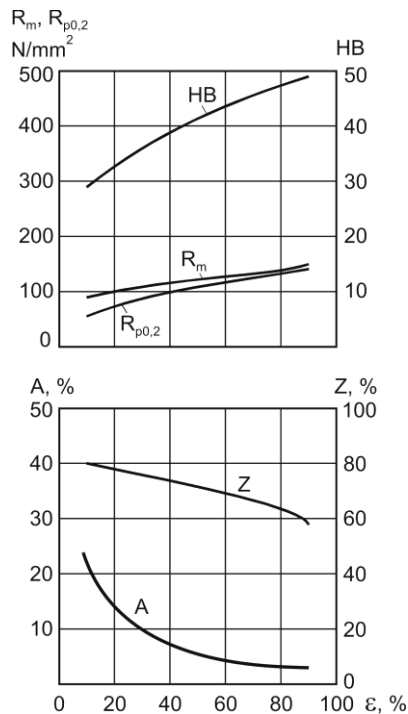
Alumiinium

Alumiiniumoksiidi elektrolüüsil saadud alumiiniumi puhtus on 99,5...99,8 % piires, mille põhilisteks lisanditeks on raud, räni ja mangaan. Suurema puhtusega alumiiniumi (kuni 99,9 % Al) saadakse alumiiniumi rafineerimise teel; selle põhilised omadused on toodud Tabelis 5.17.

Tabel 5.17. Puhta alumiiniumi (99,9 % Al) põhilised omadused

Omadus	Tähis	Väärtus
Sulamistemperatuur	$T_s, ^\circ\text{C}$	660
Kristallivõre	–	K12
Tihedus	$\rho, \text{g/cm}^3$	2,70
Normaalelastsusmoodul	$E, \text{N/mm}^2$	$70 \cdot 10^3$
Tõmbetugevus	$R_m, \text{N/mm}^2$	70...135
Eritakistus 20 °C	$\rho, \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	$2,8 \cdot 10^{-8}$
Soojusjuhtivustegur	$\lambda, \text{W/m}\cdot\text{K}$	204
Joonpaisumistegur	$\alpha, 1/\text{K}$	$24 \cdot 10^{-6}$
Korrosioonikindlus	–	Väga hea

Alumiiniumil on rida omadusi (hea korrosioonikindlus, väike tihedus), mis teeb ta äärmiselt kasulikuks tehnomaterjalide valdkonnas. Puhas alumiinium on küll madala tõmbetugevusega (Tabel 5.17), kuid seda saab tõsta külmdeformeerimise (kalestimise) teel (Joonis 5.35) või teiste elementidega legeerimise ja termotötlusega; tugevus tõuseb märgatavalt (kuni 500 N/mm^2), andes sulameile hea eritugevuse (R_m/ρ kuni 200). Elastusmoodul on küll 1/3 terase elastusmoodulist, kuid erielastusmoodulid (E/ρ) on neil praktiliselt ühesugused. Nagu enamik tahkkesendatud kuupvõrega metalle on alumiinium väga plastne ja vormitav paljude moodustega. Alumiiniumi hea elektrijuhtivus (60 % puhta vase elektrijuhtivusest) soosib tema kasutamist paljudes elektrotehnika valdkondades.



Joonis 5.35. Alumiiniumi tugevnemine külmdeformeerimisel: deformatsiooniastme mõju tugevus- ja plastsusnäitajale

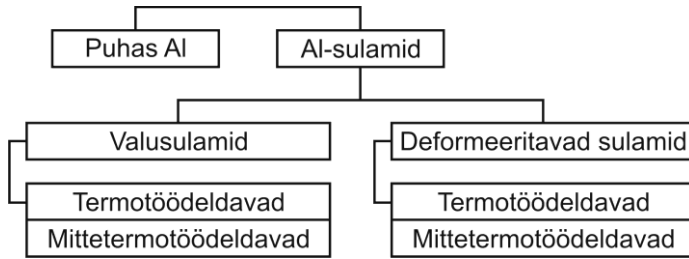
Alumiinium on väga aktiivne hapniku suhtes ja metalli värske pind oksüdeerub kiiresti. Moodustub ainult mõne aatomkihi paksune tihe oksiidikiht, mis kaitseb pinda edaspidise korrosiooni eest; seega on alumiiniumi hea korrosioonikindlus tingitud sellest oksiidpindest. Alumiiniumi korrosioonikindlust saab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

Kõrge puhtusastmega alumiinium (üle 99,5 % Al) on väikese tugevusega ja teda kasutatakse peamiselt keemia- ja toiduainetööstuses mahutite ja torustike valmista-

miseks. Tehniline alumiinium, mis sisaldab kuni 0,5 % Fe, on tegelikult alumiiniumi ja raua sulam; raud tõstab märgatavalt alumiiniumi tugevust, vähendab aga plastisust ja korrosioonikindlust (tõmbetugevus kuni 135 N/mm², Tabel 5.17).

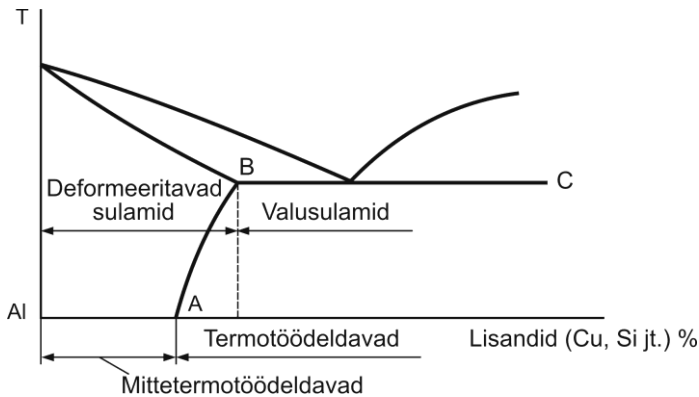
Alumiiniumisulamid

Alumiinium võib olla legeritud paljude elementidega, andes siis kasulikke konstruktsioonimaterjale. Alumiiniumisulameid liigitatakse, lähtudes töödeldavusest ja termotööstusest, järgmiselt:



Joonis 5.36. Alumiiniumisulamite liigitus toodete valmistusviisi ja termotööstuse järgi

Alumiiniumisulamite liigituse aluseks nendest sulamitest toodete saamise mooduse ja termotööstuse järgi on Al ja tema põhilisandite faasidiagrammid (Joonis 5.37).



Joonis 5.37. Alumiiniumisulamite liigitus faasidiagrammi alusel

Lähtudes toodete saamise (valmistamise) moodusest, liigitatakse alumiiniumisulamid kahte gruppi:

- deformeeritavad/survetöödeldavad sulamid,
- valusulamid.

Termotöödeldavuse põhjal jagunevad sulamid samuti kahte gruppi:

- termotöödeldavad (karastatavad ja vanandatavad),
- mittetermotöödeldavad (mittekarastatavad ja -vanandatavad).

Enamik deformeeritavaid alumiiniumisulameid on termotöödeldavad, mislābi saab suurendada nende tugevust ja kōvadust.

Deformeeritavatel termotōtlusega tugevdatud alumiiniumisulamitel on vāikese tiheduse juures küllaltki suur tugevus, mistōttu sellised sulamid on masina- ja aparaadiehituses teraste järele üks pōhilisemaid konstruktsioonimaterjale. Tugevuse tōstmise eesmärgil pärast karastamist vanandatakse sulameid kas loomulikult (s.o toatemperatuuril) vōi kunstlikult (s.o kõrgendatud temperatuuril). Seejuures saavutatakse tugevus mitte karastamisega nagu terastel, vaid vanandamisega.

Deformeeritavad alumiiniumisulamid

Deformeeritavate Al-sulamite tōtlust (olekut) iseloomustavad järgmised tähised:

F – tōtlemata (deformeerimata tooted täiendava tōtluseta)

H – kalestatud, kalestusastmed

H1X – mittetermotōdeldud pärast kalestamist (X (1...9) – erinev kalestusaste)

H2X – osaliselt lõõmutatud pärast kalestamist (X – erinev jääkkalestusaste)

H3X – stabiliseeritud pärast kalestamist, s.o kuumutatud veidi üle tōõtemperatuuri (X – jääkkalestusaste)

O – sferoidiseeritud (tōõdeldavuse tagamiseks pärast kalestust)

T – termotōdeldud (T1...T9), olulisemad neist

T3 – karastatud, kalestatud ja loomulikult vanandatud

T4 – karastatud ja loomulikult vanandatud

T6 – karastatud ja kunstlikult vanandatud

W – ainult karastatud

Deformeeritavad alumiiniumisulamid liigitatakse termotōtluse pōhjal järgmiselt:

a) sulamid, mida termotōtlusega ei tugevdata (mittetermotōdeldavad);

b) termotōtlusega tugevdatavad sulamid (termotōdeldavad).

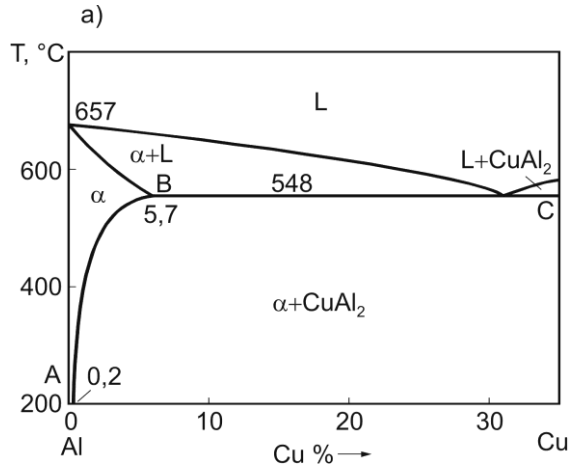
Esimesse gruppi kuuluvad Al-Mn- (seeria 3XXX) ja Al-Mg-süsteemi (seeria 5XXX) sulamid, mis on küll tugevdatavad kalestamise, mitte aga vanandamise teel (tähistust vt Tabel 5.18).

Al-Mn-sulamid – magnaaliumid (*magnaliums*) sisaldavad 1...2 % Mn, olles ca 15 % tugevamad puhtast alumiiniumist ja veidike suurema korrosioonikindlusega.

Al-Mg-sulamid magneesiumi suure lahustuvuse tōttu alumiiniumis sisaldavad kuni 10 % Mg, on ligi kaks korda tugevamad puhtast alumiiniumist. Al-Mg-sulamite tootmisel on oluline puhta alumiiniumi kasutamine.

Teise gruppi – karastatavate ja vanandatavate alumiiniumisulamite gruppi kuuluvad eelkōige deformeeritavad Al-Cu-(Mg)-sulamid (seeria 2XXX), Al-Mg-Si-sulamid (seeria 6XXX) ja Al-Zn-sulamid (seeria 7XXX) (vt Tabel 5.18).

Al-Cu-(Mg)-sulamid – duralumiiniumid (*duralumins*) on termotöötusega tugevdatavate sulamite põhilisi esindajaid. Alumiiniumisulamite termotöötlus (vanandamine) põhineb asjaolul, et nimetatud süsteemi sulamites esineb piiratud lahustuvus, mis erineb suuresti madalal ja kõrgel temperatuuril. Tüüpilisteks selle grupi sulamite esindajateks on just Al-Cu-sulamid, mille faasidiagramm on Joonisel 5.38.



Joonis 5.38. Al-Cu-faasidiagrammi Al-poolne osa

Vase lahustuvus alumiiniumis toatemperatuuril on maksimaalselt 0,2 massiprotsenti, kuid temperatuuril 548 °C võib see ulatuda 5,7 massiprotsendini. Näiteks kui jahutada aeglaselt 5 % vasesisaldusega sulamit (2 aatomiprotsenti Cu), saame sulami struktuuri, milles ühendi CuAl₂ osakesed on sadestunud Al-tardlahuse terapiiridele. Kui vastupidi, kõrgele temperatuurile kuumutatud sulamit jahutada kiirelt, saab üleküllastatud Al-tardlahuse struktuuri (vt ka p 4.3.2).

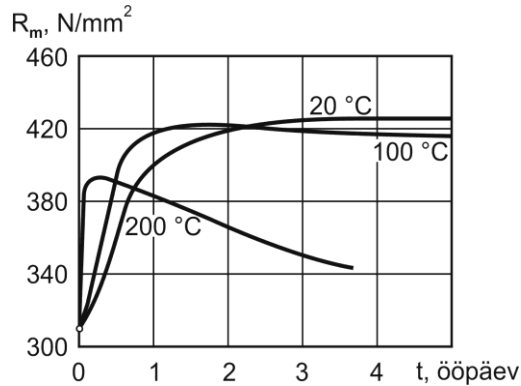
Alumiiniumisulamite tugevdamiseks kasutatakse karastamist ja vanandamist, ebapüsivate struktuuride ja kristalse ehituse deformatsioonidefektide kõrvaldamiseks ka lõõmutamist.

Karastamine (*hardening*) on kuumutamine temperatuurini, mil sulami intermetalsed faasid lahustuvad alumiiniumis kas täielikult või osaliselt, sellel temperatuuril seisutamine ja seejärel kiire jahutamine üleküllastatud tardlahuse saamiseks – tegemist on **tardlahustöötusega** (*solid solution treatment*). Karastamine toimub vees. Pärast karastamist on sulamitel üleküllastunud α-tardlahuse struktuur, mistõttu need karastatult ei ole kuigi heade tugevusomadustega (suhteliselt väike tugevus), ent on suure plastsusega.

Vanandamine (*ageing*) seisneb karastamisele järgnevas seisutamises toatemperatuuril mõned ööpäevad – tegemist on loomuliku vanandamisega või kõrgendatud temperatuuril kuni 1 ööpäev – tegemist on kunstliku vanandamisega. Vanandamise

käigus toimuvad üleküllastunud α -tardlahuses muutused – eraldub kõvafaas CuAl_2 , mille tulemusena sulam tugevneb.

Kõrgel temperatuuril toimub täielik CuAl_2 väljasadestumine, mille tulemuseks on pingete kadumine Al kristallivõrest ja sulami pehmenemine ning tugevuse vähenemine (Joonis 5.39) – tegemist on **ülevanandamisega**.



Joonis 5.39. Duralumiiniumi vanandamiskõverad

Vanandatud Al-Cu-sulameid kasutatakse ehituskonstruktsioonides, lennukiehituses jm. Vask vähendab nendes sulamites korrosioonikindlust, mistõttu lehtmaterjali plakeeritakse korrosioonikindluse tõstmiseks õhukese puhta alumiiniumikihiga.

Al-Mg-Si-sulameis moodustavad magneesium ja räni intermetalliidi Mg_2Si , mistõttu Mg ja Si õiges vahekorras sisaldavad alumiiniumisulamid on efektiivsemad termotöeldavad Al-sulamid. Al-Mg faasidiagramm on sarnane Al-Cu faasidiagrammiga, kusjuures Mg lahustuvus ulatub kuni 14,9 %-ni. Al-Mg-Si-sulamid on hea korrosioonikindlusega ja neid kasutatakse laialdaselt ehituses, transpordivahendite, transpordikonteinerite jms tootmisel.

Al-Zn-sulameist on mõningad uusimad sulamid, mille tõmbetugevus küündib või ületab kõrgtugevate konstruktsiooniteraste tugevust. Muidugi on plastsus samas väike ja ka nende töötlus on mõnevõrra keerulisem Al-Cu-sulamite töötlustest. Sellele vaatamata on Al-Zn-sulamid leidnud laialdast kasutamist lennukiehituses. Tagamaks termotöeldatud (karastatud ja vanandatud) Al-sulamite kasutusomadusi, ei ole nad kasutatavad temperatuuridel üle 175 °C.

Tabel 5.18. Deformeeritavate Al-sulamite tähistus (seeriad)

Põhiline legeriv element	Sulami seeria tähis
Alumiinium (vähemalt 99,0 % Al)	1XXX
Vask	2XXX
Mangaan	3XXX
Räni	4XXX
Magneesium	5XXX
Magneesium ja räni	6XXX
Tsink	7XXX
Muu element	8XXX

Tabel 5.19. Mõningate deformeeritavate Al-sulamite omadused

Sulami tähistus		Koostis	Termo- töötlus*	Tõmbe- tugevus R_m , N/mm ²	Kasutus
Tunnus- number	Margitähis				
1199	Al 99,99	99,99 % Al	O	45	Torustikud ja anumad toiduaine- ja keemia-tööstuses.
1080A	Al 99,8	99,8 % Al	O	75	
1200	Al 99,0	99,0 % Al	O	90	
			H14	120	Dekoratiivpaneelid, traat, pakendifoolium, köögi- ja teised majapidamistarbed
			H18	150	
2014	AlCu4Mg	Al+4,5 % Cu; 0,5 % Mg; 0,8 % Mn	T4	440	Lennukikonstruktsiooni raskkoormatud osad ja muu tehnika
2024	AlCu4Mg1	Al+4,5 % Cu; 1,5 % Mg; 0,6 % Mn	T6	480	
			T3	480	
3103	AlMn1	Al+1,75 % Mn	O	110	Pressitud õõnesprofiilid majapidamises, ehituses (katused, paneelid)
			H14	160	
			H18	210	
5051	AlMg2 (B)	Al+2 % Mg	O	180	Sügavtõmmatud tooted, paatide ja laevade konstruktsioonid
5119	AlMg5 (A)	Al+5 % Mg	H24	250	
			O	280	
			H24	335	
6060	AlMgSi	Al+0,5 % Mg; 0,5 % Si	T4	130	Transpordivahendite konstruktsioonidetailid
			T6	215	
7010	AlZn6MgCu	Al+6 % Zn; 2,5 % Mg; 1,75 % Cu;	T6	500	Lennukikonstruktsioonid
2091	AlCu2Li2	Al+2,2 % Li; 2,7 % Cu; 0,12 % Zr	T6	580	Lennukikonstruktsioonid

* O – lõõmutatud; H14 – poolkõva; H18 – täiskõva; H24 – kalestatud ja osaliselt lõõmutatud; T3 – karastatud, kalestatud ja loomulikult vanandatud; T4 – karastatud ja loomulikult vanandatud; T6 – karastatud ja kunstlikult vanandatud.

Al-Zn-sulamitel on Al-sulameist suurim tugevus. Need sulamid on raskemini töödeldavad ja nad on ka madalama korrosioonikindlusega. Kasutatakse põhiliselt lennukikonstruktsioonides.

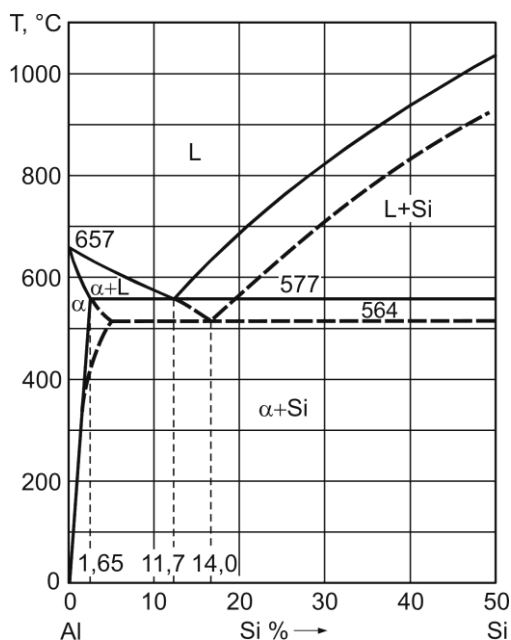
Nende termotöödeldavate sulamite grupi esindajad ja nende omadused on Tabelis 5.19.

Omaette grupi moodustavad **Al-Cu-Li-sulamid**, mis on leidnud laialdasemat kasutamist viimastel aastatel. Liitiumi väikesest tihedusest ($0,54 \text{ g/cm}^3$) tulenevalt on liitiumi sisaldavad alumiiniumisulamid väiksema tihedusega võrreldes teiste Al-sulamitega. Al-Cu-Li-sulamite (2...2,5 % Li) tugevus termotöödeldult on võrreldav Al-Cu- ja Al-Zn-sulamite tugevusega (vt Tabel 5.19). Kaalu vähenemine lennukikonstruktsioonides ($2,6 \text{ g/cm}^3$ ca $3,0 \text{ g/cm}^3$ vastu teiste kõrgtugevate Al-sulamite korral) annab märgatavat efekti.

Lisaks eespool esitatud deformeeritavatele sulamitele moodustab sulamite erigrupi alumiinium tinaga, mis on tuntud eelkõige laagrimaterjalina.

Valatavad alumiiniumisulamid

Alumiiniumi valusulamite tüüpilisteks esindajateks on **Al-Si-valusulamid – silumiinid** (*silumins, aluminium-silicon alloys*), mis ei moodusta ja millel ei ole koostises keemilisi ühendeid. Sulamites, alates ränisisaldusest 1,65 %, esineb eutektmuutus temperatuuril $577 \text{ }^\circ\text{C}$, mil moodustub eutektikum ränisisaldusel 11,7 % (Joonis 5.40). Tardlahusest ja ränist moodustunud eutektikum (α +Si) on plastne tardlahusest maatriksi tõttu, vaatamata selles paiknevale haprale ränile (erinevalt teistest Si sisaldavatest eutektikumidest). Eutektsulami hea vedelvoolavuse tõttu (Si suurendab ka puhta Al vedelvoolavust) kasutatakse sulameid valusulameina valatuna liivsavi- või metallvormi. Kasutatavamad Al-valusulamid sisaldavad 10...13 % Si, need on eutektkoostisele ligilähedased sulamid. Üldjuhul on eutektstruktuur jämeteraline, tehes sulami hapraks. Sulami struktuuri peenendamise kui ka üleeutektse sulami struktuuri asemel eeleutektse struktuuriga sulami saamiseks (nihutab eutektpunktile vastavat koostist) lisatakse vedelmetalli väikeses koguses (ca 0,01 %) naatriumi. Sellist töötlust nimetatakse **modifitseerimiseks** (*modification*), mille tulemusena saadakse peeneteraline struktuur üleeutektsulameile omaste habraste ränikristallidega. Modifitseerimine nihutab eutektpunkti ja alandab ka eutektmuutuse temperatuuri (punktiirjoon, Joonis 5.40). Alumiiniumivalusulamite tähistus on esitatud Tabelis 5.20, mõningate Al-Si-valusulamite omadused on aga Tabelis 5.21.



Joonis 5.40. Al-Si-faasidiagrammi Al-poolne osa (punktirjoon – modifitseeritud 0,01 % Na-ga)

Al-Cu-valusulamite (Tabel 5.21) põhiline eelis on hea kuumustugevus ning lõiketöödeldavus. Puuduseks on halvem valatavus ja halb korrosioonikindlus. Kasutatakse niisuguste detailide valmistamiseks, mis on ette nähtud tööks temperatuuril kuni 350 °C (nt sidurikarterid).

Al-Mg-valusulamid – magnaaliumid (*magnaliums*) – on väikese tiheduse, suure tugevuse ja plastsusega, hea keevitatavuse, lõiketöödeldavuse ning korrosioonikindlusega. Ent nad on halvemini valatavad, halva soojusjuhtivusega ja madala kuumustugevusega (lubatav töötemperatuur kuni 100 °C).

Tabel 5.20. Alumiiniumi valusulamite tähistus (seeriad)

Põhiline legeriv element	Sulami seeria tähis
Vask	21XXX
Räni ja magneesium	42XXX
Räni	44XXX
Magneesium	51XXX
Tsink ja magneesium	71XXX

Tabel 5.21. Mõningate alumiiniumi valusulamite omadused

Sulami tähistus		Koostis	Valu- viis	Tõmbe- tugevus R_m , N/mm ²	Kasutus
Tunnus- number	Margitähis				
21100	AlCu4Ti	Al+4 % Cu; 0,2 % Ti	LV KV	260 280	Hea kuumustugevusega valandid
42000	AlSi7Mg0,3	Al+7 % Si; 0,3 % Mg	LV KV	230 250	Suurepärase valusulamid (madal sulamistemperatuur, kitsas kristallisatsioon- nivahemik, suur tihedus)
44000	AlSi11	Al+11 % Si	LV KV	180 210	

* LV – liivvormvalu; KV – kokillvalu.

Alumiiniumisulamid muude lisanditega (eelkõige kuumustugevad alumiiniumisulamid) on mõeldud tööks temperatuuril kuni 350 °C. Kasutatakse näiteks lennuki-mootorite kolbide valmistamiseks.

Alumiiniumi valusulamite nagu ka vase valusulamite mehaanilised omadused olenevad suurel määral valuviisist ja pärastisest termotötlusest. Viimane on sageli mitmeastmeline (näiteks karastamine + loomulik vanandamine, karastamine + kunstlik vanandamine, astmeline karastamine + noolutamine).

Silumiinide valamisel rakendatav modifitseerimine peaaegu ei muuda sulami keemilist koostist, ent parandab oluliselt valandi mehaanilisi omadusi. Laialt kasutataval valusulamil 7 % Si on sel viisil võimalik (koos valamisjärgse termotötlusega) saavutada tõmbetugevus kuni 250 N/mm² ja kõvadus kuni 70...80 HB.

Alumiiniumi laagrisulameid (Al-Sn-Cu-, Al-Ni-, Al-Sb-Cu- jt sulamid) kasutatakse mono- ja bimetalsete valatud liugelaagrite ja valtsitud leht- ning ribamaterjalist stantsimise teel valmistatud laagriliudade tarvis. Võrreldes babiitidega (vt p 5.2.4.) on alumiiniumi laagrisulamid odavamad, kergemad, suurema tugevuse, parema soojusjuhtivuse ja korrosioonikindlusega ning seejuures ka tehnoloogilisemad. Puuduseks on suur joonpaisumistegur, mis on ligi kaks korda suurem kui terasel.

Alumiiniumisulamite tähistus

Alumiiniumi ja alumiiniumisulamite markeerimisel eurostandardite järgi kasutatakse kahte tähist:

- 1) margitähis (see määrab keemilise koostise), mis koosneb tähttähistest
EN-AW – deformeeritavate sulamite korral,
EN-AC – valusulamite korral,

millele järgnevad põhikomponendi – alumiiniumi keemiline sümbol Al ning põhilisandite keemiliste elementide sümboolid ning nende keskmist sisaldust (täisarv %) näitavad arvud,

näiteks EN-AW-AlCu4Mg1

EN-AC-ASi11;

2) tunnusnumbrit (materjali margi numbertähis):

a) deformeeritavad sulamid, näiteks EN-AW-2014 (vt Tabel 5.16);

b) valusulamid, näiteks EN-AC-44 000 (vt Tabel 5.18).

5.2.4. Muud metallid ja metallisulamid

Magneesium ja magneesiumisulamid

Magneesium on kergeim tööstuslikult kasutatavatest metallidest (tihedus on 2/3 alumiiniumi ja 1/4 terase tihedusest), teda iseloomustab madal sulamistemperatuur, suur kalduvus kalestumisele plastsel deformatsioonil, mistõttu selle tugevus ei sõltu ainult puhtusest (nagu titaanil), vaid ka mikrostruktuurist. Magneesiumi tõmbetugevus on 80 kuni 180 N/mm² (Tabel 5.22) vastavalt valatult (väiksem) või valtsitult (suurem).

Puhta magneesiumi põhiomadused on Tabelis 5.22.

Tabel 5.22. Puhta magneesiumi põhiomadused

Omadus	Tähis	Väärtus
Sulamistemperatuur	$T_s, ^\circ\text{C}$	649
Kristallivõre	–	H12
Tihedus	$\rho, \text{g/cm}^3$	1,74
Normaalelastsusmoodul	$E, \text{N/mm}^2$	$44 \cdot 10^3$
Tõmbetugevus	$R_m, \text{N/mm}^2$	80...180
Eritakistus 20 °C	$\rho, \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	$4,4 \cdot 10^{-8}$
Soojusjuhtivustegur	$\lambda, \text{W/m} \cdot \text{K}$	172
Joonpaisumistegur	$\alpha, 1/\text{K}$	$25 \cdot 10^{-6}$
Korrosioonikindlus	–	Väga hea

Õhus kuumutamisel süttib magneesium kergesti, mistõttu kasutatakse teda pürotehnikas ja keemiatööstuses. Korrosioonikindluse poolest jääb magneesium alla alumiiniumile, kuna magneesiumi pinnal tekivad oksiidikiht on põhimetallist tunduvalt tihedam ja kergesti pragunev. Magneesium on hästi lõiketöödeldav ja keevitav. Heksagonaalvõrest tingituna pole magneesium nii plastne ja ka nii hästi külmsurvetöödeldav kui alumiinium.

Tehnikas kasutatavad magneesiumisulamid on hästi kuumvormitavad ja valatavad, millest tulenevalt liigitatakse magneesiumisulamid deformeeritavaks ja valusulameiks.

Magneesiumisulameid legeeritakse alumiiniumiga (kuni 10 %), tsingiga (kuni 5 %), mangaaniga (kuni 2,5 %) ja tsirkooniumiga (kuni 1,5 %).

Magneesiumisulamite termotöötlusel on palju ühist alumiiniumisulamite termotööt- lusega. Neid võib homogeniseerida temperatuuril 400...420 °C 15...30 tundi pärast valamist likvatsiooni kõrvaldamiseks. Deformeeritud sulamid allutatakse rekrystal- liseerivale lõõmutamisele temperatuuril 350 °C tekstuuri ja kalestumise kõrval- damiseks. Paljusid sulameid, milles legeriva elemendi lahustuvus magneesiumis on olemas temperatuurist (Mg-Mn-, Mg-Al-, Mg-Zn-süsteemi sulamid), võib karastada ja vanandada; see mehhanism on sarnane Al-Cu-sulamites toimuvaga: kuumutamisel intermetalliidsed faasid lahustuvad magneesiumis. See seisund fikseeritakse karastamisega ning järgneval vanandamisel tekivad intermetalliidid uuesti üleküllas- tunud tardlahusest. Vastavalt sellele väheneb pärast karastamist tugevus ja suureneb plastsus; vanandamisel on vastupidi. Kuna sulam tugevneb vanandamisel suhteliselt vähe (20...30 %), siis tihti seda ei tehta, piirduakse ainult sulami karastamisega.

Magneesiumisulamite termotöötuse eripära võrreldes alumiiniumisulamitega on ka see, et on vajalik pikaajaline seisutus kuumutamisel enne karastamist (kuni 24 tundi) ja sama pikk vanandamisel (16...24 tundi). Karastatakse õhus, loomulikku vanan- damist/vananemist toatemperatuuril aga ei toimu.

Magneesiumi deformeeritavad sulamid

Magneesiumi deformeeritavad sulamid kuuluvad väikese tugevusega sulamite gruppi, kuid nad on hea plastsusega, keevitatavad ja korrosioonikindlad. Termotöödelduina ulatub nende tõmbetugevus 340 N/mm²-ni. Magneesiumisulameid kasutatakse suure eritugevuse tõttu lennukiehituses, auto rattavelgede materjalina jm. Neist valmista- takse kuumvaltsimise teel profiile, latte jms, sepiseid ja stantsiseid. Tänu magnee- siumisulamite heale aeglase neutronite neeldumisele ja inertsusele uraani suhtes kasutatakse neid aatomireaktorite radioaktiivsete elementide ümbriste materjalina.

Magneesiumi valusulamid

Magneesiumi valusulamid on hea vedeloolavusega, mis tagab valandite suure tiheduse ja korrosioonikindluse. Sulamid on kuumustugevad: nad võivad töötada pikka aega temperatuuril 250 °C, lühikest aega ka 350 °C juures. Valusulamite mehaanilised omadused olenevad suuresti sulami struktuurist: mida peeneteralisem on valand, seda paremad on omadused. Valandite struktuuri peenendamise eesmärgil modifitseeritakse vedelmetalli kriidi või magnesiidiga (kuni 1 mahuprotsent).

Magneesiumisulamite valamisel tuleb kasutada meetmeid metalli süttivuse vältimi- seks. Sulatus tehakse raudtiiglitest rübukihi all, metalli valamisel puistatakse sellele väävlipulbrit, mis moodustab väävelgaasi ja väldib metalli süttimist. Valandi oksü- deerimise vastu lisatakse vormisegu hulka alumiiniumi fluorisoolasid. Kvaliteetse metalli saamiseks ülekuumutatakse sulametalli tugevasti.

Tabel 5.23. Mõningate magneesiumisulamite koostis ja mehaanilised omadused

Sulami mark	Koostis	Olek	R_m , N/mm ²	A , %
Deformeeritavad				
MgMn2	Mg+2 % Mn;	Valtsitud	200	1,5
MgAl6Zn	Mg+6 % Al; 1 % Zn;	Sepistatud	280	6
MgMn5	Mg+5,5 % Mn; 0,5 % Zr	Sepistatud	300	12
Valusulamid				
MgAl8Zn1	Mg+8 % Al; 1 % Zn; 0,3 % Mn	Valatud	140	6
		Vanandatud	210	12
MgZn4	Mg+4 % Zn; 0,7 % Zr; 1 % Ce	Valatud	170	–
		Vanandatud	220	–

Tsink ja tsingisulamid

Tsink on heade tehnoloogiliste omadustega (madal sulamistemperatuur, head valuomadused jm) (Tabel 5.24), mis soodustavad nende kasutamist valusulameina, laagrisulameina, joodistena ja seal, kus on tähtis madal sulamistemperatuur.

Tabel 5.24. Puhta tsingi põhilised omadused

Omadus	Tähis	Väärtus
Sulamistemperatuur	T_s , °C	420
Kristallivõre	–	H12
Tihedus	ρ , g/cm ³	7,13
Normaalelastsusmoodul	E , N/mm ²	90·10 ³
Tõmbetugevus	R_m , N/mm ²	120...250
Eritakistus 20 °C	ρ , Ω ·mm ² /m	5,8 · 10 ⁻⁸
Soojusjuhtivustegur	λ , W/m·K	115
Joonpaisumistegur	α , 1/K · 10 ⁻⁶	40 · 10 ⁻⁶
Korrosioonikindlus	–	Hea

Puhast tsinki kasutatakse laialdaselt (enam kui 50 %) teraste antikorrosioonpinnetena (katuseplekk, veetorud), sest olles elektrilises kontaktis terasega, moodustab ta galvaanilise paari. Olles anoodiks, lahustub Zn veekeskkonnas, kaitstes sellega terast korrosiooni eest. Samuti kasutatakse tsinki survevalusulamite põhikomponendina tsingi madala sulamistemperatuuri ja hinna tõttu. Samas on puhas tsink pea sama tihedusega mis teras, väikese tugevusega ja väga habras. **Valusulameis** kasutatakse legerivaid elemente, mis suurendavad valusulamite tugevust ja sitkust, säilitades madala sulamistemperatuuri. Tavalisteks lisanditeks tsingi valusulameis on Al ja Cu. Kasutatavamate Zn-Al-sulamite Al-sisaldus on 5...8 %, mis annab suurepärase mõõtmete stabiilsuse, suurema tugevuse ja hea korrosioonikindlusega sulami. Tabelis 5.25 on mõningate Zn-sulamite koostis ja omadused.

Tabel 5.25. Mõningate tsingi valusulamite koostis ja omadused (survevalu)

Margitähis	Tunnus-number	Koostis	Tihedus ρ , g/cm ³	R_m , N/mm ²	A , %
ZnAl4	ZP3	Zn + 4 % Al	6,7	283	3...4
ZnAl4Cu1	ZP5	Zn + 4 % Al; 1 % Cu	6,6	328	5...6
ZnAl8Cu1	ZP8	Zn + 8 % Al; 1% Cu;	6,3	374	6...10
ZnAl11Cu1	ZP12	Zn + 11 % Al; 1 % Cu;	6,0	400	4...7
ZnAl27Cu2	ZP27	Zn + 27 % Al; 2 % Cu;	5,0	421	1...3

Titaan ja titaanisulamid

Titaan on looduses üks levinumaid elemente. Tema suhteline sisaldus maakooses 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 kasutatavaid (Cu, Pb, Zn, väärismetalle jt) leidub looduses titaaniga võrreldes oluliselt väiksemas koguses.

Kuigi titaan avastati juba 1791. aastal, saadi esimene keemiliselt puhas metall alles XX sajandil. Algul, 1920. aastatel valmistati ülipuhast titaani tema jodiidi TiI₄ termilise lagundamisega kuuma volframtraadi pinnal ja seda meetodit kasutatakse laboratooriumites siiani. Tööstusliku protsessi töötas välja 1940. a Saksamaal *Wilhelm Kroll* ja see seisnes titaani tetrakloriidi TiCl₄ taandamisega magneesiumiga temperatuuril 800 °C. Just seda termilist nn maagniumprotsessi kasutatakse titaani tootmisel praegu kõikides maades. Probleemid titaani taandamisel tema ühenditest on seotud nende äärmiselt suure keemilise inertsusega (termodünaamilise stabiilsusega), mistõttu on raske lõhkuda titaani ja temaga reageerinud elemendi (reeglina hapniku) keemilist sidet (vt p 5.2.1. Titaanimetallurgia).

Titaani peamised omadused on Tabelis 5.26.

Tabel 5.26. Puhta titaani põhilised omadused

Omadus	Tähis	Väärtus
Sulamistemperatuur	T_s , °C	1660
Kristallivõre	–	H12 kuni 880 °C (Ti _α) või K8 üle 880 °C (Ti _β)
Tihedus	ρ , g/cm ³	4,54
Normaalelastsusmoodul	E , N/mm ²	110·10 ³
Tõmbetugevus	R_m , N/mm ²	200...300
Eritakistus 20 °C	ρ , Ω·mm ² /m	0,42 · 10 ⁻⁸
Soojusjuhtivustegur	λ , W/m·K	16
Joonpaisumistegur	α , 1/K	8 · 10 ⁻⁶
Korrosioonikindlus	–	Suurepärane

Tabelist 5.26 näeme, et titaanil on suhteliselt väike tihedus (1,7 korda väiksem kui raual) ja madal elastsusmoodul (2 korda väiksem kui raual ja niklil). See asjaolu soodustab titaani roomavust nii normaal- kui ka kõrgetel temperatuuridel, samal ajal kui ta sulamistemperatuur on kõrgem raua ja nikli omast. Siit järeldus: titaanist tehtud detailide korral peab vajaliku jäikuse saamiseks suurendama ristlõiget ja massi.

Titaani tugevus ja kõvadus olenevad suurel määral ta puhtusest. Kõik lisandid, eriti lahustunud gaasid ja süsinik, suurendavad oluliselt tugevust ja kõvadust.

Toatemperatuuril tekib titaani pinnal väga tihe ja inertne passiveeriv TiO_2 kiht, mistõttu nii titaan kui ka selle sulamid ei korrodeeru atmosfääris, mage- ja merevees, peaaegu kõikides orgaanilistes ja 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 legeerivate elementidena titaanisulameis. Olenevalt legeerivate elementide mõjust titaani polümorfismile eristatakse ühefaasilisi α - ja β -struktuuriga ning kahefaasilisi ($\alpha+\beta$)-struktuuriga sulameid.

Titaanisulamite termotöötlus

Olenevalt titaanisulamite koostisest ja otstarbest kasutatakse nende korral analoogselt terastele lõõmutamist, karastamist, vanandamist ja termokeemilist töötlemist.

Lõõmutamisest kasutatakse eelkõige vaakumlõõmutust, vähendamaks vesinikku titaanisulameis. Titaanisulamites survetöötlemisel tekkinud sisepingete vähendamiseks kasutatakse nende mittetäielikku ehk poollõõmutust temperatuuril 550...650 °C.

Titaanisulamite **karastamisel** leiab aset martensiitmuutus. Martensiit (α') titaanisulameis on legeerivate elementide asendustüüpi üleküllastatud tardlahus heksagonaalse kristallivõrega α -titaanis. Legeerivate elementide suuremal sisaldusel tekivad teised martensiitfaasid, mis kutsuvad esile kõvaduse ja tugevuse vähenemise ning plastsuse suurenemise.

Titaanisulamite karastamisele järgneval **vanandamisel** temperatuuril 500...600 °C toimuvad muutused martensiitfaasis. Vananemisel titaanisulamid tugevnevad, mis on tingitud eelkõige dispersse faasi väljasadestamisest. Suurim tugevnemiseefekt saavutatakse β -sulamide korral (vt Tabel 5.27).

Nitriitimine. Titaanisulamite korral kasutatakse nende kulumiskindluse tõstmiseks nitriitimist lämmastiku keskkonnas temperatuuril 850...950 °C kestusega 30...60 h. Saadakse pinnakihi paksusega 0,1...0,2 mm kõvadus 750...900 HV.

Mis puutub titaanisulamite tehnoloogilistesse omadustesse, siis peab märkima nende halvemat lõiketöödeldavust võrreldes terastega, mis on tingitud titaani ligi 5 korda

madalamast soojusjuhtivusest; see omakorda põhjustab lõikamisel titaanisulamite kleepumist lõikeriista tööpinnale.

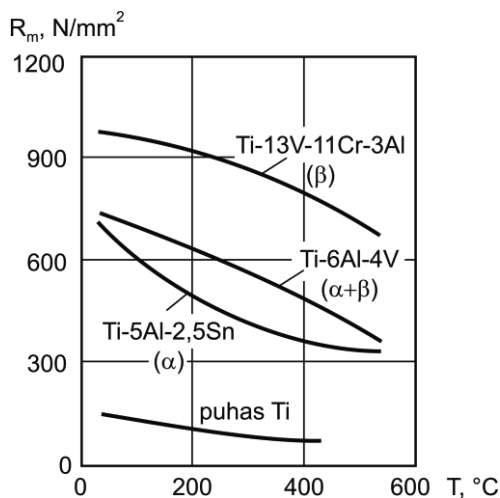
Puhas titaan ja titaanisulamid on plastsed ning kergesti deformeeritavad külmalt; kuumsurvetöötlemisel tuleb aga kasutada toorikute kuumutamisel ahjudes kaitsekeskkondasid (üldjuhul argoon). Samuti saab titaani keevitada ainult argooni keskkonnas. Õhus muutub kuum keevisõmblus hapraks hapniku ja lämmastiku lahustumise tõttu selles. Titaanisulamitest valandite saamine on seotud raskustega ja seda mitte ainult vajadusest teostada metalli sulatamine kaitsekeskkonnas (parem vaakumis), vaid ka sulametalli energilise reageerimise tõttu peaaegu kõikide vormimaterjalidega. Enam-vähem stabiilne on vedela titaani suhtes tsirkooniumoksiid ZrO_2 .

Titaanisulameid kasutatakse lennukiehituses nende suure eritugevuse tõttu ja seda ka kõrgendatud temperatuuridel (Joonis 5.41). Suur korrosioonikindlus teeb nad heaks materjaliks laevaehituses, toiduaine- ja keemiatööstuse seadmeis. Meditsiinis kasutatakse titaani mitmesuguste implantaatide valmistamiseks, sest peale titaani täielikku inertsust inimorganismis on titaan biosobiv lihaskudede suhtes ja kasvab nende sisse. Selles mõttes ületab titaan kõiki korrosioonikindlaid teraseid ja metalle (sh ka väärismetalle). Vaatamata sellele, et titaani omahind on veel ligikaudu 7...8 korda kõrgem kui terasel, on ta väga perspektiivikas metall.

Tabel 5.27. Mõningate titaanisulamite koostis ja mehaanilised omadused

Sulami mark	Koostis	Omadused*	
		$R_m, N/mm^2$	$A, \%$
<i>α-sulamid</i> TiAl5Sn2,5 TiCu2	Ti+5 % Al; 2,5 % Sn Ti+2 % Cu	750...1000 520...570	10 16...20
<i>$(\alpha+\beta)$-sulamid</i> TiAl6V4 TiAl6V6Sn2 TiAl4Mo4Sn2	Ti+5 % Al; 4 % V Ti+6 % Al; 6 % V; 2 % Sn Ti+4 % Al; 4 % Mo; 2 % Sn	1200 1000...1200 1050...1100	12 8...10 9
<i>β-sulamid</i> TiV13Cr11Al3	Ti+13 % V; 11 % Cr; 3 % Al	Kuni 1800**	8...10

* Omadused karastatult ja vanandatult; ** karastatult, vanandatult ja kalestatult.



Joonis 5.41. Erinevate titaanisulamite tugevus kõrgendatud temperatuuridel

Nikkel ja niklisulamid

Puhas nikkel on plastne hästitöödeldav ja korrosioonikindel metall, mille põhiomadused on esitatud Tabelis 5.28.

Tabel 5.28. Puhta nikli põhiomadused

Omadus	Tähis	Väärtus
Sulamistemperatuur	$T_s, ^\circ\text{C}$	1455
Kristallivõre	–	K12
Tihedus	$\rho, \text{g/cm}^3$	8,91
Normaalelastsusmoodul	$E, \text{N/mm}^2$	$210 \cdot 10^3$
Tõmbetugevus	$R_m, \text{N/mm}^2$	370...700
Eritakistus 20 °C	$\rho, \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	$9,5 \cdot 10^{-8}$
Soojusjuhtivustegur	$\lambda, \text{W/m} \cdot \text{K}$	60
Joonpaisumistegur	$\alpha, 1/\text{K}$	$13 \cdot 10^{-6}$
Korrosioonikindlus	–	Väga hea

Suur osa niklist (umbes 15 % kogu niklitoodangust) kasutatakse legeeriva elemendina terastes ja malmides: ehitusterastes (0,5...5 % Ni) ja kõrgtugevates terastes (0,5...20 % Ni); roostevabades austeniiterastes ja kuumustugevates terastes (6...20 % Ni) ja korrosioonikindlates legermalmides (kuni 25 %) (vt p 5.1.3). Niklit kasutatakse ka legeeriva elemendina mitterauasulamites ja ta on paljude supersulamite põhikomponent.

Puhas nikkel on suurepärase korrosioonikindlusega alustes, hapetes ja siit tulenevalt kasutatakse seda keemiatööstuse ja toiduainetööstuse seadmes. Hinna odavamise eesmärgil kasutatakse niklit sageli õhukese lehenä mittelegeerterasest pleki plakeerimisega. Niklit kasutatakse paljude materjalide elektrolüütipindena, aga ka aluskihina mittelegeerteraste kroovimisel.

Niklisulamid. Kuigi niklil on suurepärase korrosioonikindlus, on see veelgi parem vase, kroomi või molübdeeniga legeeritud niklisulamil. Parima korrosioonikindlusega on tuntud Ni-Cu-sulamitest monelmetall (*monel*), milles nikli ja vase vahekord on 2:1. Monelmetalli head omadused ilmnevad merevees. Lisaks korrosioonikindlusele iseloomustab monelmetalli ka hea tugevus ja sitkus, need säilivad laias temperatuurivahemikus: monelmetall ei muutu hapraks madalatel temperatuuridel ja tugevusomadused säilivad suhteliselt kõrgetel temperatuuridel. Karastamise ja järgneva vanandamise tulemusena on saavutatav tõmbetugevus kuni 1400 N/mm² ja voolepiir 1000 N/mm².

Ni-Cr-sulamid on tuntud eelkõige kuumuspüsivate sulamitega, mida suurest elektritakistusest tingituna kasutatakse kütteelementides. **Nikroomidena** (*nichromes*) tuntud sulamid sisaldavad 80...60 % Ni ja vastavalt 20...40 % Cr. Fe-Ni-sulamid (36 % Ni) tuntakse **invarina** (*invar*), millel on väga väike (nullilähedane) soojuspaisutegur ja kasutatakse seal, kus on oluline mõõtmete muutumatus olenevalt temperatuurist (näiteks elalonpikkusmõõdud, täppiseadmete detailid jms).

Ülejäänud nikli baasil sulamid on koostisega, mis tagavad head mehaanilised omadused väga kõrgetel temperatuuridel ja nad on tuntud supersulamitena. Neid vaadeldakse koos teiste analoogsete materjalidega järgmises osas.

Supersulamid ja rasksulavad metallid

Titaani ja titaanisulameid kasutatakse heade kõrgtemperatuursete omaduste tõttu temperatuuridel kuni 500...550 °C. Lennukimootorites, gaasiturbiinides, rakettides ja tuumareaktorites vajatakse sageli materjale, millel on suur tugevus, roomekindlus, väsimustugevus, oksüdatsiooni- ja korrosioonikindlus temperatuuridel 1100 °C ja enam. Selliste omadustega materjalideks on **supersulamid** (*superalloys*) – eelkõige nikli või koobalti baasil sulamid. Nii on Ni baasil sulamil suur tugevus toatemperatuuril (voolepiir kuni 1200 N/mm², tõmbetugevus kuni 1450 N/mm²). Kestvustugevuse poolest ületavad nad ka koobaltisulamite tugevusomadusi. Niklisulamid moodustavad ligi 50 % reaktiivmootorite kaalust. Samas on aga kõik supersulamid terasest raskemad. Supersulamid on tavaliselt rasktöödeldavad, mistõttu kasutatakse sageli elektrerosioon-, ultraheli- jt eritöötlemismeetodeid, väljasulatata-vate mudelitega valu, pulbermetallurgia tehnoloogiat. Sulamite koostise tõttu on need küllaltki kallid, mis määrab ka kasutusvaldkonnad.

Koobaltiga täiendavalt legeritud Ni-Cr-sulamid on tuntud **nimonikina** (*nimonic*), mida kasutatakse kuumustugevate sulamitena gaasiturbiinide ja muude kõrgtemperatuursetes keskkondades töötavate masinaosade materjalina. Ni-Cr-sulamid, mis on legeritud täiendavalt rauaga ja on tuntud **inkonellina** (*inconell*). Samasse gruppi kuuluvad ka lisaks rauale molübdeeniga legeritud Ni-Cr-sulamid – on tuntud **hastelloidina** (*hastelloy*).

Rasksulavate metallide (*refractory metals, high-melting point metals*) hulka kuuluvad kõrge sulamistemperatuuriga (raua omast kõrgemaga, s.o üle 1539 °C) metallid (W, Ta, Mo, Nb, V, Cr jt). Nende põhilised füüsilised omadused on Tabelis 5.29.

Tabel 5.29. Rasksulavate metallide põhilised füüsilised omadused

Omadus	Tähis	W	Ta	Mo	Nb	V	Cr
Sulamistemperatuur	$T_s, ^\circ\text{C}$	3410	2996	2610	2415	1900	1875
Kristallivõre	–	K8	K8	K8	K8	K8	K8
Tihedus	$\rho, \text{g/cm}^3$	19,27	10,5	10,22	8,55	6,12	7,16
Eritakistus 20 °C	$\rho, \Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m} \cdot 10^{-8}$	5,5	12	5,4	22	20	13
Joonpaisumistegur	$\alpha, 1/\text{K} \cdot 10^{-6}$	4,4	6,5	5,2	7,1	8,3	8,4
Soojusjuhtivustegur	$\lambda, \text{W/m} \cdot \text{K}$	130	54	145	53	31	69

Kõrge sulamistemperatuurit tõttu saadakse rasksulavaid metalle kas pulbermetallurgia või kaarsulatuse meetodil. Pulbermetallurgia meetodit kasutades paagutatakse metallipulber vesinikus või vaakumis, seejärel ekstrudeeritakse, valtsitakse või tõmmatakse. Teise meetodi korral kasutatakse eelnevalt paagutatud toorikut elektroodina kaarsulatamisel.

Rasksulavad metallid on põhilisteks legerivateks elementideks tööriistaterastes, parandades nende soojus- ja kulumiskindlust; Ni baasil supersulameis, soodustades jämeteralise struktuuri teket, tugevdades terapiire ning suurendades sellega roomekindlust sulamistemperatuuridele lähedastel temperatuuridel. Rasksulavate legerivate elementide mõju terastes ja supersulameis on näidatud Tabelis 5.30.

Tabel 5.30. Rasksulavate legerivate elementide mõju terastes ja supersulameis

Mõju	Cr	Mo	Nb	Ta	W	V
Maatriksi tugevnemine	X	X			X	
Terapiiride tugevnemine	X	X	X	X	X	X
Karbiidide moodustumine	X	X	X	X	X	X
Kaitsva oksiidikile teke	X					

Rasksulavate metallide ja sulamite üheks tähtsamaks omaduseks on kuumustugevus. Kuumustugevuse suurendamiseks legeeritakse rasksulavaid sulameid väikestes kogustes teiste rasksulavate metallidega (Ti, Zr, Hf). Kõik rasksulavad metallid ja sulamid kalduvad külmahaprusele, kusjuures vanaadiumi, niobiumi ja tantaali külmahapruslavi on kõrgemal toatemperatuurist (on takistuseks nende kasutamisel madalatel temperatuuridel); volframi, molübdeeni ja kroomi külmahapruslavi on aga allpool toatemperatuuri.

Rasksulavatest sulamitest on konstruktsioonimaterjalina kasutatavamad kuumustugevad volframi-, molübdeeni-, titaani- jt sulamid; tööriistamaterjalidena on enam kasutatavad karbiidide, nitriidide jt baasil pulbermetallurgia meetodil valmistatud **kermised** (*cermets*).

Eri grupi kõrgtemperatuursetest materjalidest moodustavad intermetalliidide baasil materjalid, mille omadused on metallide ja keraamika vahepealsed. Nad on kõvad, jäigad, roomekindlad, kuumuspüsivad ning heade kõrgtemperatuursete tugevusomadustega, mis sageli paranevad koos temperatuuri tõusuga. Põhiliseks materjalide saamise viisiks on pulbermetallurgia; reeglina on intermetalliidsed materjalid raskesti töödeldavad.

Samas tuleb silmas pidada, et supersulamid (Co- ja Ni-baasil) ja rasksulavad metallid (Nb, Mo, Ta, W) on kõik raskemad kui teras. Titaan on ainuke ühelt poolt rasksulav, teiselt poolt kergmetall, aga tema kasutus on limiteeritud.

Plii, tina ja nende sulamid

Plii ja tina

Plii ja tina kuuluvad pehmete metallide gruppi. Vaatamata plii suurele tihedusele, on see tehnometallidest madalaimate mehaaniliste omadustega; tina seejuures on madalaima sulamistemperatuuriga tehnometall.

Plii ja tina põhilised füüsilised omadused on toodud Tabelis 5.31.

Tabel 5.31. Plii ja tina põhilised omadused

Omadus	Tähis	Väärtus	
		Pb	Sn
Sulamistemperatuur	$T_s, ^\circ\text{C}$	327	232
Kristallivõre	–	K12	Kuni $13,2\ ^\circ\text{C}$ K12 (α -tina), üle selle tetragonaalvõre (β -tina)
Tihedus	$\rho, \text{g/cm}^3$	11,34	7,29
Eritakistus	$\rho, \Omega\text{-mm}^2/\text{m}$	$0,21 \cdot 10^{-8}$	$0,12 \cdot 10^{-8}$
Joonpaisumistegur	$\alpha, 1/\text{K}$	$29 \cdot 10^{-6}$	$23 \cdot 10^{-6}$
Soojusjuhtivustegur	$\lambda, \text{W/m} \cdot \text{K}$	35	65

Plii neelab hästi röntgen- ja radioaktiivkiirgust, summutab vibratsiooni ja heli, on väga plastne, märgub hästi teiste metallidega (katab kergesti teiste metallide pinnad), on korrosioonikindel väävelhappes, kus lahustuvad paljud roostevabad terased ja titaan. Pliid kasutatakse suurtes kogustes akumulaatorite, kuulide jpm valmistamisel.

Tina on asendamatu valgepleki tootmisel, millest valmistatakse konservikarpe. Võib öelda, et kogu konservitööstuse areng algas XIX sajandi algusest, millal avastati, et tinaga kaetud raudplekist karbid lubavad säilida toiduainetel väga kaua (on näiteid, et lihakonservid nendes pole riknenud viiekümne ja enama aasta jooksul). Samal otstarbel kasutatakse tina toidunõude, aparaatide ja torustike katmisel (plii selleks ei sobi, sest moodustab toksilisi aineid). Puhta tina kasutamine masinaosades on raskendatud seetõttu, et plastne valge α -tina on stabiilne kuni temperatuurini 13,2 °C, üle selle tekib habras hall β -tina. Faasimuutus $\alpha \leftrightarrow \beta$ tinas toob kaasa suured mahumuutused, mille tagajärjel tina laguneb pulbriks. Tina faasimuutusest tingitud iseeneslikku lagunemist nimetatakse **tinakatkuks** (*tin plague*).

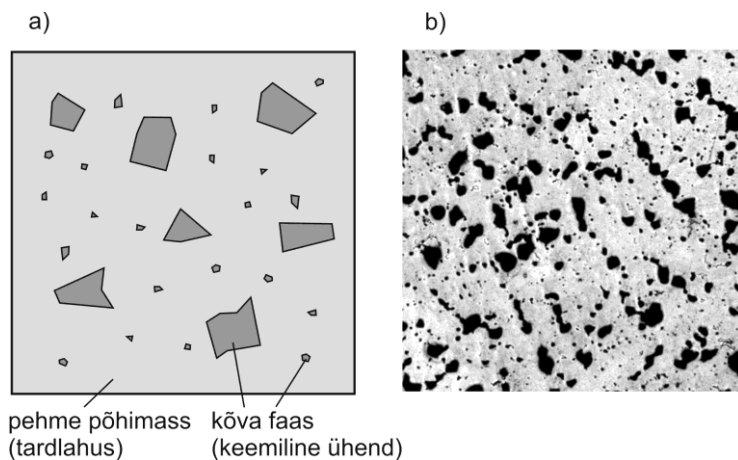
Plii- ja tinasulamid

Pb ja Sn baasil sulamid on eelkõige **antifriktsioonsulamid** (laagrisulamid) – tuntum on **babiit** (*babitt*) (inglise inseneri *J. Babbiti* nime järgi, kes selle leiutas). Nende kasutus põhineb liugelaagrite eelistel võrreldes veerelaagritega. Kuigi liugelaagrite hõõrdeegur on 2...3 korda suurem kui veerelaagritel, taluvad nad paremini lööke. See on tingitud suuremast kontaktpinnast võllikaela ja laagri vahel ning asjaolust, et nende vahel tekib töö ajal õlikiht, mis omakorda summutab löögid laagrisõlmes.

Liugelaagrimaterjalid peavad vastama järgmistele nõuetele:

- hõõrdeegur vastu terast peab olema võimalikult väike,
- mõlemad tööpinnad ei tohi palju kuluda,
- hea sissetöötamine,
- laagrisulam peab olema küllaldaselt heade mehaaniliste omadustega selleks, et taluda kontaktsurvet.

Kahte esimest nõuet saab täita, kui laagri ja võllikaela vahel on õlikiht. See omakorda on tagatud tingimusel, kui laagrimaterjali struktuur on heterogeenne ja koosneb pehmest maatriksist, milles on kõvad osakesed (faasid) – Joonis 5.42a. Sel juhul tekib laagri tööolukorras tema pinnal mikroreljeef: kõvad osakesed ulatuvad pehmest maatriksist välja ja soodustavad õlikihi säilimist võllikaela ja laagri vahel. Selleks kõige sobivama struktuuriga on babiidid.



Joonis 5.42. Laagrisulami põhimõttestruktuur (a) ja laagripronksi mikrostruktuur (b) valatult

Babiitidest kasutatakse Pb-Sn- (pliiabiiidid), Sn-Sb- (tinababiidid) ja Pb-Sn-Sb- (tinapliiabiiidid) süsteemi sulameid.

Sn baasil laagrimaterjalid on paremate antifriktsioonomadustega kui odavamad Pb baasil materjalid ja sobivad tööks rasketes tingimustes, sh automootoreis jm. Pb baasil sulameid kasutatakse madalate kontaktsurve ja väikeste kiiruste korral.

Tina defitsiitsuse tõttu kasutatakse laagrimaterjalidena ka tsingi- ja alumiiniumisulameid (Al-Sn-sulamid), kuid nende antifriktsioon- ja tehnoloogilised omadused võrreldes babiitidega on halvemad.

Teistest laagrisulamitest on perliitstruktuuriga hallmalm kõige odavam laagrimaterjal, mida kasutatakse aeglastel pööretel, sest tema hõõrdetegur on suhteliselt suur võrreldes pronksi ja babiidiga.

Pronksidel on likvatsiooni tõttu laagrimaterjalile vajalik mikrostruktuur. Tinapronksi maatriksiks on pehme tina tardlahus vases ($\alpha = \text{Cu}(\text{Sn})$) ning selles paiknevad kõvad ($\alpha + \beta$) eutektoidi osakesed. Pronkslaagreid saab kasutada raskemates tingimustes kui malmlaagreid (suuremad kiirused ja kontaktsurved), kuid nendel on suurem võllikaela kulumine kui babiitidel.

Väärismetallid

Väärismetallide (*noble metals, precious metals*) hulka kuuluvad hõbe, kuld, plaatina, pallaadium, iriidium, roodium jt. Mõningate väärismetallide põhilised füüsikalised omadused on esitatud Tabelis 5.32.

Tabel 5.32. Mõningate väärismetallide põhilised omadused

Omadus	Tähis	Väärtus		
		Ag	Au	Pt
Sulamistemperatuur	$T_s, ^\circ\text{C}$	962	1064	1769
Kristallivõre	–	K12	K12	K12
Tihedus	$\rho, \text{g/cm}^3$	10,5	19,3	21,4
Normaalelastsusmoodul	$E, \text{N/mm}^2$	$77 \cdot 10^6$	$74 \cdot 10^6$	$171 \cdot 10^6$
Tõmbetugevus	$R_m, \text{N/mm}^2$	125...220	125...290	125...240
Eritakistus 20 °C	$\rho, \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m} \cdot 10^{-8}$	1,5	2,2	9,8
Joonpaisumistegur	$\alpha, 1/\text{K} \cdot 10^{-6}$	19,3	14,2	9,1
Soojusjuhtivustegur	$\lambda, \text{W/m} \cdot \text{K}$	407	310	70

Väärismetallid kuuluvad kõik raskmetallide hulka ($\rho > 10 \text{ g/cm}^3$), nad on hea elektri- ja soojusjuhtivusega ning lõõmutatult väga plastsed. Väärismetallid on olnud läbi ajaloo tsivilisatsiooni hindamatuks väärtuseks.

Hõbeda ja **kulla** puhtus on määratud nende sisaldusega sulamis, väljendatuna tuhandikes osades. Näiteks puhas hõbe prooviga 1000 on 100 % Ag, puhas kuld prooviga 1000 on 100 % Au. Kangikuld on tavaliselt prooviga vähemalt 995 (99,5 % Au); kangihõbe prooviga 999 (99,9 % Ag), **mündihõbe** (*sterling silver*) aga prooviga 925 (92,5 % Ag; 7,5 % Cu). Sulamite väärismetallisalduse ühikuna kasutatakse ka karaati: 1 karaat = 1/24 sulami massist (12-karaadine kuld sisaldab 12 osa (50 %) Au ja 12 osa (50 %) lisandeid.

Juveelikulla värv varieerub helekollasest ja sügavkollasest kuni punase ja roheliseni; esineb ka valge kuld. Erinevad leegerivad lisandid mõjutavad kulla värvi erinevalt: Ag sisalduse suurenedes muutub värv kollasest rohekaskollase ja valgeni; Cu sisalduse suurenedes muutub värv punasemaks; Ni soodustab kulla valgenemist – nn **valge kuld** (*white gold*) sisaldab niklit, pallaadiumi või hõbedat.

Puhas **plaatina** sisaldab vähemalt 99,8 % Pt, kuid on lubatud ka kuni 5 % teisi plaatinagrupi metalle (pallaadium, roodium, iriidium jt).

Plaatina kasutatakse elektri- ja elektroonikaseadmes, volframi jootmisel, termpaarides koos roodiumiga (Pt-Rh termpaarid) jm.

Mõningate väärismetallisulamite omadused on Tabelis 5.33.

Tabel 5.33. Mõningate väärismetallisulamite omadusi ja kasutus

Nimetus	Koostis	Mehaanilised omadused		Kasutus
		R_m , N/mm ²	A , %	
Mündihõbe	AgCu10	250	40	Lauatarbed, mündimetall
Kullasulamid				
punane kuld	AuCu25 (18K) ¹⁾ AuCu50 (12K) ²⁾	–	–	Juveelitööstus
valge kuld	AuAg25(Cu)	–	–	Juveelitööstus, elektrotehnika: kontaktvõrud ja harjad
roheline kuld	AuNi10(Cu)	–	–	Plaatina asendaja juveelitööstuses
Plaatinasulam	Pt-Pd20	350...400	–	Puhta plaatina asendaja, mitte- lahustuvad anoodid merevees, klaasitööstus

¹⁾ 18-karaadine

²⁾ 12-karaadine

5.3. KORDAMISKÜSIMUSED

Raud ja rauasulamid

1. Kuidas liigitatakse rauasulamid? Liigituse alus?
2. Kuidas mõjutab süsinik terase tugevus- ja plastsusnäitajaid?
3. Milles seisneb väävli ja fosfori kahjulik mõju terastes?
4. Kuidas liigitatakse terased C-sisalduse järgi? Kasutusala järgi?
5. Millist metallurgilist tooret kasutatakse malmi tootmisel?
6. Millised on rästi ja kütuse ülesanded malmi tootmise pürometallurgilistes protsessides?
7. Milleks kasutatakse metallurgias taandajaid ehk redutseerijaid?
8. Millised on malmisulatuse põhiprotsessid kõrgahjus?
9. Milleks kasutatakse malmisulatuse olulisemat produkti – toormalmi?
10. Milline on praegu (21. sajandil) terase hulgitootmise põhimeetod?
11. Millised on keemiprotsessi ülesanded terase tootmisel?
12. Milleks viiakse terasesulatusel läbi desoksüdeerimist?
13. Milliseid eeliseid annab terasesulatus hapnikkonvertermeetodiga võrreldes elektrometallurgia?
14. Mis otstarbel terast rafineeritakse ja millised on rafineerimise põhimeetodid?
15. Millised on rahuliku, poolrahuliku ja keeva terase tootmise iseärasused?
16. Mis eeliseid annab terase tootmine otse maagist tänapäeval peamist kasutust leidnud tootmistsükli maak → toormalm → teras ees?
17. Mis eesmärkidel viiakse terastesse legeerivaid elemente?

18. Millised legerivad elemendid moodustavad püsikarbiide terastes?
19. Milliseid mikrolegerivaid elemente kasutatakse? Nende mõju terastes?
20. Kuidas on tavaliselt tagatud konstruktsiooniteraste lõppomadused? Termotöötlus?
21. Kuidas liigitatakse konstruktsiooniterased termotöötluse järgi?
22. Millised on põhinõuded ehituskonstruktsiooniterastele? Nende legerimise põhimõtted?
23. Mis on hea löiketöödeldavusega terased? Põhilised lisandid?
24. Mis on korrosioonikindel teras? Põhilised legerivad elemendid, nende sisaldus?
25. Kuidas liigitatakse korrosioonikindlaid teraseid struktuuri järgi?
26. Milline on tööriistateraste süsinikusisaldus? Kuidas liigitatakse neid soojuskindluse järgi?
27. Kuidas liigitatakse stantsiteraseid? Nende legerimise põhimõtted?
28. Mis on kiirlõiketeras? Põhilised legerivad elemendid?
29. Milles seisneb kiirlõiketeraste termotöötlus?
30. Kuidas markeeritakse mitteleger- ja legerkonstruktsiooniteraseid?
31. Kuidas liigitatakse malme süsiniku oleku järgi?
32. Valgemalmi saamine, struktuur ja omadused.
33. Kuidas liigitatakse grafiitmalme grafiidiosakeste kuju järgi? Nende tugevusomadused?
34. Mis on tempermalm? Kuidas seda saadakse?
35. Mis liiki malmide vahepealsed (struktuuri ja omaduste poolest) on kompak-grafiitmalmid?
36. Millal kasutatakse valuteraseid malmide asemel?

Mitteraudmetallid ja mitterauasulamid

1. Mis liiki omadused iseloomustavad mitteraudmetalle, mis pole saavutatavad raua korral?
2. Mis eesmärgil kasutatakse metallurgias flotatsiooni?
3. Milline on särdamise eesmärk vase pürometallurgias?
4. Millist toorvase rafineerimismeetodit kasutatakse kaablitööstuse tarvis väga puhta (vähese lisanditesisaldusega) vase tootmisel?
5. Miks kasutatakse alumiiniumi tootmisel pürometallurgilise meetodi asemel elektrometallurgiat?
6. Milliseid metallurgilisi meetodeid kasutatakse magneesiumi tootmisel?
7. Millist metallotermilist meetodit kasutatakse titaani tootmisel?

8. Millised on vase ja vasesulamite 3 omadust, mis soosivad nende laialdast kasutamist?
9. Kuidas liigitatakse vasesulameid, lähtudes koostisest? Toodete valmistusviisist?
10. Millised on vasesulamite margitähistuse põhimõtted? Mille poolest erineb deformeeritavate ja valusulamite tähistus?
11. Millised on vasetsingisulamite omadused, mis teevad nad eriti külgetõmbavaiks?
12. Millised sulamid on pronksid? Millised on nende põhilised grupid.
13. Mille poolest on vaseniklisulamid külgetõmbavad?
14. Mille poolest on erilised berülliumpronksid?
15. Nimetage alumiiniumi ja alumiiniumisulamite mõned omadused, mis teevad nad külgetõmbavaiks tehnomaterjalideks.
16. Milline on alumiiniumi elektrijuhtivus võrreldes vasega?
17. Millised võiksid olla piirangud alumiiniumi ja alumiiniumisulamite kasutamisel?
18. Kuidas liigitatakse alumiiniumisulamid toodete valmistusviisi järgi?
19. Kuidas liigitatakse alumiiniumisulamid termotöötuse järgi? Milles seisneb nende termotöötus?
20. Kuidas markeeritakse alumiiniumisulameid? Mille poolest erineb deformeeritavate ja valusulamite tähistus?
21. Milliste omaduste poolest on duralumiinium külgetõmbav?
22. Miks on populaarsemad valusulamid Al-Si-sulamid?
23. Millised on Mg-sulamite külgetõmbavad, aga ka kasutamist mittesoosivad omadused?
24. Millised on Mg-sulamist toodete põhilised valmistusviisid? Millised on nende tugevusomadused?
25. Milline on puhta tsingi põhiline kasutus? Tsingisulamite kasutus?
26. Millised on Zn-Al-sulamite külgetõmbavad omadused?
27. Millised on titaani ja titaanisulamite atraktiivsed omadused?
28. Milles seisneb titaanisulamite termotöötus? Saadavad omadused?
29. Millised on nikli põhilised kasutusala?
30. Mis on nikroom? Sulami kasutusala?
31. Milliseid sulameid nimetatakse supersulameiks? Millised on põhilised sulamigrupid?
32. Raskulavate metallide põhilised kasutusala? Loetlege raskulavatest metallidest kõrgeima sulamistemperatuuriga metalle.
33. Milliste meetoditega valmistatakse raskulavaist metallidest tooteid?
34. Millise nime all on tuntud Pb ja Sn baasil laagrisulamid? Nende eelised?
35. Milline on liugelaagrimaterjali põhimõtteline struktuur? Millise töötuse tulemusena (olekus) see tagatakse?
36. Iseloomustage põhilisi väärismetalle (tihedus, sulamistemperatuur).

6. MITTEMETALSED MATERJALID

<ul style="list-style-type: none">6.1. SISSEJUHATUS6.2. PLASTID<ul style="list-style-type: none">6.2.1. Plastide molekulstruktuur6.2.2. Plastide liigitus ja omadused<ul style="list-style-type: none">Plastide omadused ja kasutusTermoplastid. ReaktoplastidPlastide lisandidPlastide liigitus kasutusotstarbe järgiLiimid. Vahud. Värvid ja pinded6.2.3. Plastide ümbertöötus ja taaskasutus6.3. ELASTOMEERID<ul style="list-style-type: none">6.3.1. Naturaalkummi6.3.2. Sünteetilised elastomeerid6.4. KERAAMIKA<ul style="list-style-type: none">6.4.1. Keraamika koostis, struktuur ja omadused6.4.2. Keraamika liigitus<ul style="list-style-type: none">Ehituskeraamika	<ul style="list-style-type: none">TarbekeraamikaKlaas ja klaaskeraamikaTehnokeraamika6.4.3. Tehnokeraamika<ul style="list-style-type: none">KonstruksioonikeraamikaTööriistakeraamikaElektrokeraamika6.5. KOMPOSIITMATERJALID<ul style="list-style-type: none">6.5.1. Komposiitmaterjalide liigitus armatuuri järgi<ul style="list-style-type: none">Pulberarmeeritud komposiididKiudarmeeritud komposiididKihtarmeeritud komposiidid6.5.2. Komposiitmaterjalide liigitus maatriksi järgi<ul style="list-style-type: none">PolümeermaatrikskomposiididMetallmaatrikskomposiididKeraamikamaatrikskomposiididSüsinikmaatrikskomposiidid6.5.3. Komposiitmaterjalide kasutus6.6. KORDAMISKÜSIMUSED
---	--

6.1. SISSEJUHATUS

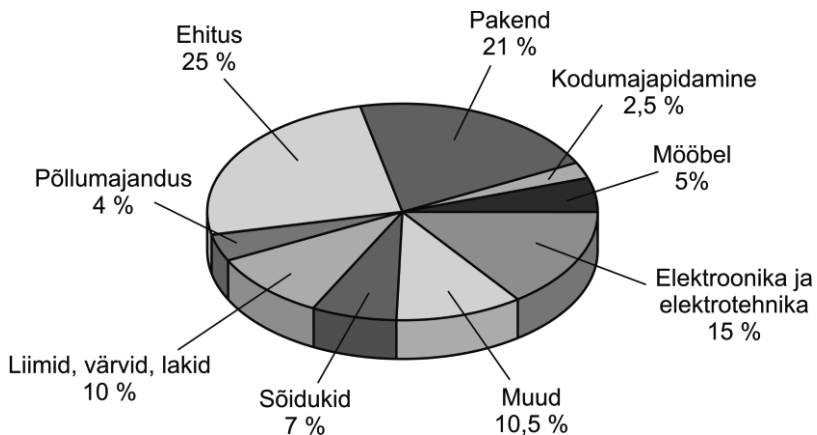
Mittemetsete materjalide – puidu, naha, luu ja kivi kasutamine märgib inimajaloo varasemat perioodi. Varaseimad ainelised leiud inimtegevusest ongi seotud mittemetalsest materjalist tööriistade ja relvade jäänustega. Puit on leidnud kasutamist läbi aastatuhandete peamise ehitus- ja konstruktsioonimaterjalina. Kivi on tänapäevani kasutatavaim ehitusmaterjal. Savikeraamika ja savitooted on jätkuvalt kasutusel konstruktsioonimaterjalina. Loodusliku päritoluga materjalid, nagu luu ja nahk, on olnud minevikus olulised konstruktsioonimaterjalid (kui neid kasutati peamiselt tööriistade, kütimisvahendite ja relvade valmistamiseks), tänapäeval on valdavaks saanud plastid.

Tänapäeval on mittemetalsed materjalid esindatud paljude erinevate plastide (polümeeride), elastomeeride, keraamika ja komposiitmaterjalidega. Enamik neist on tehis-

materjalid ning väga erinevate omadustega. Peab märkima, et mittemetalsete materjalide areng on väga kiire. Pidevalt arendatakse välja uusi materjale ja seepärast kõneldakse mõnikord „materjalirevolutsioonist“. Uued materjalid võimaldavad tootearendajatel luua uusi tooteid. Kuna tooteloome suunab ja kannustab kasutusele võtma järjest uusi, veelgi paremate omadustega materjale, võib ette näha mittemetalsete materjalide veelgi laienevat kasutuselevõttu traditsiooniliste metallide ja metallisulamite kõrval.

Plastid (*plastics*) on polümeerimaterjalid, mille põhikomponendiks on polümeerid ja mis on plastes olekus vormitavad. Definiitsiooni kohaselt on polümeerid kõrgmolekulaarsed ühendid, mille makromolekul koosneb madalmolekulaarsetest (väikese molaarmassiga) ühenditest. Enamikul juhtudel tähendab see, et makromolekul koosneb paljudest üksteisega kovalentselt seotud monomeerlülidest ehk meeridest, mis pärinevad väikestest molekulidest ehk monomeeridest. Plaste iseloomustab suhteliselt väike tihedus, madal hind, hea töödeldavus, märkimisväärne korrosiooni- ja kemikaalikiindlus ning võimalus saada erineva kuju, suuruse ja keerukusega tooteid. Keemiliselt koosnevad plastid peamiselt vesinikust, hapnikust, süsinikust ja lämmastikust.

Plastide ajalugu on võrreldes metallidega väga lühike. *Charles Goodyearil* õnnestus 1839. a ristsillata looduslik kautšuk vulkaniseeritud kummiks. Belgia keemik *Leo Baekeland* töötas 1907 a välja esimese sünteetilisel polümeeril – fenool-formaldehüüdi põhineva polümeerimaterjali „bakeliit“, mis leidis tööstuses kohe laialdast rakendust. Vähem kui saja aasta jooksul on plastid vallutanud maailma. Tänapäeval toodetakse näiteks mahuliselt USA-s ja EL-is enam plaste kui terast, alumiiniumi ja vaske kokku. Maailma plastitoodang aastas on kokku umbes 280 mln t (*Plastics Europe*, 2013). Plastide kasutus valdkonniti on näidatud Joonisel 6.1.

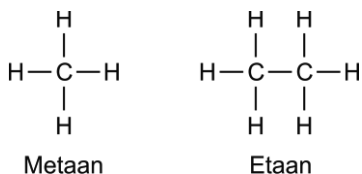


Joonis 6.1. Plastide kasutus valdkonniti

6.2. PLASTID

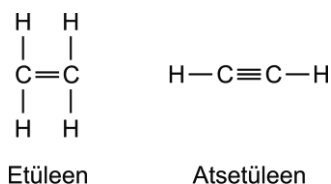
6.2.1. Plastide molekulstruktuur

Plastide omaduste mõistmiseks peab tundma nende siseehitust – molekulstruktuuri. Lihtsa näitena vaatleme süsivesinikku, kus süsinik ja vesinik on seotud valemi C_nH_{2n+2} kohaselt. Aatomid võivad omavahel sidemeid moodustades luua teoreetiliselt lõpmatu pikkusega molekule (vt Joonisel 6.2 toodud fragmenti).



Joonis 6.2. Etaani ja metaani molekulid. Süsiniku ja vesiniku vahel olevad jooned sümboliseerivad ühte jagatud (ühist) elektronpaari

Aatomite vahel mõjuvad kovalentsidemed – nad jagavad aatomi väliskihi kahte elektroni. Seetõttu on molekuli kooshoidev aatomsideme palju tugevam kui jõud, mis mõjuvad kõrvuti paiknevate molekulide vahel. Et molekuli saaks vaadelda kui monomeeri, peab tal olema vähemalt kaks vaba sidet, mille abil saaks neid molekule liita ahelateks.

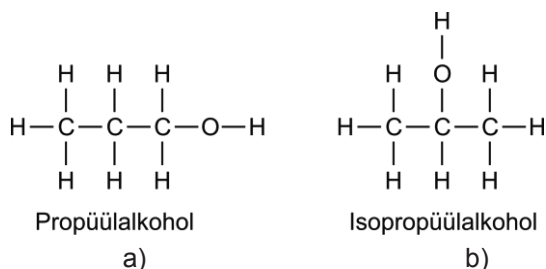


Joonis 6.3. Küllastamata etüleeni ja atsetüleeni süsinaatomite kaksik- ja kolmik-kovalentsidemed

Vabade sidemete arvu nimetatakse funktsionaalsuseks. Kui ahelasse ei saa lisaaatomeid liituda vabade sidemete puudumise tõttu, nimetatakse neid **küllastatud monomeerideks** (*saturated monomers*). Süsinik ja vesinik võivad moodustada molekule, kus süsiniku aatomeid hoiavad koos kaksik- või kolmik-kovalentsidemed. Etüleen ja atsetüleen on sellise süsteemi tüüpilised näited (Joonis 6.3). Kuna sellises süsteemis ei ole kõik võimalikud sidemed hõivatud vesiniku aatomiga, nimetatakse neid **küllastamata monomeerideks** (*unsaturated monomers*). Nende olulisus ilmneb polümeerisatsiooniprotsessil, kus väikeste molekulide liitumisel moodustuvad suuremad molekulid.

Mõlemal kirjeldatud juhul ümbritsevad iga süsiniku aatomit neli elektronpaari ning vesiniku aatomiga jagatakse ühte aatompääri. Vesiniku aatom võidakse vahetada välja mõne teise aatomi või ühendiga: kloori, fluori või näiteks benseeniga. Süsiniku asendajaks võib monomeeris olla hapnik, räni, väävel või lämmastik. Tingituna sellistest asendustest on võimalik suur hulk erinevaid orgaanilisi ühendeid.

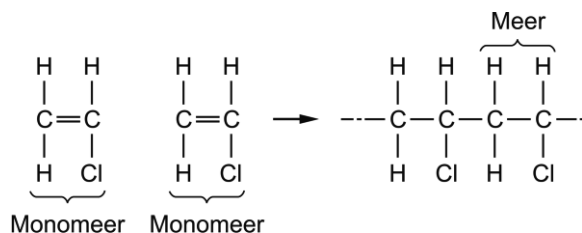
Võrdne arv aatomeid võib moodustada erineva molekulastruktuuriga ühendeid – **isomeere** (*isomers*). Erinevatel ühenditel on loomulikult erinevad omadused. Joonisel 6.4 on näitena esitatud propüül- ja isopropüülalkohol. Siin ilmneb analoogia kristalsete materjalide puhul tuntud polümorfismi nähtusega – sama keemilise koostisega ühendil on erineva kristallstruktuuri tõttu erinevad omadused.



Joonis 6.4. Kaheksa vesiniku aatomi, ühe hapniku aatomi ja kolme süsiniku aatomiga kaks erinevat isomeeri: a – propüülalkohol; b – isopropüülalkohol

Molekulide moodustumine polümeerisatsioonil

Polümeerisatsioon (*polymerization*) on sünteesireaktsioon, mille käigus ühendatakse monomeere keemiliste (kovaalsete) sidemete kaudu ahelateks – makromolekulideks. Polümeerisatsioon võib kulgeda polüliitumise- või polükondensatsiooni-mehhanismi järgi. Polümeerisatsioonil polüliitumise mehhanismi kohaselt (Joonis 6.5) moodustavad reaktsioonis osalevad monomeerid suure molekuli, milles korduvat ühikut nimetatakse **meeriks** (*mer*). Aktivaatorid või katalüsaatorid (näiteks bensoolperoksiid) on ahelakasvu käivitajateks.

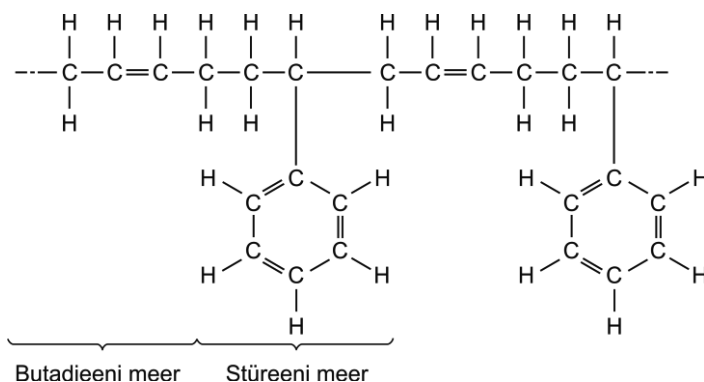


Joonis 6.5. Polümeerisatsioon polüliitumise teel – liituvad identsed etüleenid

Polümeeriahela pikkust reguleeritakse reaktsiooni tingimustega, spetsiaalsete ahela kasvu lõpetavate lisanditega või monomeeride suhtega. Keskmine meeride arv polümeeris, mida nimetatakse ka **polümerisatsiooniastmeks** (*degree of polymerization*), on enamiku plastide puhul vahemikus $10^4 \dots 10^5$. Paljud plasti omadused olenevad molekuli ahela pikkusest. Polümerisatsiooniastme suurenemisel suureneb sitkus, roometugevus, pehmenemistemperatuur, sulaplasti viskoossus ja töötlemise keerukus.

Kui polümeeriahel moodustatakse polüliitumisel kahest või enamast erisugusest (mono)meerist, nimetatakse sellist polümeeri **kopolümeeriks** (*copolymer*) (Joonis 6.6). Vastupidisel juhul on tegu homopolümeeriga, mis koosneb ühte tüüpi monomeeridest. Polükondensatsioonil liituvad tüüpiliselt erinevad monomeerid, mis ei ole kopolümeerid (nii saadakse näiteks polüamiid (PA) ja polüetüleentereftalaat (PET)). Sünteesi käigus on võimalik luua kolme erineva järjestusega monomeere:

1. Vahelduvjärjestusega – kaks erinevat monomeeri jagunevad regulaarselt kogu ahela ulatuses.
2. Juhusliku järjestusega – kaks erinevat monomeeri jagunevad juhuslikult kogu ahel ulatuses.
3. Plokkjärjestusega – vahelduvad pikemad homopolümeerid plokid.



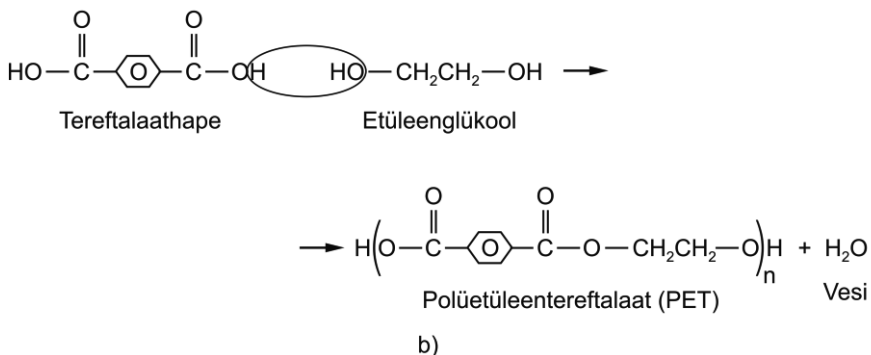
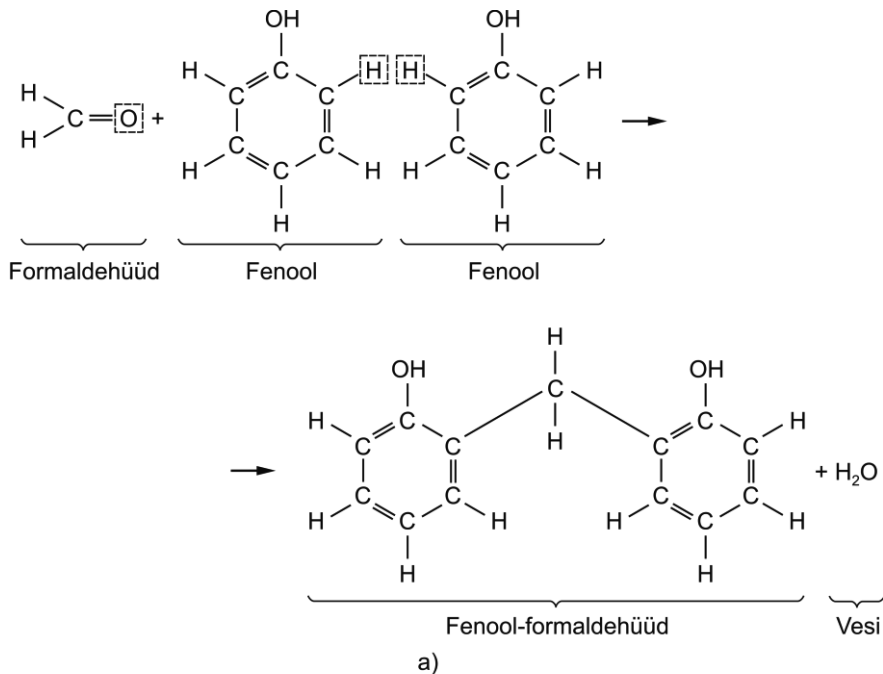
Joonis 6.6. Polümerisatsioon polüliitumise teel – butadieeni ja stüreeni kopolümerisatsioonil liituvad kaks erinevat meeri

Veelgi laienevad omaduste modifitseerimise võimalused kolme homopolümeeri kombineerimisel. Sellisel juhul on tegu **terpolümeeridega** (*terpolymers*).

Polükondensatsioonil (*polycondensation*) moodustuvad polümeerid, mille ahela korduvates ahelaelementides puuduvad mõningad aatomid, mis eksisteerisid selle ahela moodustanud monomeeridel. Sellises reaktsioonis eralduvad kõrvalproduktid, milleks on tüüpiliselt vesi või alkohol. Sünteesireaktsiooni toimumiseks on vaja sobivat temperatuuri, rõhku ja katalüsaatori olemasolu. Joonisel 6.7a on esitatud reakt-

sioon fenooli ja formaldehüüdi vahel, mille tulemusena moodustub fenoolformaldehüüd (eespool nimetatud esimene sünteetiline polümeer, tuntud kui bakeliit). Joonisel 6.7b on polüetüleentereftalaadi (PET) saamiseks kondensatsioonireaktsioon. Mõlemas reaktsioonis eraldub vesi. Kondensatsioonil saadud polümeeridel (nagu ka polüliitumise teel saadud polümeeridel) võib olla lineaarne ahel või kolmemõõtmeline hargnenud ahel.

Polüliitunud polümeerid erinevad polükondensatsioonipolümeeridest selle poolest, et nad on keemiliselt väga inertsed (tuleneb tugevatest C-C- ja C-H-sidemetest) ning seetõttu polüliitunud polümeerid ei ole biolagunevad.

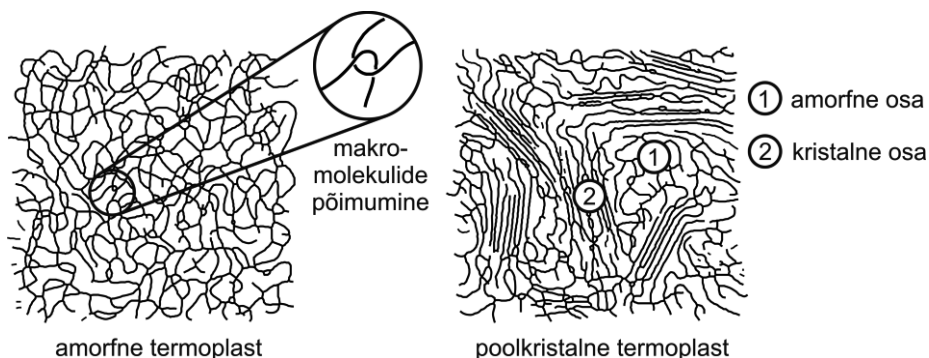


Joonis 6.7. Polümerisatsioon polükondensatsiooni teel: a – fenoolformaldehüüdi moodustumine; b – polüetüleentereftalaadi moodustumine

6.2.2. Plastide liigitus ja omadused

Plastid liigitatakse kahte suurde gruppi: termoplastseiks ja termoreaktiivseteks. Mõisted **termoplastne** (*thermoplastic*) ja **termoreaktiivne** (*thermosetting*) viitavad materjali käitumisele kõrgemal temperatuuril. Polüliitunud polümeere (või lineaarse ahelaga kondensatsioonireaktsiooni käigus moodustunud polümeere) võib vaadelda kui pikki süsinikuaatomite ahelaid, kus süsinikuaatom on kõrvalharuna sidunud veel vesiniku, fluori, kloori või benseeni aromaatses ahela. Kõik molekuliahelas olevad sidemed on kovalentsed. Naabermolekulid mõjutavad üksteist tunduvalt nõrgemate keemiliste ja füüsikaliste sidemetega. Nimetatud molekulides ja nende vahel mõjuvad jõud määravad suuresti nende materjalide mehaanilised ja füüsikalised omadused. Üldiselt on lineaarse ahelaga polümeerid sitked ja painduvad. Need plastid pehmenevad ja muutuvad vormitavaks temperatuuri tõusul, kuna molekuliahelate vahel mõjuvad jõud nõrgenevad ning suureneb ahelate liikuvus. Vormimise käigus on võimalik makromolekulide omavaheline ümberpaiknemine, ahelate (lahti)keerumine ja libisemine. Materjali jahtumisel muutub plast taas kõvemaks ja tugevamaks. Selliseid kuumutamise ja jahutamise tsükleid võib korrata palju kordi, ilma et plasti keemilises koostises ja struktuuris midagi oluliselt muutuks.

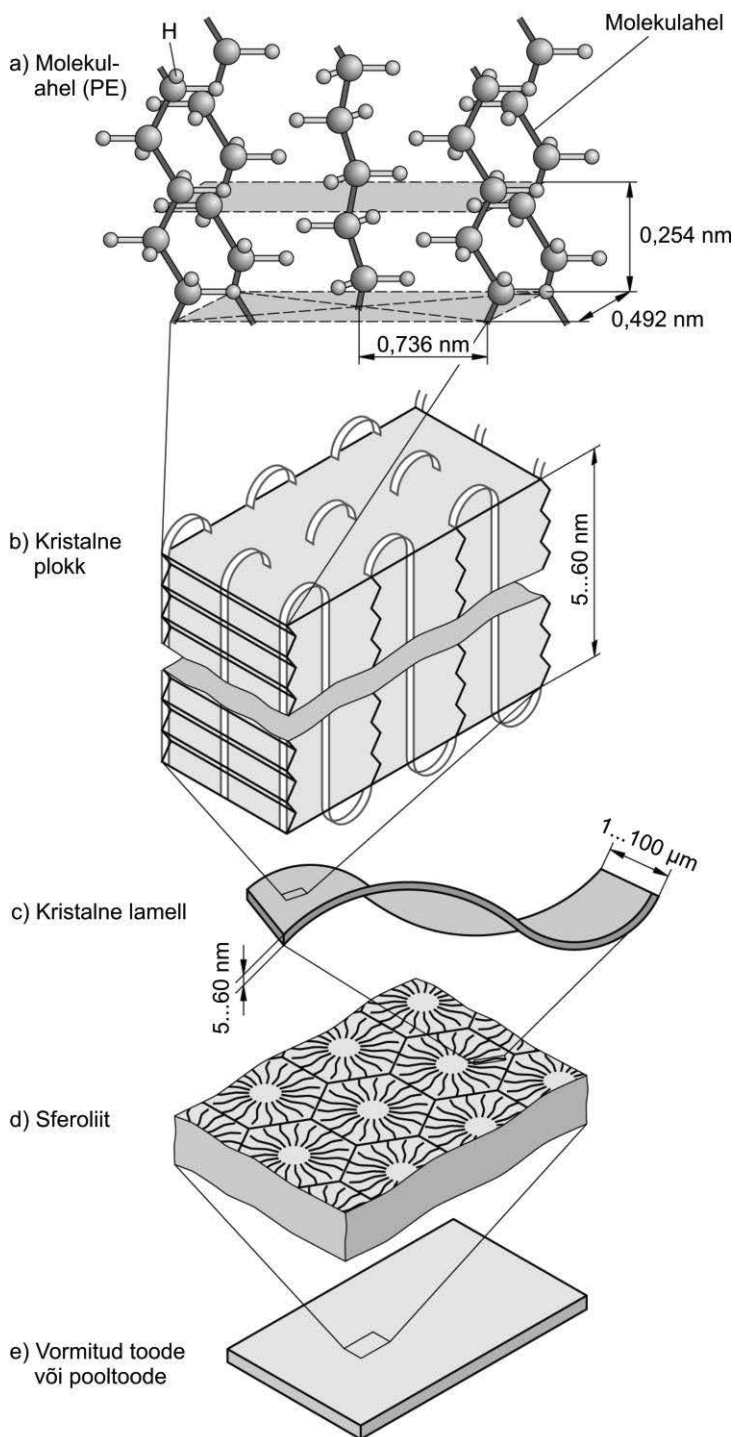
Termoplasti (*thermoplast*) koostises olevad makromolekulid on erineva pikkusega, seetõttu pole materjalil kindlat sulamistemperatuuri. Seevastu on täheldatav termoplastide pehmenemine teatavas temperatuurivahemikus. Ülalpool seda temperatuurivahemikku on materjal valatav (käitub vedelikusarnaselt) ning on näiteks tooteks vormitav survevalu ja ekstrusiooni abil. Allpool nimetatud temperatuurivahemikku taastub materjalis esialgne struktuur (materjal on tahke), kuid materjali käitumine (mehaanilised omadused) sarnaneb mõnevõrra kummiga. Mehaanilise jõu rakendamisel toimub materjalis üheaegselt nii elastne kui ka plastne deformatsioon. Materjali saab ulatuslikult plastselt deformeerida, mistõttu selles temperatuurivahemikus toimub tavaliselt termovormimine. Veelgi madalamal temperatuuril molekulidevahelised sidemed tugevnevad ja materjali jäikus kasvab – materjali käitumine hakkab sarnanema naha käitumisega. Mitmeid polümeere saab kasutada selles temperatuurivahemikus (näiteks polüetüleen). Veelgi madalamal temperatuuril, allpool nn **klaasistumistemperatuuri** (*glass transition temperature*) T_g säilitavad termoplastid oma amorfse struktuuri, kuid muutuvad kõvemaks, hapraks ja nende käitumine hakkab sarnanema rohkem klaasiga. Vastupidi – temperatuuri tõstmisel siirdub polümeer üleminekul klaasiolekust suurema viskoossusega kummiolekusse ning temperatuuri edasisel tõusul vedelasse sulaolekusse. Kuna üleminek on sujuv, ei ole klaasistumistemperatuuri erinevalt sulamistemperatuurist võimalik vaid visuaalse vaatluse alusel määrata, mistõttu kasutatakse enamasti **dünaamilis-mehaanilist analüüsi** (*dynamic mechanical analysis, DMA*) või termoanalüüsimeetodeid – näiteks **diferentsiaalset skaneerivat kalorimeetriat** (*differential scanning calorimetry, DSC*).



Joonis 6.8. Termoplastide struktuur: a – amorfne; b – osaliselt kristalne

Mitmed plastid võivad esineda osaliselt kristalsetena. Mõiste „kristalne“ all mõistetakse metallide ja keraamiliste materjalide puhul kolmemõõtmelist aatomite korrapärast paigutust. Polümeeride struktuuri kirjeldamine selle definitsiooni raamidesse ei mahu. Termoplastide kristalsus ulatub parimal juhul aine mahust vaid kuni 80 %, ülejäänud on amorfne mass, seetõttu kasutatakse terminit **kristalliinne** ehk **poolkristalne**. Kristalliinsed (ka kõik ülejäänud) polümeerid ei ole kolmemõõtmeliselt isotroopsed, mistõttu võivad nad sarnase koostise ja konfiguratsiooniga omada tahkunult erinevat struktuuri. **Kristalliinsusaste** oleneb molekulide ehitusest, polümerisatsioonist (makromolekulide pikkusest), jahtumiskiirusest ja jahtumisega samal ajal toimuvast mehaanilisest deformatsioonist (ahelaid venitades tekkivad soodsad tingimused korrapärase struktuuri tekkeks ja kristallumiseks). Polümeeri kristallumine võib toimuda kas lahusest või polümeersulandist. Väga oluliselt mõjutavad kristallumist ja tekkivaid struktuure kristallumistemperatuur ja molekulmass.

Kui polümeeri kristallumine toimub sulast olekust, moodustub reeglina kristalliinne segu, milles korrapärsed kristalsed alad vahelduvad amorfse massiga. Võivad tekkida sferoliit- või narmaskristallid (Joonis 6.8). Sulamassi viskoossuse suurenemisel on üldreeglina kristallumine takistatud, sest ahelate liikumine polümeermassis on raskendatud. On avastatud, et kristallide moodustumise kiirus on alati mõnevõrra suurem ühes teatud suunas, mida kokkuleppeliselt kutsutakse b-teljeks. Seega, kuna kristallumine on orienteeritud vaid ühe telje sihis, jätab see ahelale vabaduse kasvades pöörelda ümber b-telje. Sellest tulenevalt kasvavadki ahelaelementide korrapärsed ribad heeliksiitidesse keerduvana 360° ulatuses (kogu ruumi ulatuses) kristallisatsioonikeskmest (selleks võib olla struktuuridefekt, lisandiaatom vms), moodustades sfääriliseid kristalle ehk sferoliite (Joonis 6.9d). Iga sferoliiti moodustav iseseisev lamell (Joonis 6.9c) koosneb ahelaelementidest koosnevatest pakettidest (volditud b-telje sihis) (Joonis 6.9b), mis on omavahel eraldatud amorfse massiga (Joonis 6.9b). Amorfse massi moodustavad ahelaelementide korrapärselt kulgevad harud, kristalliidi – lamelli kristalne osa, koos amorfse tagasivolditud osaga.



Joonis 6.9. Poolkristalse termoplasti struktuur polüetüleeni (PE) näitel

Amorfse termoplasti deformeerimisel mehaanilise jõu mõjul toimub lineaarsete ja vähehargnenud molekulide ümberpaiknemine, libisemine ja lahtikeerdumine. Selliste plastide tugevdamine on võimalik, suurendades molekulidevaheliste sidemete tugevust ja vähendades makromolekulide liikuvust. Üldiselt kaasneb makromolekulide pikkuse suurenemisega tugevuse suurenemine nende väiksemat liikumisvabaduse tõttu. Kõrvutipaiknevate makromolekulide sidumine teineteisega kovalentse sidemega (näiteks kummi vulkaniseerimisel seotakse väävlaatomitega makromolekulid) raskendab või vähendab materjali deformeeritavust. Sekundaarsete sidemete tugevus on pöördvõrdeliselt seotud makromolekulide omavahelise kaugusega. Seetõttu võib näiteks plasti külmvormimisel täheldada kristalliinsuse suurenemist, polümeeriahelate sundorienteerimist paralleelselt ja tihedamalt ning sellega seoses materjali tugevuse, jäikuse ja tiheduse suurenemist. Polümeeriahelad, millel on suured kõrvalharud (kloor, benseen), võivad suurendada või vähendada polümeeri tugevust olenevalt sellest, kas domineerib nende molekulide libisemist takistav efekt või molekulahelate omavahelist kaugust suurendav mõju. Hargnenud makromolekuliga polümeeride tugevus on võrreldes lineaarse ahelaga sageli väiksem, sest hargnemisega kaasneb tiheduse ja makromolekulide pakketiheduse vähenemine. Loomulikult mõjutab plasti struktuur lisaks mehaanilistele omadustele ka teisi füüsikalisi (sh elektrilisi) ja keemilisi omadusi.

Neli levinuimat termoplasti on polüetüleen (PE), polüpropüleen (PP), polüvinüülkloriid (PVC) ja polüstüreen (PS). Nende kõrval leiavad laialdast kasutamist polüuretaan (PUR), polükarbonaat (PC), polüetüleen-tereftalaat (PET), polümetüülmetakrülaat (PMMA) ja akrüülnitriil-butadien-stüreen (ABS).

Reaktoplastid (*thermosets*) on polümeerid, mis ei sula kuumutamisel. Termoaktiivsus näitab tahke polümeeri vastupanu temperatuurile. Inglisekeelne nimetus *thermosetting polymers* ei ole päris täpne, kuna kõik reaktoplastid ei vaja ristsidumiseks temperatuuriga aktiveerimist. Reaktoplastide ahelad on tavaliselt tugevalt ristseotud, takistades omavahelisi nihkeid ning moodustades termiliselt väga stabiilse võrgustiku. **Ristsidumine** (*crosslinking*) saavutatakse prepolümeeride (polümeriseeritud, kuid ristsidumata materjal) järelreaktsioonides materjalide vormimisel. Järelreaktsiooni võib käivitada keemiline reaktsioon, temperatuur, rõhk või kiirgus. Olles kord kõvenenud olekus, ei ole võimalik temperatuuri tõstmisega neid sulasse olekusse viia – mehaanilised omadused alanevad alles järsult materjali termilisel lagunemisel, mil kovalentsidemed katkevad. Temperatuuri kasvades üle teatud piiri (üle 400...750 °C) reaktoplastid lagunevad ja karboniseeruvad (söestuvad) olenevalt kuumutamise keskkonnast.

Reaktoplastidele on iseloomulik termoplastidest suurem tugevus ja jäikus (suurem elastsusmoodul). Nende termopüsivus ja kujupüsivus on suuremad, võrreldes termoplastidega on neil väiksem sitkus.

Olulisemateks reaktoplastideks nii ajaloolises kui ka tööstusliku tootmise mõttes on ennekõike fenool-, amino-, epoksü- ja polüestervaigud ning termoreaktiivsed polüuretaanplastid (PUR).

Plastide jaotus termo- ja reaktoplastideks lähtub eeskätt nende termopüsivusest ning on seotud nende omaduste ja kasutatavusega erinevates rakendustes. Vähemtähtis ei ole see jaotus materjalide ja toodete valmistustehnoloogia seisukohalt. Termoplastide vormimine toimub klaasistumistemperatuurist kõrgemal temperatuuril (kummi- või sulaolekus). Pärast seda, kui kuum, pehmenenud olekus materjal on vormis kuju võtnud, tuleb vormi jahutada, et detail jahtuks ja säilitaks oma kuju pärast vormist eemaldamist. Korduvad kuumutus- ja jahutustsüklid piiravad vormi kasutusaega ning toote jahutamiseks kulunud aeg mõjutab protsessi tootlikkust.

Reaktoplastist toote valmistamisel puudub vajadus vormi jahutamiseks – see võib olla konstantsel temperatuuril. Selle meetodi puhul on piiravaks teguriks reaktoplasti kõvenemiseks kuluv aeg. Kuna materjali kõvenemine toimub reaktsiooni tulemusena ning sellel on vormist eemaldamiseks piisav tugevus ja jäikus ka kuumalt, on võimalik toode vormist eemaldada ilma vormi jahutamata.

Plastide omadused ja kasutus

Praeguseks on kasutusel sadu erinevaid plaste tuhandetelt eri tootjatelt. Pidevalt arendatakse uusi plaste, luuakse uusi kopolümeere või polüsegusid. Polüsegudeks nimetatakse füüsikalist segu kahest või enamast polümeerist. Eri tootjad kaubastavad sarnaste omadustega polümeere erinevate tootenimedega all. Seepärast on üldise ettekujutuse saamiseks kasulik tutvuda esmalt plastide üldiste omadustega ja seejärel üksikute plastiliikide spetsiifiliste omadustega.

Põhilisteks plastide omadusteks on:

1. Väike tihedus. Enamiku plastide tihedus on vahemikus 0,9...1,1 g/cm³. Võrdluseks – magneesiumi tihedus on ca 1,7 g/cm³ (väikseima tihedusega konstruktsioonimaterjalina kasutatav metall).
2. Hea korrosioonikindlus. Paljud plastid on vastupidavad tugevalt korrosiivses ja keemiliselt agressiivses keskkonnas (näiteks tugevad happed ja alused).
3. Suur elektritakistus. Plaste kasutatakse laialdaselt elektriisolatsioonimaterjalina.
4. Väike soojusjuhtivus. Halva soojusjuhtivuse tõttu kasutatakse plaste soojusisolatsioonimaterjalidena.

5. Optiliste omaduste lai gamma. Lisades plastile värvipigmente on võimalik nende värvust varieerida peaaegu piiramatult. Plastide hulgas leidub nii kirkaid (läbipaistvaid) kui ka valgust mitteläbilaskvaid (neelavaid) materjale.
6. Tehnoloogilisus ehk tootmisviiside paljusus. Sageli on plastist tooteid võimalik valmistada ühe tootmisoperatsiooni käigus. Toormaterjalile antakse lõpptootele iseloomulik kuju näiteks (surve)valu, ekstrusiooni või (vaakum)vormimise abil. Vormimine toimub suhteliselt madalal temperatuuril.
7. Hea pinnakvaliteet. Samaaegselt vormimisoperatsiooniga antakse toote pinnale vajalik pinnaviimistlus (saavutatakse soovitud pinnakaredus).
8. Suhteliselt madal hind. Toorme- ja töötlemiskulud on metallidega võrreldes madalamad. Plastide töötlemiseks vajalikud tööriistad on madalama hinna ja suurema tootlikkusega võrreldes metallide ja nende sulamite töötlemisel kasutatavatega.
9. Madal energiakulu. Võrreldes metallidega kulutatakse toote(massi)ühiku kohta vähem energiat.

Loetletud omadused leiavad kasutamist tehnika eri valdkondades. Konstruksiooni-materjalina on sageli plastide kasutust piiravaks teguriks materjali ebapiisav tugevus või jäikus (näiteks on alumiiniumdetail peaaegu 10 korda jäigem kui suurima elastsusmooduliga plastist valmistatud detail). Võrdluses metallide ja nende sulamitega jääb plastide tugevus märkimisväärselt alla metallisulamitele. Plastide tugevust ja jäikust on võimalik suurendada nende armeerimise abil. Sel juhul on tegu **komposiitmaterjalidega** (*composite materials*). Võrdluses metallidega on plastid väiksema tihedusega, üldreeglina ka väiksema eritugevuse ja erijäikusega. Plastidel on üldjuhul suhteliselt madal löögisitkus, erandiks on näiteks ABS, kõrgtihe polüetüleen ja polükarbonaat.

Plastide mõõtme- ja kujupüsivus on võrreldes metallidega madal ning soojuspaisumistegur palju suurem. Valdavalt on termoplastide kasutus piiratud toatemperatuuriga ning nende mehaanilised omadused (eeskätt tugevus ja jäikus) alanevad temperatuuri tõusul järsult. Reaktoplastide töötemperatuur võib olla kuni 250 °C. Nende mehaanilised omadused on üldiselt termoplastide vastavatest omadustest madalamad.

Kuigi plastide korrosioonikindlus on üldiselt hea, imavad mitmed polümeerid endasse vett, mistõttu nende omadused (nii mehaanilised, optilised, aga ka elektrilised) halvenevad aja jooksul (nad muutuvad hapraks, tuhmuvad, isolatsiooniomadused vähenevad jne). Mõnede plastide tugevus sõltub oluliselt niiskusesisaldusest – nii võib nende tugevus alaneda kuni 2 korda keskkonna suhtelise õhuniiskuse suurenemisel 0...100 %. Ainult süsinikust ja vesinikust koosnevad polümeerid, nagu polüetüleen (PE) ja polüstüreen (PS), imavad endasse väga vähesel hulgal niiskust. Plastid on tundlikud kiirguse toimele. Nii ultraviolettkiirgus (UV) kui ka radio-

aktiivne kiirgus põhjustavad plasti omaduste muutumist. Enamik elastomeere on tundlikud hapniku (O_2), eriti aga osooni (O_3) mõju suhtes. Degradatsiooniprotsessi käigus tungivad hapniku molekulid polümeersesse materjali, lõhkudes polümeersete molekulide sidemeid, tuues kaasa peaahele katkemise.

Plastist valmistatud detailide remont on keeruline ja sageli ei anna loodetud tulemust.

Tabelisse 6.1 on koondatud kasutatavamate plastide omadused.

Tulenevalt põhiliste plastide omadustest (Tabelist 6.1) sobivad plastid kõige paremini rakendustes, kus on vajalik mõõdukas tugevus, väike kaal, suur elektritakistus ja head soojusisolatsiooniomadused, laialdane värvivalik, tootmisprotsessi lihtsus. Seetõttu leiavad plastid massiliselt kasutust pakkematerjalina, erinevate mahutite, elektroonika- ja majapidamisseadmete korpuste jm valmistamiseks. Elektri juhtmete isolatsioonimaterjalides leiab kasutamist plastide suur elektritakistus. Plastide halb soojusjuhtivus leiab kasutust näiteks erinevates käepidemetes, millega on varustatud paljud köögitarvikud. Pehmed ja hõlpsasti kaju muutvad vahtplastid leiavad massiliselt kasutust pakkematerjalina (esemete asendi fikseerimiseks, löökide summutamiseks). Suurema jäikusega vahud leiavad kasutamist näiteks nn **sändviitmaterjalides** (*sandwich materials*). Siin annab alumiiniumlehtede vahele paigutatud vahtplast konstruktsioonile vajaliku paindejäikuse ja -tugevuse, piisava survetugevuse ja head isolatsiooniomadused (müra, soojus, heli). Plastide kasutusvaldkond on tõepoolest äärmiselt lai: polüamiidi (nailon) kasutatakse tehnomaterjalina hammasülekannetes, akrüüli optikas läätsede valmistamiseks, polükarbonaadi töökiivrites ja kildumatutes akendes.

Leidub hulgaliselt rakendusi, kus plasti valik on piisavalt põhjendatud vaid tänu ühele või kahele omadusele. Mõnikord soovitakse materjalilt omadusi, mida kaubanduslikult saadavad plastid ei suuda rahuldada. Sel juhul kasutatakse polümeermaatriksiga komposiite. Soovitud suunas saab tugevust suurendada plasti armeerimisega kiudude või kangaga. Komposiite käsitletakse täpsemalt edaspidi.

Tabel 6.1. Kasutatavamate termoplastide omadused

Polümeer	Nimetus	Kaubamärk	Tihedus, g/cm ³	Tõmbetugevus, N/mm ² ¹⁾	Löögisitkus, mJ/mm ²	Töötemperatuur, ²⁾ °C	Kasutuse näited
ABS	Akrülnitriil-butadienüstüreen	<i>Terluran, Novodur</i>	~ 1,05	35...56	80...m.p. ³⁾	85...100	Telefonikorpused, armatuurilauad, surfilauad
PA 6	Polüamiid 6	<i>Durethan, Maranyl, Resistane, Ultramid, Rilsan, Nylon</i>	1,14	43	25...m.p. ³⁾	80...100	Hammasrattad, liugelaagrid, kruvid, kaablid, ümbrised
PA 66	Polüamiid 66		1,14	57	3...20 ⁴⁾	80...100	
HDPE	Kõrgtihe polüeteen	<i>Hostalen, Lupolen, Vestolen A</i>	0,96	20... 30	m.p. ³⁾	80...100	Akukered, kütusekanistrid ja -paagid, prügikastid, torud, kaabliisolatsioon,kiled, pudelid
LDPE	Madaltihe polüeteen		0,92	8... 10	m.p. ³⁾	60...80	
PMMA	Polümetüülmetakrülaad	<i>Plexiglas, Degalan, Lucryl</i>	1,18	70... 76	18	70...100	Optilised läätсед, signaallambid, numbrilauad, valgustähed
POM	Polüoksümetüleen	<i>Delrin, Hostaform, Ultraform</i>	1,42	50... 70	100	95	Hammasrattad, liugelaagrid, ventiilikorpused, ümbrised, korpused
PP	Polüpropeen	<i>Hostalen PP, Novolen, Procom, Vestolen P</i>	0,91	21...37	m.p. ³⁾	100...110	Küttetorud, kodumasinatе osad, liitmikud, pumbakorpused
PS	Polüstüreen	<i>Styropor, Polystyrol, Vestyron</i>	1,05	40.. 65	13...20	55...85	Pakkematerjal, söögiriistad, filmikassetid, isoleerpaneelid
PTFE	Polütetrafluoretüleen	<i>Hostaflon, Teflon, Fluon</i>	2,20	15...35	m.p. ³⁾	280	Hooldusvabad liugepinnad, kolvirõngad, tihendid, pumbad
PVC-P	Polüvinüülkloriid, plastifitseeritud	<i>Hostalit, Vinoflex, Vestolit, Vinnolit, Solvic</i>	1,2...1,35	20... 29	24	60...80	Voolikud, tihendid, kaablikestad, torud, liitmikud, mahutid
PVC-U	Polüvinüülkloriid, plastifitseerimata		1,38	35... 60	m.p. ³⁾	< 60	
SAN	Kopolümeer: stüreen + akrülnitriil	<i>Luran, Vestyron, Lustran</i>	1,08	78	23... 25	85	Möötenäidikud, akukered, esilaternate kaitsekorpused
SB	Kopolümeer: stüreen + butadien	<i>Vestyron, Styrolux</i>	1,05	22... 50	40... m.p. ³⁾	55...75	Telerikorpused, pakkematerjal, riidepuud, jaotuskarbid

¹⁾ väärtused olenevad temperatuurist ja katse kiirusest

²⁾ pikaajaline (kestvusel on töötemperatuurile märgatav mõju)

³⁾ m.p – katsekeha ei purunenud

⁴⁾ kuiv...õhukuiv

Termoplastid

ABS (ABS). On terpolümeer, mis koosneb 25 % ulatuses akrüülnitriilist, 25 % ulatuses butadienikummist ja 50 % ulatuses stüreenist. ABS on üliheade mehaaniliste omadustega polümeer: tugev, sitke (ka madalal temperatuuril), elastne, suure kõvaduse ja löögisitkusega, hea mõõtmepüsivusega, suhteliselt kuumuskindel (kuid süttiv).

Heade mehaaniliste omaduste tõttu kasutatakse neid tihti paljude raskkoormatud ja vastupidavust nõudvate esemete valmistamiseks: näiteks mobiiltelefonide, fotoaparaatide, sülearvutite jms korpused, autode iluvõred, pörkerauad ja salongidetallid, külmkappide sisemused jms.

Akrüülpolümeerid (acrylics). Sellesse rühma kuuluvad polümetüülmetakrülaad PMMA, polüakrüülhape PAA, polümetakrüülhape PMAA, polüakrüülonitriil PAN jt. Kõige laiemalt levinud akrüülpolümeeriks on polümetüülmetakrülaad PMMA (tuntud kui pleksiklaas), mis on lineaarse ahelaga amorfne polümeer, millel on väga kõrge klaasistumistemperatuur (200...290 °C), hea löögisitkus ning suurepärase läbipaistvus (optiline läbitavus suurem kui 90 %, suurim plastide seas). PMMA on hea ilmastiku- ja UV-kindlusega. Purunemisel käitub ta aga olenemata temperatuurist hapralt, pind kriimustub kergesti. PMMA-d kasutatakse peamiselt läbipaistvust nõudvate toodete valmistamiseks, näiteks autode (taga)tuled, mõõteriistade aknad, kaitseklaasid, optikasedmete läätsed, prilliklaasid.

Nitraattselluloosid (nitrocelluloses). Tselluloosnitraati jt tselluloosi derivaate kasutati alates 1934 a fotofilmi tootmiseks, 80-ndatel asendati tselluloosatsetaadiga (CA). Tänapäeval kasutatakse tselluloosatsetaati tööstuses peamiselt kiudude valmistamisel, millest toodetakse sigaretilfilitreid, kangaste (näiteks *Ryon*, mis on puuvillast kangast vähem kortsuv ning määrduv), viltpliiatsite otsikute valmistamisel. Plastina on see saadaval eri värvitoonides ning on heade elektriisoleerimomadustega, kergvormitav, samas suure niiskuseimavusega. Kasutatakse ka tselluloosatsetaat-butüraati (CAB), mis on CA-st suurema löögisitkusega. Sellest valmistatakse nugade käepidemeid, lauatenise palle jms. CAB-st toodetakse ka õhukest kilet (tuntud kui tsellofaan), mida kasutatakse kommipaberina jms.

Fluoroplastid (fluoroplastics). Fluoroplastide mõningad omadused on polümeeride seas äärmuslikud ja unikaalsed: neil on väga suur termopüsivus (taluvad temperatuure kuni 260 °C), suur jäikus ja elastsus kõrgetel temperatuuridel, keemiline inertsus (lahustumatud kõigis lahustites), väga väike veeimavus, hea vastupidavus osoonile ja UV-kiirgusele, väga väikesed dielektrilised kaod ja väga suur elektriline takistus, väga väike hõõrdetegur, samas väga halb töödeldavus (tulenevalt kõrgest sulamistemperatuurist ja viskoossusest ei saa neid „tavaliste“ ekstrusiooni meetoditega vormida – vormitakse sageli sarnaselt keraamiliste materjalidega (pressitakse pulbrist

detailid ning seejärel kuumutatakse). Tuntuim selle rühma esindaja on polütetrafluoroetüleen PTFE, tuntud kaubandusliku nimetuse *teflon* all – moodustab 85 % kasutatavatest fluoroplastidest. Kasutatakse väikest hõõrdetegurit ja kulumiskindlust nõudvates sõlmedes (määrdevabad laagrid, liugpinnad, puksid, hammasrattad), määrdeainetes lisandina, hermeetikutes, hõõret vähendavates värvides ja pinnetes (näiteks *teflon*pindid pannidel ja teistel köögitarvikutel).

Polüamiidid (*polyamides*) **PA**. Polüamiide tuntakse ennekõike nailonina. Nad on elastsed, sitked, tugevad (suur tõmbetugevus ja väsimuspiir), väikese hõõrdeteguri, hea töödeldavuse, kulumiskindluse ja keemilise vastupidavusega. Üldjuhul on nad tundlikud hüdrolüüsile ja suure veemavusega, mistõttu nende kasutamiseks väli-tingimustes tuleb neid modifitseerida stabilisaatoritega. PA-plastidest valmistatakse kergkoormatud hammasrattaid, võlle, laagreid (kasutatakse ennekõike toiduaine- ja tekstiilitööstuses), liugepindasid jms. Polüamiidkiu omadused võimaldavad seda kasutada erinevates valdkondades, näiteks hamba-, põranda- jt harjade ja pintslite harjaste materjalina, autorehvide kiudarmatuurina, köie, nõõri ja lindina (autode turvavööd), tamiilina (sealhulgas pillikeeled, näiteks kitarrikeeled), vaipade ning erinevate tekstiiltoodete valmistamiseks. Polüamiidide hulka kuulub ka aromaatsed ahelaga polüamiid ehk aramiid, mille tuntuimaks esindajaks on *kevlar*, mille erakordsed omadused avalduvad üliheades tugevusomadustes, näiteks võrdsete mõõtmetega *kevlar*- ja teraskiud omavad sarnaseid tugevusomadusi (tõmbetugevus kuni 3600 N/mm²).

Polükarbonaadid (*polycarbonates*) **PC**. Polükarbonaadplaste iseloomustab kõrge sulamistemperatuur ($T_g = 145\text{ °C}$), väike tihedus ($\rho = 1,22\text{ g/cm}^3$), suur läbipaistvus (90 %), väike kahanemine (0,5 %), hea tõmbetugevus (kuni 75 N/mm²), erakordselt suur löögisiskus. Kasutatakse näiteks CD- ja DVD-plaatide, läbipaistvate paneelide (ootepaviljonid, kasvuhooned, aknad, traktorite kabiinid jms), kontoritehnika korpuste, valgustikuplite, pudelite, lülitikorpuste, kaitsekiivrite jms valmistamiseks.

Polüestrid (*polyesters*). Polüestrite rühma kuulub nii termoplastide kui ka reaktoplastide esindajaid olenevalt sellest, kas makromolekulid on ristsillatud või mitte. Üldiselt on estrid polümeerid, mille ahel sisaldab estrite funktsionaalset rühma. Üldiselt viitab nimetus termoplastsete polüestrite korral polüetüleen-tereftalaadide (PET). **PET** on väga heade tehnoloogiliste omadustega: seda saab vormida survevalu, puhumisvormimist või ekstrusiooni kasutades. Tulenevalt headest barjääromadustest ja suhteliselt suurest löögisikusest kasutatakse PET-i pakkematerjalina (95 % karboniseeritud karastusjookide taarast on valmistatud PET-ist). PET-kiust toodetud kangad on kortsumis- ja kulumiskindlad, vähevenivad ning tulenevalt sobivatest pinnaomadustest vähemäärduvad. PET-kiud on võrreldes nailonkiududega jäigemad, mistõttu ei valmistata kangaid reeglina puhtalt polüesterkiust, vaid kombineeritakse puuvillaga. PET-kiust on sageli valmistatud autode istmekatted, turvavööd, koorma-

rihmad, autorehvides armatuur. PET-kiust valmistatud matti nimetatakse vatiiniks ja seda kasutatakse tekkides, patjades ja talveriietes täidisena.

Polüetüleenid (*polyethylens*) **PE**. Polüetüleenid on kõige laiemalt levinud ja kasutatud polümeeride rühm maailmas, moodustades umbes 30 % maailmas kasutatavatest plastidest. Polüetüleenide ulatuslik kasutamine on tingitud nende mitmekülgsustest omadustest, kuid ennekõike madalast hinnast. Polüetüleene jagatakse lähtuvalt nende tihedusest ja molaarmassist: väga väikese tihedusega (VLDPE), väikese tihedusega (LDPE), keskmise tihedusega (MDPE), suure tihedusega (HDPE), suure molaarmassiga (HMWPE), ülisuure molaarmassiga (UHMWPE). Üldiselt on polüetüleenid suure sitkuse, hea keemilise stabiilsuse (vastupanu hapetele, leelistele ja sooladele), suure elektrilise takistusega, kuid väikeste tugevusnäitajatega. PE on kergesti vormitav (peaaegu kõik plastitöötlustehnoloogiad), keevitav, ümbertöeldav, sobiv väikese hõõrdeteguriga hõõrdepaaris teiste plastide, metallide ja keraamikaga. PE on õhukese lehe või kilena üldjuhul läbipaistev. PE puudusteks on tundlikkus UV-kiirguse suhtes, vähene tugevus kõrgematel temperatuuridel ning süttivus.

LDPE on tugevasti hargnev (ligikaudu 60 hargnevuspunkti 1000 süsinikuaatomi kohta). Väikese tihedusega polüetüleenid on väga elastsed, sitked ning läbipaistvad, mistõttu kasutatakse neid peamiselt kilede valmistamiseks, mis leiavad kasutust toiduainetööstuses (leivakotid, prügikotid, toidukiled jms), põllumajanduses (kasvuhoonekile, kattekile, kaitsekile, barjäärkile tiikide ja kraavide põhjas jms), ehituses (kattekile, pakkekile).

HDPE on väga vähe hargnev (omab vähem kui 7 hargnemispunkti 1000 süsinikuaatomi kohta), mistõttu saavad ahelad paikneda üksteisele väga lähedal ning moodustada kristalliide (sarnaselt teistele PE liikidele). Tulenevalt suurest tihedusest on suure tihedusega polüetüleenil head barjääromadused ning seda kasutatakse seetõttu veetorustike (enamik EL-i piires paigaldatavatest veetorudest on valmistatud HDPE-st) ning paljude õhukeseseinaliste toodete valmistamiseks (pudelid, joogitopsid, pudelikorgid, toidupakendid).

UHMWPE molaarmass on võrreldes teiste polüetüleenidega rohkem kui kümme korda suurem, tihedus aga sarnane keskmise tihedusega polüetüleeniga (vahemikus 0,92...0,94 g/cm³). UHMWPE-l on eeskujulik kulumiskindlus ning löögitugevus võrreldes teiste polüetüleenidega ja väga väike hõõrdetegur, mistõttu kasutatakse seda materjali tihti erinevates mehaanilistes sõlmedes, mille määrimine ei ole sanitaarsetel põhjustel võimalik (näiteks toiduainetööstuses kasutatavad laagrid, puksid, liugurid, hammasülekanded jms). Väga heade mehaaniliste omaduste tõttu kasutatakse UHMWPE-d erinevalt eespool kirjeldatud polüetüleeniliikidest oluliselt paremaid mehaanilisi omadusi nõudvates rakendustes.

Kuna suure molaarmassiga polümeerid ei voola sulasolekus enam nii nagu tavalised termoplastid, ei saa neid vormida tavapäraste meetoditega (näiteks ekstrudeerides, valades vms). See muudab neist toodete valmistamise mõnevõrra kallimaks.

Polüpropüleen (*polypropylene*) **PP**. Polüpropüleen on tarbeplastidest kõige väiksema tihedusega ($0,9 \text{ g/cm}^3$). Nad on polüetüleeniga võrreldes kõvemad, jäigemad, suurema kuumuskindlusega. Nende eeliseks on samuti suhteline odavus, puuduseks tundlikkus UV-kiirgusele. Sellest tulenevalt modifitseeritakse üldjuhul polüpropüleeni erinevate antioksidantide, UV-absorbentide jt degradatsiooni vähendavate lisanditega. Polüpropüleeni kasutatakse erinevates valdkondades nii kiuna (valmistatakse tekstiili, vaipkatteid, nõõri jms) kui ka valutoodete valmistamiseks. Polüpropüleenkõisi kasutatakse laialdaselt merenduses, kuna nad on väga sitked, kerged ning uppumatud. Tulenevalt suurest väsimustugevusest ja sitkusest kasutatakse PP toodete valmistamiseks, mis nõuavad hingedel avanemist (näiteks medikamentide, maiustuste vms purgid). PP-st valmistatakse sageli toiduainetööstuses kasutatavaid pakendeid (pudelikorgid, joogikõrred, mahutid, karbid, kastid jms), autotööstuse detaile (mootorikatted, põhjakatted, ühendusmuhvid, korpused, käepidemed, kinnitusklambrid, nupud jne), majapidamistarbeid (pesumasinaosad, liitmikud, elektroonikaseadmete korpused, DVD karbid, mänguasjad, mööblidetailid, karbid ja anumad toidu säilitamiseks).

Polüstüreen (*polystyrene*) **PS**. Polüstüreen on hea mõõtmestabiilsusega, kergesti töödeldav ja väga odav polümeer, mistõttu on PS tarbeplastina väga laialt levinud, olles toodangu mahult PE, PP ja PVC järel neljandal kohal maailmas. Lisaks iseloomustab polüstüreeni suur kõvadus, haprus, hea läbipaistvus, väike veemavus, plastidest parimad dielektrilised omadused, väga head soojusisolatsiooniomadused. Sageli kasutatakse PS-i jäikust nõudvate pakendite valmistamiseks. Levinud on PS-i baasil vahtplastid (EPS), mida kasutatakse laialdaselt hoonete ja torustike soojusisolatsioonina.

Suure löögitugevusega polüstüreen **HIPS** saadakse PS-i modifitseerimisel kummi või elastomeeriga, näiteks polübutadieenkummi (BR) või stüreenbutadieenkummi (SBR) lisamisega. Kummiosakesed ei lahustu PS-is, mistõttu tekib kahefaasiline mikrokomposiitmaterjal. Tulemusena paraneb oluliselt löögisiskus, kuid materjal on läbipaistmatu.

Stüreenpolümeeridest on saadaval väga mitmeid modifikatsioone, mistõttu nende omadused võivad väga suures ulatuses erineda. Väärrib tähelepanu, et kõigis neis sisalduv stüreen on väga mürgine aine, millega isegi lühiajalisel kokkupuutel võib tekkida naha- ja limaskestaärritus. Seega on PS-toodete valmistamisel väga oluline jälgida tooraine päritolu ja kvaliteeti.

Polüuretaanid (*polyurethanes*) **PU**. Polüuretaanid on ühed kõige enam varieeruvate ja manipuleeritavamate omadustega polümeerid: toodetakse nii termoplastseid kui

termoreaktiivseid, aga ka elastomeerseid polüuretaane. PU mehaanilised omadused varieeruvad suures ulatuses, tihedus võib olla vahemikus 1,1...1,6 g/cm³. Polüuretaanist toodetakse nii elastomeere, kompaktplaste, kiudusid kui ka vahtusid (vahtude tihedus on 9...400 kg/m³). PU on heade tehnoloogiliste omadustega, suure tugevuse, sitkuse ja püsivusega (omadused on suhteliselt püsivad pika aja jooksul). Säilitab sitkuse madalal temperatuuril, vastupidav nii rebimisele kui ka lõikamisele. Ei lahustu õlides, määretes, kütustes, lahustites ning on vastupidav teiste kemikaalide suhtes.

Termoplastne polüuretaan **TPUR** on ristsidemete puudumise tõttu küllaltki pehme, elastne materjal (elastomeer), kuid lisanditega modifitseerides on võimalik toota ka jäiku ja kõvu materjale. Toodetakse nii plasti kui pinnakattematerjali, eelkõige autotööstuses armatuurlaudade ja uksepolstrite pindmiste kihtide valmistamiseks või autopõhjade kaitsmiseks (kivikaitse). Ehituses on väga levinud PUR-lakid, mida kasutatakse puidu kaitsmiseks rohkesti käidavates kohtades (spordisaalid, tantsusaalid, koridorid), kaetakse ka ujumisbasseine jms.

Autotööstuses valmistatakse PUR-ist veermiku pukse ja muhve, tööriistanduses tööriistade käepidemeid, sporditarvikuid (sh spordiriided, ujumisriided, suusasaapad jms, rulade ja rulluisukude rattad), kodumajapidamises kasutatavaid väikseid rattaid (näiteks laudadel, redelitel, kappidel, tõstukitel, tolmuimejatel jpm).

Vinüülid (*vinyls*). Vinüülid moodustavad suure rühma polümeere, mis hõlmavad kõiki vinüülmonomeeridest koosnevaid polümeere (süsinikkaksiksidet sisaldavad monomeerid). Kitsamalt käsitletakse vinüülpolümeeridena vinüülkloriide ja vinüülestreid. Vinüülkloriidide ja vinüülestrite ühised iseloomulikud omadused on suur tugevus ja kulumiskindlus, hea läbipaistvus ning isekustuvus. Kasutatakse polüvinüülatsetaati (PVA), polüvinüülbutüraati (PVB) ja polüvinüülkloriidi (PVC).

PVA on lõhnata, maitseta, värvitu, mittetoksiline polümeer. Ta on vees lahustumatu, moodustades veega segunedes emulsiooni. PVA-d kasutatakse peamiselt adhesioonmaterjalina poorsete materjalide liimimiseks (kasutataksegi PVA ja vee emulsiooni). On väga levinud puidu- ja paberiliim, kasutatakse ka sideainena erinevatest silikaatidest ehitusplokkide vms tootmisel.

PVB on värvitu, väga elastne ja sitke polümeer, mis peamiselt leidis kasutamist alates 1940-ndatest aastatest autode ja õhusõidukite lamineeritud turvaklaaside kilede valmistamisel.

Polüvinüülkloriid (*polyvinylchloride*) **PVC**. PVC on valdavalt amorfse struktuuriga (kristalliinsusaste umbes 5 %), hea läbipaistvuse ja kulumiskindlusega polümeer. PVC iseloomustab ennekõike isekustuvus, mis on tingitud selle koostises olevast kloorist. Polümeeri pürolüüsil (põlemisel lagunedes) eralduvad soolhappe (HCl) aarud, mis pärsivad leegi levikut (on seetõttu isekustuv).

Üldiselt on PVC heade mehaaniliste omadustega ja odav plast, ning sobib seetõttu ehituses ja teistes tehnilistes rakendustes kasutamiseks (paneelid, põrandakatted, torud, talad, aknaraamid). PVC-st kasutatakse väga suurel hulgal variatsioone ja kopolümeere, mille omadused on väga erinevad. PVC-d iseloomustab üldiselt hea UV-kindlus (kasutatakse laialdaselt välitingimustes). PVC on hästi vormitav (näiteks survevalu ja ekstrusiooni teel) ning sisaldab alati lisandeid (täiteained, plastifikaatorid, värvipigmentid). Plastifikaatorite lisamisel muudetakse jäik PVC pehmeks ja sitkeks, võimaldades seda kasutada kaabliisolatsioonimaterjalina, laste mänguasjade tootmiseks, kunstnaha valmistamiseks, autode armatuurlaudade ja küljepolstrite pindmise katte valmistamiseks.

Reaktoplastid

Aminovaigud (*amino resins*). Aminovaikude kaks peamist rühma on **melamiinid** (*melamine-formaldehydes*) **MF** ja **karbamiidformaldehüüdid** (*urea-formaldehydes*) **UF**. Kirjanduses käsitletakse neid polümeere koos, kuna nad on tootmismeetoditelt ning kasutusvaldkondadelt sarnased.

Melamiine iseloomustavad eeskujulik termopüsivus, kemikaalikindlus ja vastupidavus vee lagundavale toimele (hüdrolüüs), ühtlasi vetthülgavad omadused (hüdrofoobne). Melamiin võib olla läbipaistev, kuid seda valmistatakse ka erinevates värvitoonides. Melamiinil on head dielektrilised omadused ning seepärast leiab vaik kasutust elektrotehnikas. Kasutatakse tänapäeval ulatuslikult adhesioonmaterjalina vineeri ning erinevate saepuru- ja puitlaastplaatide tootmiseks, laminaatparketi, puidukilpide (lauaplaadid, köökide tööpinnad) tootmiseks. Minevikus olid levinud melamiinsideainega kööginõud (anumad, kulbid jne). Melamiin degradeerub mikrolainete toimel; lisaks ebapiisavale kraapekindlusele on see põhjuseks, miks köögitarvikute valmistamiseks melamiinivaike ei kasutata.

Karbamiidformaldehüüdvaigud on omadustel sarnased fenoolvaikudega, kuid saadaval on mõnevõrra heledamates toonides. Kasutatakse sisetitingimustes kasutatavate mahutite, karpide ja korpuste valmistamiseks ning valgustites (valgus kumab materjalist soojades toonides läbi). Vahuna leiab kasutust soojusisolatsioonimaterjalina.

Epoksüvaigud (*epoxy resins*) on praegusel ajal kasutusel olevatest reaktoplastidest kõige paremate mehaaniliste omadustega, väga suure tõmbe- ning survetugevusega, väga kõvad, sitked, keemiliselt ülimalt vastupidavad, olles hea läbipaistvuse, väikese kahanemise ning suure adhesiooniga polümeerid. Eeltoodud põhjustel kasutatakse epoksüvaike laialdaselt pinnete-, adhesioon- kui ka komposiitmaterjalide tootmiseks (nakkuvad peaaegu kõikide kiududega). Vaikude, kõvendite, täiteainete ja muude lisandite kombineerimisel saadakse hulgaliselt erinevate omadustega kompaunde, mida kasutatakse elektrotehniliste toodete valmistamiseks. Tänu epoksüvaikude

küllaltki madalale viskoossusele on võimalik neid kasutada keerukate detailide vormimiseks ning armatuuri immutamiseks.

Kõvendi (reaktsioonikäiviti) lisamisel on selliseid prepolümeere võimalik ristsiduda, mille käigus vedel prepolümeer tardub. Ristsidumisel seotakse omavahel kõvendi ja epoksüvaigu molekulid, mis tähendab, et reaktsiooni lõpuni kulgemiseks on vajalik täpne arv polümeeri ning kõvendi molekule, ehk täpset epoksüvaigu ja kõvendi hulka. Seetõttu on ettenähtud maksimaalsete omadustega materjali saamiseks vaja kõvendit täpselt doseerida.

Fenoolvaigud (*phenolic resins*) **PF**. Fenoolvaigud, ka fenoplastid on ajalooliselt esimesed sünteetilised polümeerid (v.a nitraatselluloos), mida tänapäevalgi kasutatakse laialdaselt adhesiivmaterjalides (liimid), komposiitmaterjalide maatriksimaterjalina ja kompaktplastina.

Fenoolvaikude omadused olenevad suurel määral lisanditest, kuid üldiselt on nad kõvad, suure tugevusega, odavad, hea termopüsivuse ja niiskuskindlusega ning hea mõõtmestabiilusega. Nende kasutamise peamine puudus on nende tume värv (kas must või tumepruun), vormimist piirav kõrge rõhu kasutamise nõue ning mõnede teistele uuematele polümeeridele alla jäävad mehaanilised omadused (haprus). Kasutatakse vineeri tootmiseks (adhesiivmaterjalina spoonikihtide liimimiseks), täiteainete/armatuuri immutamiseks (paber, riie, puit jt). Fenoolvaiguga immutatud tekstiili tuntakse tekstoliidina, millest valmistatakse näiteks elektroonikaseadmetes kasutatavaid trükiplaate. Fenoolvaigu ja paberi komposiiti tuntakse getinaksina, mida kasutatakse isoleerplaatide valmistamiseks (kasutusel elektriseadmetes). Fenoolvaike kasutatakse tihti tulenevalt nende väga headest adhesiooniomadustest abrasiiv- ja friktsioonmaterjalide tootmiseks (näiteks liivapaber, lihvimiskettad, piduriklotsid). Tuntuim fenoolvaikudel põhinev materjal on **bakeliit** (*bakelite*). Materjal koosneb fenoolvaigust ja puidupulbrist, kasutati algul keerukate toodete valmistamiseks ning XX saj alguses sellele konkurente alternatiivsete materjalide ja tehnoloogiate kujul polnud (telefoniaparaatide ja raadiote korpused jpm).

Polüestervaigud (*polyester resins*) **PE**. Polüestervaike on võimalik toota nii küllastatud kui ka küllastamata kujul, andes vastavalt kas termoreaktiivseid või termoplastsetseid polümeere. Polüestervaigud ja nende baasil reaktoplastid on suurte tugevusnäitajatega ja vastupidavad erinevate keskkonnamõjude suhtes. Kasutatakse laialdaselt klaaskiuga armeeritud komposiitide maatriksimaterjalina (paatide ja väikelaevade kered ja tekidetailid, autode kerepaneelid, vannid, torud, mahutid, fassaadipaneelid ehituses). Neist toodetakse veel ka kõrgläikega värve (autovärvid, muusikariistade värvid ja lakk-katted). Nagu teisigi reaktoplaste, toodetakse polüestervaikeid prepolümeeridena (molaarmassiga umbes 1000...5000 g/mol), viskoosse vedelikuna, mida on võimalik hilisemal reaktsioonikäiviti lisamisel

ristsiduda jäigaks ning kõvaks materjaliks. Polüestervaikude ristsidumisprotsess nõuab vaid väga väikse koguse reaktsioonikäiviti lisamist (0,5...3 %), mille tulemusel kulgeb ristsidumise protsess kõnealusel toatemperatuuril lõpuni. Seetõttu ei ole ka lisatava reaktsioonikäiviti kogused võrreldes epoksüvaikudega sedavõrd täpselt määratud.

Polüimiidid (*polyimides*) **PI**. Polüimiidid on rühm lineaarseid aromaateid polümeere, millest osa on termoplastid ja osa reaktoplastid, kuid mis pakuvad parimaid omaduste kombinatsiooni plastide seas. Polüimiide iseloomustab suur omaduste (tugevus, jäikus, kõvadus) stabiilsus temperatuurivahemikus kuni 500 °C (reeglina on lubatavad töötemperatuurid vahemikus -273...+250 °C, lühiajaliselt 480 °C). Neil materjalidel on kõrge roomepiir, head antifriksioonomadused, suur kulumiskindlus (võimalik kombineerida määrdelisanditega), mõõtmepüsivus, head dielektrilised omadused, vastupanu kiirgusele ja väike süttivus.

Polüuretaanvaigud (*polyurethanes*) **PUR**. Termoreaktiivseid (ristseotud) polüuretaane kasutatakse sageli vahtmaterjalidena, kus vahtude kõvadus ja survetugevus olenevad ristsidumisastmest. Pehmeid vahtusid toodetakse polstrite (istmepolstrid, diivanid, toolid jms), mänguasjade, patjade, pesukäsnade jms valmistamiseks (tuntud samuti kui kõik teised elastsed vahud nimega „poroloon“). Tihedamat ja jäigemalt vahtu kasutatakse soojusisolatsiooniks, löögisummutina (näiteks kiivrite voodrid, pakendid), komposiitmaterjalidele jäikuse andmiseks vahekihina.

Jäiksid vahtusid kasutatakse kergete konstruktsioonimaterjalide valmistamiseks, sändviitmaterjalides kõvade ja tugevate pinnakihtide (komposiitlaminaatide) – pealistuste vahel ruumilise distantsi loomiseks. See toob kaasa märgatava materjali paindejäikuse suurenemise.

Silikoonvaigud (*silicones*). Silikoonvaikude all mõistetakse polüorganosiloksaane, mis on poolorgaanilised polümeerid. Nende peaaegu ei koosne peamiselt süsinikust, vaid ränist (Si) ja hapnikust (O), millega on liidetud orgaanilised funktsionaalsed rühmad (üldjuhul on kaks metüül-, etüül- või fenüülrühma liidetud iga Si aatomiga). Need orgaanilised külgrühmad (funktsionaalsed rühmad) võivad moodustada sidemeid ka kõrvalahelas paikneva räni aatomiga, mille tulemusena tekib ristseotud võrgustik. Oma omadustelt on polüorganosiloksaanid kõik väga stabiilsed ja inertsed, hea termopüsivuse (kuni 260 °C), kemikaalikindluse, UV ning osooni lagundava toime suhtes vastupidavad (sobivad laialdaseks kasutuseks välitingimustes), vett tõrjuvad ning mittetoksilised materjalid. Neid kasutatakse määrdeainetena (silikoonõlid), vahuärastitena (ei lase vedelikel vahustuda), geelidena (silikoongeelid rinnaimplantaatides), elastomeeridena (tihendid, voolikud, elektri juhtmete isolatsioon, näiteks autode süüteküünalde juhtmed), köögitarvikute valmistamiseks (pajakindad, küpsetusvormid jms), vormimaterjalina (kasutatakse sageli teiste polümeeri, kipsi,

savi vms vormimaterjalina) plastist toodete (näiteks mänguasjad) valmistamiseks ja pinnetena.

Plastide lisandid

Plastid sisaldavad lisaks polümeersele põhimassile peaaegu alati erinevaid lisandeid. Lisandite eesmärgiks on parandada või modifitseerida omadusi, alandada hinda, parandada tehnoloogilisi omadusi, muuta plasti värvi.

Lisandite puhul eristatakse täiteaineid ja armeerivaid lisandeid, plastifikaatoreid, määrdeid, värvaineid ja pigmenete, stabilisaatoreid, antioksüdante, leegiaeglusteid ja erilisandeid (vahustavad lisandid, elektrijuhtivust parandavad, paksendid, tahkestid, kõvendid, antimikroobsed lisandid).

Täiteained (*fillers*). Tavaliselt sisaldavad plastid märkimisväärses koguses täiteaineid. Nende eesmärgiks on suurendada tugevust, jäikust, sitkust, vähendada mahukahanemist. Eelnimetatule lisaks kasutatakse täiteaine lisamist enamikul juhtudel polümeeri mahulise kokkuhoiu saavutamiseks, materjali hinna alandamise eesmärgil. Tavaliselt mõjub täiteaine lisamine negatiivselt plasti tehnoloogilistele omadustele (vormitavusele). Reeglina on täiteained polümeersest põhimassist odavamad. Tavatäiteained on:

1. Puidujahu (peenike saepuru ja lihvimistolm) – üldotstarbeline täiteaine, alandab hinda, mõõduka tugevusega, keskpärase vormitavusega.
2. Kangakiud – suurendab löögisitkust, halvendab vormitavust.
3. Klaaskiud – suurendab tugevust, mõõtmepüsivust, läbipaistvust.
4. Vilgukivi – üliheade dielektriliste omadustega (isolaator), alandab niiskuseimavust.
5. Tahm, kaltsiumkarbonaat, talk, ränimuld, savi, titaanoksiid, Al-trihüdraat – üldotstarbelised täiteained.

Eraldi grupina eristatakse veel gaastäidisega polümeere (vahtplastid) ja mikrosfääridega täidetud polümeere (lisatakse mikroskoopilisi klaaskuulikesi, mis aitavad vähendada polümeeri kaalu, kasutatakse näiteks kergpahtlite valmistamisel).

Täiteainete kasutamisel toimib polümeer sideainena, ümbritsedes täiteaine osakesi, mistõttu on plastist vormitud detaili pinnakihiks peaaegu alati polümeer. Pinnakihi lõikamisel või kriimustamisel võib pinnale avaneda täiteaine, mistõttu detaili kaubanduslik välimus kannatab.

Plastifikaatorid (*plasticizers*). Plastifikaatoreid lisatakse väikeses koguses plastile, klaasistumistemperatuuri T_g ja sulamassi viskoossuse alandamiseks ning vormitavuse parandamiseks. Plastifikaatoreid võidakse lisada termoplastidele materjali sitkuse ja plastsuse suurendamiseks (plastifikaator toimib makromolekulide ja sekundaarsete ahelalülide vahel barjäärina, vähendades nende vahelist füüsilist vastasmõju). Kui

plastifikaator on vajalik vormitavuse parandamiseks, määrab selle koguse detaili ja vormi keerukus. Üldjuhul peaks plastifikaatori kogus olema minimaalne, sest suure tõenäosusega alandab liigne kogus detaili vananemiskindlust (pinna omadused halvenevad aja jooksul, kui plastifikaator migreerub pinnale). Kuna polümeerides kasutatavad plastifikaatorid võivad olla väga kahjulikud inimese tervisele, ei tohi plastifikaatorid toote kasutamise ajal polümeerist lenduda ega siirduda selle pinnale. Plastifikaatoreid sisaldavateks toodeteks on näiteks juhtmete ja kaablite isolatsioonikihid, kõikvõimalikud leht- ja profiiltooted.

Määrdelisandid (*lubricants*). Määretena kasutatakse vahasid, silikoonmäärdeid, stearaate ja seepe ning nende eesmärgiks on plasti vormitavuse (töödeldavuse) parandamine ja plasttoote vormist eemaldamise lihtsustamine. Määrdeid kasutatakse ka õhukeste plastlehtede teineteise külge kleepumise vältimiseks ladustamisel (virnastamisel või rullmaterjalina). Kui määrdeaine kantakse vormi pinnale vormimis-tsükli vahelisel ajal, on tegu välise määrdega. Survevalu korral on majanduslikult otstarbekam lisada määrdeid plasti koostisse – sel juhul on tegu sisese määrdega. Üldiselt alandavad määrded plasti mehaanilisi omadusi ning neid lisatakse minimaalses vajalikus koguses vältimaks plasti kleepumist vormiseinte külge ja polümeeri katkemist valukanalis.

Värvlisandid (*coloring agents*). Värvlisandeid kasutatakse plastile sobiva värvitooni andmiseks. Nii välditakse vajadust toodet värvida. Värvlisandid võivad olla värvained või pigmendid. Värvained on polümeeris lahustuvad, pigmendid mittelahustuvad ning on makroskoopiliste osakestena disperseeritud polümeermatriksis. Värvaineid kasutatakse läbipaistvates plastides, pigmente poolläbipaistvate ja läbipaistmatute plastide toonimiseks. Pigmentidena kasutatakse tahma, titaanoksiidi, alumiiniumsilikaati, vasepulbrit. Sageli määravad plasti tooni koostises kasutatavad täiteained. Tahm (kuni 30 %) autorehvides täiteainena annab kummile musta värvuse. Välimuse parandamiseks (sära, värvitooni kirkus) võidakse kasutada spetsiaalseid optilisi omadusi parandavaid lisandeid. Toime seisneb UV-kiirguse neelamises (tavaliselt vahemikus 340...370 nm) ja reemiteerimises, seda nähtava spektri sinises osas.

Stabilisaatorid (*stabilizers*). Stabilisaatoreid lisatakse takistamaks polümeeride degradatsiooni. Kuna degradatsioonimehhanisme on mitmeid, lisatakse polümeeridele erinevaid lisandeid: antioksidante, UV-absorbereid, fungitsiide, Pb-soolasid jt, mis kõik aitavad vähendada erinevate degradatsiooniprotsesside kiirust. UV-absorbereite toimemehhanism seisneb UV-kiirguse muundamises soojuskiirguseks ja seeläbi plasti fotokatalüütilise lagunemise aeglustamises.

Leegiaeglustid (*flame retardants*). Leegiaeglusteid lisatakse plasti süttivuse vähendamiseks või tule leviku piiramiseks. Plaste liigitatakse kergsüttivateks (näiteks PP, PE, PS, PA, PMMA), isekustuvateks (näiteks PC, PUR, PVC) ja mittesüttivateks

(üldjuhul reaktoplastid). Isekustuvad polümeerid põlevad vaid leegitekitaja juuresolekul. Polümeeride isekustuvust on võimalik soodustada erinevate leegiaeglustite lisamisega (näiteks $\text{Al}(\text{OH})_3$); endotermilisel lagunemisel eraldub vesi (soojus neeldub), mis pärsib seeläbi leegi levikut. Kasutatakse ka mittepõlevaid gaase eraldatavate ühendite lisamist (näiteks Na_2CO_3), mille lagunedes eralduvad gaasid takistavad õhuhapniku ligipääsu ja polümeeri süttimist. Selliste lisandite puuduseks on suur toksilisus.

Teised lisandid. Plasti elektrijuhtivust on võimalik parandada elektrijuhtivate lisandite abil. Elektrijuhtivuse suurendamisega on võimalik vältida staatiliste laengute kogunemist ja elektrostaatiliste laengute kontrollimatut liikumist. Staatilise elektrilahenduse kaitseks kasutatakse staatilist elektrit hajutavaid ja vähesel määral tekitavaid materjale. Selliseid materjale nimetatakse **antistaatikuteks** (*antistats*), kuid õigem oleks neid nimetada nõrgalt laaduvateks (vähelaaduvateks). Põhjuseks on asjaolu, et antistaatiliisi ehk staatilist elektrit mittetekitavaid materjale praktiliselt ei leidu. Tähtsam omadus kui staatiliste elektrilaengutega laaduda on aine elektrijuhtivus ehk võime staatilise elektri laenguid hajutada. Juhtivaid plaste kasutatakse palju elektroonikatööstuses pakkematerjalidena. Laaduvust vähendavate lisandite kasutamine vähendab plasti kalduvust külge tõmmata tolmu ja saastuda, mis on eriti oluline ravimi- ja toiduainetööstuses. Tuntuim antistaatiline lisand on tahm, kuid kasutatakse ka teisi hüdrofiilseid aineid, mis suurendavad juhtivust niiskussisalduse suurendamise kaudu.

Biokaitsevahendid (biotsiidid) peavad ära hoidma mikroorganismide lagundava mõju ning pinna saastumise. Hallitusseened, vetikad ja muud mikroorganismid on võimelised levima nii plast-, metall- ja klaaspindadel kui ka muudel näiliselt kasvuks kõlbmatutel pindadel. Seenorganismid on materjali pinda värvivad (hallitusseened) ja materjali lagundavad.

Plasti koostisse võidakse lisada kiudusid, et tõsta plasti tugevust ja jäikust, metallipulbreid, helbeid, kiudusid, et muuta elektrilisi ja magnetomadusi. Tabelisse 6.2 on koondatud lisandid ja nende peamine kasutusotstarve.

Tabel 6.2. Lisandid ja nende kasutusotstarve plastides

Lisandi tüüp	Eesmärk
Täiteained	Parandavad plasti mehaanilisi omadusi, vähendavad kahane- mist, alandavad kaalu ja hinda
Plastifikaatorid	Parandavad plasti painduvust ja sitkust ning voolavust sula- töötusel, alandavad elastusmoodulit
Määrdeained	Parandavad vormitavust ja teevad võimalikuks toote vormist eemaldamise
Värvlisandid	Annavad tootele soovitud tooni
Stabilisaatorid	Aeglustavad plasti lagunemist kuumuse või valguskiirguse toimel
Antioksidandid	Aeglustavad plasti lagunemist oksüdeerumise mõjul
Leegiaeglustid	Vähendavad süttivust
Juhtivustparandavad	Suurendavad plasti elektrijuhtivust
Antistaatilised	

Plastide liigitus kasutusotstarbe järgi

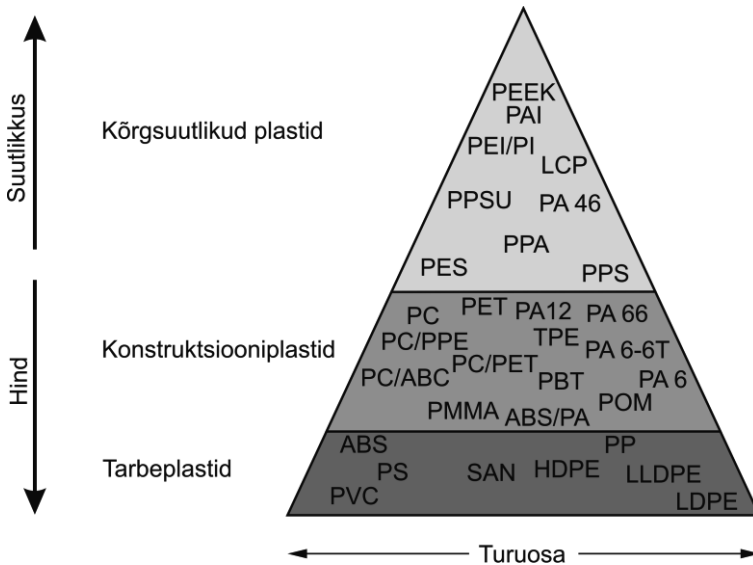
Omaduste ja otstarbe järgi liigitatakse termoplastid ja reaktoplastid kolme gruppi:

- a) **tarbeplastid** (*commodity plastics*): polüetüleenid (PE), polüpropüleen (PP), polüvinüülkloriid (PVC), polüstüreen (PS) ja fenoolvaigud (PF) jt;
- b) **konstruktsiooniplastid** (*engineering plastics*): polüamiidid (PA), polüoksümetüleen (POM), polüakrülaat (PMMA), polükarbonaadid (PC), modifitseeritud polüfenüleenoksiid (MPFO), polübutüleenitereftalaat (PBT);
- c) **kõrgsuutlikud plastid** (*high performance plastics*): polüeeter(eeter)ketoon (PEEK), polüeetersulfoon (PES), polüeeterimiid (PEI), polüamiidimiid (PAI), vedelkristalsed polümeerid (LCP) jt.

Kõrgsuutlike plastide gruppi kuuluvad ka suundoriinteeritud plastid. Kuna molekulide vahel mõjuvad jõud suurenevad molekulide (ja nende osade) vahelise kauguse vähenedes, siis kõik töötlusmeetodid, mille tulemusel joondatakse molekulide ahelaid jõudude mõjumise sihis, suurendavad pikkade ahelatega termoplastide tugevust. Plasti vormimisel – kiudude ketramisel, profiilitoodete ekstrusioonil ja lehtede valtsimisel orienteeritakse ja venitatakse polümeeriahelaid töötlemise sihis. Üldjuhul toimub töötlemine kõrgendatud temperatuuril, pärast töötlemist jahutatamine normaaltemperatuurile. Orienteerimise tulemusena suureneb plasti tugevus kuni 25 %, mõningatel juhtudel isegi kuni 50 %. Lisaks saab suunamise abil suurendada katkevenivust (kasvab kordades). Kui suundoriinteeritud plaste kuumutada, püüavad nad taastada oma esialgset kuju – nähtust tuntakse viskoelastse mäluefektina. Praktikas kasutatakse seda nähtust näiteks kahanevate pakendtermokilede valmistamisel.

Joonisel 6.10 on näidatud tarbeplastide, konstruktsiooniplastide ja kõrgsuutlike plastide hinna ja omaduste „püramiid“. Tuleb silmas pidada, et selline liigitus on mõnevõrra tinglik ja ei välista konkreetsetes rakenduses ühtegi plasti, kui kasutus-tingimused selleks otsest piirangut ei sea.

Mitmesuguste stabilisaatorite, kiud- ja pulbertäiteainete abil on võimalik parandada tarbeplastide mõningaid mehaanilisi omadusi. Enamasti kaasneb sellega mingite teiste näitajate langus. Konstruktsiooniplastide puhul on omadused paremini tasakaalustatud. Konstruktsiooniplastide tootmismahud on tavaliselt väiksemad ning nende hind tarbeplastidega võrreldes tunduvalt kõrgem.



Joonis 6.10. Plastide liigitus kasuomaduste, hinna ja turumahu järgi

Liimid

Tänapäeval kasutatakse laialdaselt **polümeerliime** (*polymeric adhesives*); neid kasutatakse erinevate materjalide liitmiseks – näiteks metallide liimimiseks mitte-metallidega; sageli asendavad liimid keemis- ja neetliiteid. Olenevalt koostisest ja lisanditest on saadaval väga erinevate omadustega liime. Liimide kõvenemise mehhanism võib olla erinev, seda näiteks sulaliimi (nn kuuma liimi, milles liimaine on sulaolekus termoplast), epoksüliimi (kahekomponentse epoksüvaikudel põhineva liimi) ja elastomeerliimi (silikoonliimi) korral. Tööstuslikult levinumad polümeersed liimid on epoksü-, uretaan-, tsüanoakrülaat-, akrüül- ja anaeroobsed liimid, silikoonid, sulaliimid jne. Liimi valikul lähtutakse tavaliselt liimitavatest materjalidest, kasutuskeskkonnast, hinnast ja tootmisprotsessi piirangutest.

Vahud

Paljudest polümeeridest saab toota vahttooteid. Vahud sisaldavad oma koostises õhu- või gaasimulle. Vahu saamiseks lisatakse spetsiaalseid kemikaale – **vahustavaid lisandeid** (*foaming agents*) pulbri või pelletite kujul. Vahustav lisand aktiveeritakse termiliselt ning sellest eraldub lagunemise käigus gaas. Gaas lahustub sulapolümeeris ning välise rõhu alanemisel eraldub, tekitades suures koguses poore.

Vahtmaterjalidel on väga palju kasutusvaldkondi ning nende omadused varieeruvad laiadest piirides (pehmetest painduvatest kõvade ja jäikade vahtudeni). Pehmeid vahtusid kasutatakse laialdaselt pehme mööbli polstri, autoistmete polstri, heli- ja vibratsiooni summutava materjalina. Poolpehmeid vahtusid kasutatakse näiteks ujuv vahendite (poid, päästerõngad, parved), külmikute isolatsiooni, ühekordselt kasutatavate toidukarpide ja -konteinerite valmistamiseks, soojusisolatsioonmaterjalina ehituses ja helisummutuspaneelidena. Jäiksid vahtusid kasutatakse laeva- ja lennukiehituses, elektroonika- ja mööblitööstuses.

Vahtmaterjale toodetakse mitmel viisil ja neist valmistatakse valmisvahttooteid, pooltooteid (plaadid, torud, profiilid) või kasutatakse montaaživahtudena, andes lõpliku kuju kasutuskohas. Lisaks eespool mainitud headele heli- ja vibratsiooni-summutavatele omadustele on vahtude eeliseks ülikergus (kuni 95 % nende ruumalast on gaas). Sellest tulenevad võimalused toote hinna alandamiseks ja vahtude kasutamiseks toote jäikuse suurendamisel (näiteks sändvitšpaneeli täismaterjalina).

Värvid ja pinded

Polümeervärve ja **polümeerpindeid** (*polymer paints, polymer coatings*) kasutatakse laialdaselt viimistlusel, kuid nad on olulisel kohal ka korrosioonikaitseks. Pinnetelt nõutakse suurt sitkust, piisavat paksust ning mahakoorumise vältimiseks peavad nad kinnituma alusmaterjalile piisavalt tugevalt. Pinde eesmärgiks on alusmaterjali kaitsmine temperatuuri, niiskuse, korrosiivse vedeliku, gaasi või soolade kahjulike mõjude eest. Polümeerpinded on asendanud metallidel varasemalt laialdaselt kasutatud kroom- ja kaadmiumpindeid (peamiselt nimetatud metallidega seotud keskkonnaprobleemide tõttu).

Plastide võrdlus teiste materjalidega

Plastid on väga edukalt asendanud paljud traditsioonilised materjalid väga erinevates tehnikavaldkondades ja peaaegu kõikidel elualadel. Näiteks varem ainsa läbipaistva taaramaterjali – klaasi kõrval kasutatakse järjest enam vedelike pakendamiseks plasti. Torustike ehitamisel varem laialt levinud vasktorustiku asendajana kasutatakse tänapäeval järjest rohkem PE- ja PVC-torusid ja liitmikke. Plastid asendavad keraamikat sanitaartechnilistes toodetes (valamud, tööpinnad, kanalisatsioonitorustiku osad). Plaste ja metalle vaadeldakse sageli kui võistlevaid materjaligruppe, kuid kuna

nende mehaanilised omadused on väga erinevad, ei ole otsene võrdlemine põhjendatud. Mitmed plastidele iseloomulikud kasulikud omadused on eespool juba leidnud käsitlemist. Lisaks võib plastide puhul välja tuua:

1. Plastide töötlemine võrreldes metallidega on seotud väiksemate kuludega tulenevalt tööriistade madalamast maksumusest.
2. Plastide vormimisoperatsioone on võimalik täpsemalt ajastada koosteoperatsioonidega ning pole enamasti vaja suurt laovarud.
3. Toote koosteoperatsioonidelt on võimalik säästa, sest plastide puhul saab kasutada lihtsamaid ja odavamaid liiteid: pingistusid, hõõrdkeevitusi, isepuurivaid kruve jne.
4. Termoplastide puhul on võimalus taaskasutada tootmisjääke.
5. Võrreldes metallidega on väiksemad pinnaviimistluskulud.

Metallide ja metallisulamite eelisteks võrreldes plastidega on suurem tugevus ja löögisiskus ning tunduvalt suurem jäikus. Metallide hind võib mõnikord olla madalam, kuid nende töötlemiskulud aga suuremad. Metallide kuumuspüsivus on palju suurem (näiteks kuumutamine värvpinde kinnitamiseks ei ole kunagi probleemiks). Konstruksioonimaterjalina kasutatavate metallisulamite puhul ei ole erinevalt plastidest probleemiks süttivus. Metallide vastupanu lahustitele ja hapetele on võrreldes enamiku plastidega parem.

Heaks indikaatoriks plastide üha kasvavast kasutusest on autotööstus. Tänapäeva sõidukis on kuni 110 kg plasti. Võrdluseks 1960 a oli keskmiselt autos 11 kg, 1970 a – 45 kg, 1980 a – 88 kg ja 1990 a – 104 kg plastidetaile. Autos kasutatavad plastid ja nende ligikaudne kogus on näidatud Tabelis 6.3. Kokku on sõiduautos umbes 1000 plastidetaili.

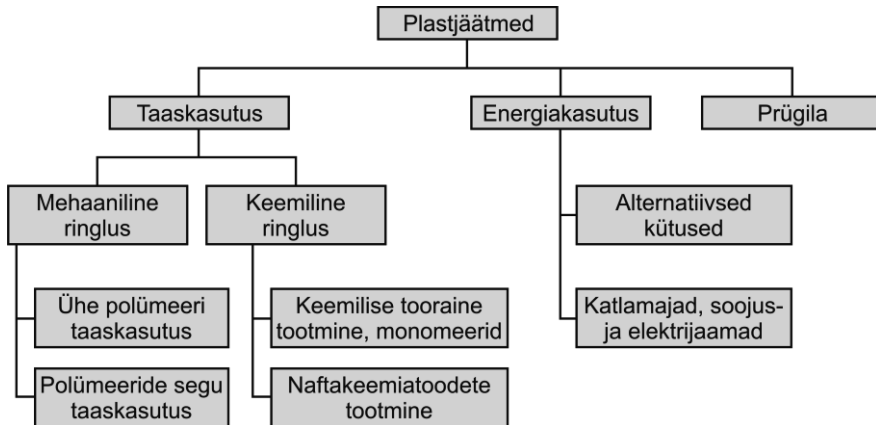
Tabel 6.3. Plasti kogus tänapäevases autos

Komponent	Enam kasutatavad plastid	Keskmine mass, kg
Pörkerauad	PP, ABS, PC/PBT	10
Istmed	PUR, PP, PVC, ABS, PA	13
Armatuur	PP, ABS, SMA, PPE, PC	7
Kütusepaak, kütusevoolikud	HDPE, POM, PA, PP, PBT	6
Kere (sh paneelid)	PP, PPE, UP	6
Mootorikatte all olevad osad	PA, PP, PBT	9
Siseviimistlusmaterjalid	PP; ABS;PET; POM; PVC	20
Elektriseadmed	PP; PE; PBT; PA; PVC	7
Auto välisdetailid	ABS, PA; PBT; POM; ASA; PP	4
Laternad	PC; PBT; ABS; PMMA; UP	5
Laepolster	PVC, PUR, PP, PE	8
Vedelike paagid	PP, PE, PA	1

6.2.3. Plastide ümertöötlemine ja taaskasutus

Maailma plastitööstuse kogutoodang ligineb 300 mln t aastas. Suur osa toodetavast materjalist kasutatakse ühekordse toidu- ja kaubapakendina. Tavaliselt toimub plastide lagunemine looduses väga kaua. Lisandid, mis viiakse plasti koostisesse, teevad plastid vastupidavaks keskkonnamõjudele ja ei lase neil materjalidel laguneda lühikese aja jooksul looduskeskkonnas. Plastide kontrollimatu põletamisega kaasneb sageli mürgiste keemiliste ühendite vabanemine. Materjalide **ringlus** (*recycling*) on raskendatud, kuna kasutuses on sedavõrd palju erinevaid plaste. Lisaks sellele on pakendijäätmed sageli saastunud toidujäätmetega, orgaaniliste saasteainetega, paberi- ja jääkidega jms. Plastjäätmete puhastamine teeb materjali ümbertöötlemise majanduslikult ebaotstarbekaks.

Joonisel 6.11 on esitatud skemaatiliselt erinevad võimalused plastide ringluseks – taas- ja energiakasutuseks.



Joonis 6.11. Plastide ringlus ja taaskasutus

Kuna erinevaid plaste on sedavõrd palju ja nende füüsilised omadused erinevad üksteisest suhteliselt vähe, on plasti segajäätmete sorteerimine ning taaskasutus palju keerukam kui metalli segajäätmete taaskasutus. Eraldama ei pea mitte ainult erinevaid polümeeriliike, vaid ka erineva täiteaine, värvlisandi ja muude tunnuste põhjal. Eeldusel, et eri plaste kogutakse liigiti, lihtsustub plasti taaskasutus oluliselt ja mitmeid termoplaste saab edukalt taaskasutada uute toodete valmistamiseks (vt Tabel 6.4). Kuna enamik plaste leiab kasutamist pakkematerjalidena, on paljudes riikides kasutusele võetud pakendiplastide ühtne tähistussüsteem. On kokku lepitud kuue levinuima pakendiplasti tähistuses, seitsmendasse kategooriasse liigitatakse kõik eespool nimetatud plastid.

Tabel 6.4. Pakendiplastide tähistus ja vastava plasti taaskasutuse näited

Sümbol	Lühend	Polümeer	Tüüpiline plasti taaskasutuse näide
 PETE	PETE või PET	Polüetüleen-tereftalaat	Polüesterkiud, termovormitud leht ja kile, joogipakend, pakendinöör
 HDPE	HDPE	Ülitihe polüetüleen	Pudelid, kilekotid, piimapakid, prügikastid, mänguväljakute inventar, puitplast, torustik (tarbevee)
 V	PVC	Polüvinüülkloriid	Torustiku osad, piirdeaiad, pudelid (toidu ja joogiga mittekokkupuutuvad)
 LDPE	LDPE	Väikese tihedusega polüetüleen	Kilekotid, erinevad mahutid, olemekemikaalide ja pesuvahendite taara, torustiku osad
 PP	PP	Polüpropüleen	Paksuseinalised lillepotid, ämbrid, torud, plastprofiilid (puitprofiilide asemel), võre-kastid, alused, toidu- ja külmutusnõud, uutes joogitaara kastides kuni 30 % ulatuses taaskasutatav PP, silokile rulli südamikud, autodetailid (kaitserauad, logarid, konditsioneeriosad, ventilaatorid ja ventiilid)
 PS	PS	Polüstüreen	Erinevad lauatarvikud, kandikud, vahtplasti koostisosana
 OTHER	Muu	Muud plastid, sh akrüül, akrüül-niitriil-butadienstüreen, klaaskiudkomposiit, polüamiid, polükarbonaat jne	Mahutid, konteinerid, puitplast

Taaskasutamisel üldjuhul plasti omadused halvenevad ning seepärast ei ole plasti taaskasutamine kõikides rakendustes võimalik. Maailmas võetakse ringlusesse igal

aastal ca 7,5 mln t PET jäätmeid. PET helvestest valmistatakse polüesterkiudu, mida saab kasutada tekstiilitööstuses (fliisid, kangad, polstrimaterjalid ja põrandakatted – võimalik kuni 100 % taaskasutus), pakendite termovormimisel (leht- ja kilematerjalid). PET pudelist uue pudeli valmistamine hoiab materjali taaskasutamisel kokku kuni 84 % energiat. Teisest polüetüleenist valmistatakse vedeliku- ja prügi-mahuteid ning kilekotte. Teisest polüstüreenist valmistatakse näiteks CD ja DVD karpe, LDPE-st puitpolümeerkomposiiti, nn plastpuitu, mis hoolimata oma mõnevõrra kõrgemast hinnast ja võrreldes puiduga madalamast paindetugevusest leiab kasutust suurt ilmastiku- ja kahjurikindlust nõudvates kasutuskohtades (näiteks aiamööbel, kaiehitised, terrassid). PVC plastijäätmetest valmistatakse akna- ja toruprofiile, põrandakatteid, kaabliisolatsiooni ja kilet. PVC jäätmete regranuleerimisel on põhi-probleemiks madal termopüsivus, mistõttu degradatsiooni vältimiseks tuleb lisada stabilisaatoreid. PVC kompaundplasti jäätmetest mehaaniliselt teel (krüojahvatus lämmastikus) saadud pulbrit saab kasutada torude, aknaprofiilide, aiapostide jms tootmiseks ekstrusiooni meetodil.

Reaktoplastide ringlussevõtt ei ole sulatöötuse abil võimalik. Reaktoplaste saab mehaaniliselt jahvatada ning seejärel kasutada täiteainena teiste plastide koostises. Rehve on võimalik samuti mehaaniliselt peenestada ja saadud materjali kasutada vibratsioonisummutava pinnasetäitena või mänguväljakute kattematerjalina.

Kui termoplastid ja reaktoplastid on segunenud või nende eraldamine osutub väga keerukaks, on otstarbekam kasutada plastijäätmeid energiaallikana. Polüstüreeni ja polüetüleeni energiasisaldus massiühiku kohta on suurem kui naftal ja ületab tunduvalt puidu ja paberi energiasisaldust. Üks võimalik viis plasti ringluseks on keemilise toorme tootmine, sh naftakeemia produktid. Polümeeriahelate lagundamiseks kasutatakse hüdrolyüsi (töötlemine veeauruga kõrgel rõhul) või pürolüüsi (kuumutamine ilma hapniku juuresolekuta).

Kuna toodete kvaliteedi tagamine on teisese plasti kasutamisel sageli raskendatud, suudetakse taaskasutada kogu maailma plastitoodangust vaid 15...30 % (EL keskmine 61,9 % 2012. a). Energiakasutusse jõuab olenevalt riigist 0...75 % toodetud plastist. Aastal 2012 EL-is toodetud 57 mln t ja tarbitud 46 mln t plastist ladustatakse prügimägedel umbes 9,6 mln t plasti aastas. Energiakasutusse suunati 8,9 mln t ning taaskasutusse 6,6 mln t.

Biolagunevad plastid

Üldiselt lisatakse plastile erinevaid lisandeid UV-kindluse ja termopüsivuse suurendamiseks. **Biolagunevad plastid** (*biodegradable plastics*) on valmistatud selliselt, et nad laguneksid aeroobse või anaeroobse laguprotsessi tulemusena oluliselt kiiremini võrreldes tavaplastidega. Looduslike plastide, mida nimetatakse ka **bioplastideks** (*bioplastics*), toormeks on mitmesugused valkained või muundatud kujul tärklised.

Viljast saadud tähtsaks on võimalik muundada polülaktaadiks või polülaktaathappeks (PLA), mis oma omadustelt sarnaneb polüetüleeniga või polüpropüleeniga. Looduslike täiteainete tselluloosi derivaatidele lisades saab valmistada looduses kiiresti lagunevaid plastid. Loodusliku päritoluga plasti kasutatakse ühekordse ja lühiajalise kasutusega toidupakendi materjali valmistamiseks. Looduslik plast ehk bioplast imab väliskeskkonnast kiiresti niiskust. Plasti molaarmass väheneb biolagunemise tagajärjel. Niiskuse toimel plast puruneb väikesteks tükkideks, mille mikroorganismid on võimelised lagundama lühikese aja jooksul.

Biolaguneva plasti koostisse kuuluv polümeer on tüüpiliselt naftakeemia saadus ning selle täiteaine on loodusliku päritoluga. Täiteaine lagunemise tulemusel muutub materjal käsnjaks ning polümeer on seetõttu mikroorganismide ja muude keskkonnasõjavõtte lagunemisele mõjule vastuvõtlikum. Biolagunevate plastide koostisse kuulub sageli ka bioaktiivseid ja paisumist soodustavaid lisandeid, mis veelgi kiirendavad lagunemist.

Bioplastide ja biolagunevate plastide osas on vastuolulisi arvamusi. Biolagunemise jaoks on üldiselt vaja teatavaid keskkonnatingimusi. Kui vastavad tingimused ei ole täidetud (näiteks kui aeroobselt lagunev bioplast satub anaeroobsesse keskkonda) – lagunemist ei toimu või see toimub äärmiselt aeglaselt. Ühtlasi vabaneb ebasoodsates tingimustes lagunemisel keskkonda kasvuhoonegaaside (metaan, CO₂) või mürgiseid heitmeid. Bioplastide ja biolagunevate plastide (naftakeemiasaadustel põhinevate) ringlus on raskendatud. Kui PLA plast satub PET jäätmete hulka, muutub segu taaskasutuse seisukohalt sobimatuks. Selle tulemusena alandab PLA juba toimiva pakendi taaskasutuse efektiivsust (mis mõnedes Euroopa riikides on vahemikus 97...99 %). Bioplastide kasutust piirab loodusliku päritoluga polümeeri kallim hind võrreldes naftakeemiasaadustel põhinevate biolagunevate plastidega – tähtsaks hinda mõjutab olulisel määral nõudlus muudes kasutusvaldkondades (näiteks toiduaine-, paberi- ja farmaatsiatööstus jm) ning see on nõudluse suurenemise tõttu pidevalt tõusnud.

6.3. ELASTOMEERID

Mõiste **elastomeer** ehk **elastomeerne polümeer** (*elastomer*) haarab kitsamat polümeeride rühma, mida iseloomustab lineaarne polümeeriahel ja võime jõu rakendamisel äärmiselt suures ulatuses elastselt deformeeruda. Mitmeid elastomeere on võimalik oma algpikkusest mitu korda pikemaks venitada, kusjuures nende algsed mõõtmed taastuvad koormuse eemaldamisel. Algne kuju taastub ka materjali paljukordsel deformeermisel.

Elastomeeride siseehitus on võrreldav paljude keerdunud spiraalvedrude sasipuntraga – lineaarsed polümeeriahelad on omavahel kokku põimunud ja keerdunud. Materjali

deformeerimisel keerduvad polümeeriahelad lahti. Välisjõu eemaldamisel võtab elastomeerist keha oma algse kuju, sest polümeeriahelad keerduvad uuesti kokku ja kõik sidemenurgad omandavad oma esialgse väärtuse.

Kui polümeeriahelad keerduvad jõu toimel lahti, toimub samaaegselt ka nende omavaheline libisemine, mis tulemusena väljendub nn **viskooses deformatsioonis** (*viscous deformation*). Viskooses deformatsiooni korral toimub materjalis makromolekulide ümberpaiknemine. Kuna selline ulatuslik liikumine vajab aega, tekib viivitus rakendatud pinge ja selle tulemusena tekkinud deformatsiooni vahel. Pinge tulemusena liiguvad makromolekulid uude (tasakaalulisse) asukohta ja seetõttu pole materjali pinge-eelse kuju taastamine enam võimalik.

Kokkukeerdunud makromolekulide sidumine kovalentsete sidemete abil ehk ristsidemete loomine võimaldab piirata viskoosset voolamist polümeeris, säilitades keha elastse deformeerumise võime. Keha jäikuse või elastsuse määrab ristsidemete arv. Väikese ristsidemete arvu korral on elastomeer pehme ja paindub nagu kummipael. Ristsidemete lisandumisel on teatava sidemete tiheduse juures makromolekulide lahtikeerdumine takistatud ja materjal muutub jäigemaks, kõvemaks ja hapramaks nagu näiteks kummi, mida kasutatakse keeglikuulide valmistamiseks. Kuna ristsidemed katkevad vaid kõrgel temperatuuril, on võimalik sünteetilistele elastomeeride puhul valmistada stabiilse pinge-deformatsiooni käitumisega elastomeere küllalt laias omaduste vahemikus.

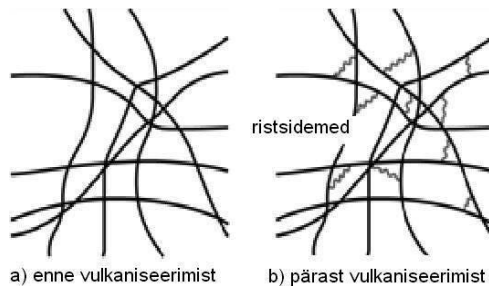
Kui hoida elastomeeri deformeeritud olekus pikka aega, toimub ka suure ristsidemete arvu korral elastomeeris teatav viskoosne voolamine. Nähtust, kus pinged vähenevad konstantse deformatsiooni juures aja jooksul, nimetatakse **pinge relaksatsiooniks** (*stress-relaxation*). Sama nähtuse pöördnähtus on **roome** (*creep*), mis seisneb deformatsioonide suurenemises konstantse pinge juures aja jooksul. Mõlema nähtuse põhjuseks on polümeeri viskoosne deformeerumine ja see oleneb materjalist, mõjuvast pingest ja temperatuurist.

Kummi ja elastomeeri mõisted ei ole täielikult kattuvad. Kummi on ristseotud elastomeer, tavakasutuses nimetatakse kummideks aga ka teisi elastomeere.

6.3.1. Naturaalkummi

Naturaalkummi ehk **loodulik kummi** (*natural rubber*) **NR** on vanim kaubanduslik elastomeer, mis on valmistatud lateksist – troopikas kasvava heveapuu mahlast saadavast aimest. Lähteainena kasutatav kautšukitaimede lateks koaguleeritakse esmalt happega – töötamise tulemusena saadakse kõrge molaarmassiga looduslik kautšuk (93...94 % ulatuses isopreeni polümeer). Kummi (NR) on kõrgelastne materjal, mille põhiline koostisosa on vulkaniseeritud kautšuk. Lähteolekus on lateks hea liimaine, kusjuures tänu sobivate lahustite leidumisele on lateks mitmete

tsementide koostisosaks. Tehnikas kasutati naturaalselt kautšukki esmakordselt 1839. a, kui *Charles Goodyear* avastas meetodi toorkummi **vulkaniseerimiseks** (*vulcanization*). Vulkaniseerimine seisneb toorkummi omaduste modifitseerimises (peamiselt ristsidemete loomises), lisades kautšukile väävlit (kuni 30 %) ja järgnevalt kuumtööteldes. Vulkaniseerimise käigus tekivad väävli osalusel polümeeri molekulide vahele kahe kuni kümne väävliatomi pikkused ristsidemed, muutes oluliselt materjali elastseid omadusi (Joonis 6.12). Ristsidemed takistavad makromolekulide omavahelist liikumist ja tõstavad materjali tugevust.



Joonis 6.12. Ristsidemed enne vulkaniseerimist (a) ja pärast vulkaniseerimist (b)

Loodusliku kummi omadusi saab lisandite abil parandada. Levinud lisandiks on **tahm** (*carbon black*), mis suurendab kummi jäikust; antioksidandid, mis suurendavad kummi vastupidavust keskkonnamõjude suhtes. Tänapäeval on vulkaniseerimiseks kasutatava kummi väävliisaldus oluliselt madalam (alla 3 %), sest kautšuki koostisse kuuluvad kiirendid, mis suurendavad vulkanisatsiooni kiirust. Protsessi kiirendavad seatina- ja magneesiumioksiidid ja polüsulfiidid.

Looduslikku kummit võidakse valmistada kompaundimise abil laias omaduste vahemikus – pehmekummist kuni eriti kõva kummini. Kummi tugevust on võimalik vajadusel suurendada, lisades kummile kiulist armatuuri. Sellisel juhul kannavad kiud koormust, kummi toimib sideainena ja väldib kiudude omavahelist kokkupuutumist. Eriti rasketes tingimustes kasutatakse armeerimiseks teraskiude. Sellisel põhimõttel on valmistatud näiteks sõidukite rehvid ja raskkoormatud konveierilindid.

Naturaalne kummi on suure tõmbe- ja rebimistugevusega ning hea taastuvusega. Taastuvus iseloomustab materjali võimet taastada pingeeelne seisund. Naturaalne kummi on heade dielektriliste omadustega, madala sisehõõrdumisega ja vastupidav enamikule anorgaanilistele hapetele, alustele ja sooladele. Naturaalne kummi lahustub orgaanilistes lahustites ja ei sobi kokkupuutesse benssiini, õlide ja teiste nafta- ja süsivesikutega. Naturaalse kummi soovituslik kasutustemperatuur ei ületa 80 °C ja ilma spetsiaalsete UV-kindlust suurendavate lisanditeta laguneb suhteliselt kiiresti UV-kiirguse toimel. Naturaalne kautšuk on amorfne, kuid pikaajalisel seismisel võib toimuda tema kristallumine.

6.3.2. Sünteetilised elastomeerid

Naturaalse kummi kõrval kasutatakse laialdaselt sünteetilisi elastomeere, mille hinda ei mõjuta loodusliku tooraine kättesaadavus ega kautšukitaimede kultiveerimisega kaasnev keskkonnamõju. Tänapäeva tehnikas on sünteetilised elastomeerid hõivanud olulisema koha kui naturaalne kautšuk. Osal neist on naturaalse kummiga sarnased omadused, teistel seevastu märksa paremad omadused. Naturaalse kautšuki koostisse kuuluvat polüisopreeni osatakse sünteesida kunstlikult ja saadud materjal sarnaneb naturaalsele kummile kõige enam.

Stüreenbutadieenkummi (*styrene-butadiene rubber*) **SBR** ja **polübutadieenkummi** (*polybutadiene rubber*) **BR** toodangu maht praegu maailmas on suurim. Nimetatud materjalid on naftakeemiasaadused ning neid kasutatakse sõidukirehvide valmistamiseks. Tänapäevaks on SBR ja BR naturaalse kummi sõidukirehvides praktiliselt välja tõrjunud, v.a talverehvid (naturaalse kummi eeliseks on suurem külmakindlus). SBR ja naturaalkummi tõmbe- ja rebimistugevuse suurendamiseks on enamasti vajalik mingi armatuuri kasutamine.

Butadieenkummi eriliseks omaduseks on suur vastupidavus vananemisele. Sünteetilise kautšuki koostisse lisatakse sageli täidiseid ja lisandeid (tahm, ZnO). NBR külmakindlus on suhteliselt madal $-40...-45$ °C. BR paisub samades lahustites, milles looduslik kautšuk. Isopreeni polümerisatsiooni tulemusena katalüsaatori (Li) juuresolekul saadakse kautšuk, mis on oma koostiselt lähedane naturaalsele kummile. Tugevuselt ja soojuslikelt näitajatelt on naturaalkummi sarnane, kuid elastsuselt on madalamate näitajatega. SBR-i kasutatakse sõidukite hüdraulikaseadmetes (pidurid, roolivõimendi, sidur). Materjal on glükooli-, etanooli- ja veekindel, kuid ei talu õlisid, kütuseid jm süsivesinikke

Polükloropreenikummi (kaubanduslik nimetus *Neopreen*) **CR** on samuti naturaalsele kummile sarnaste omadustega, kuid mõnevõrra suurema jäikusega, parema õli-, osooni- ja leegikindlusega; on enim kasutatav sünteetiline kummi. CR on kulumiskindel, kuumakindel, gaasipidav ning väga õli- ja lahustikindel. Seda kasutatakse tihendite, pinnete, veorihmade, voolikute, kingataldade jm valmistamiseks.

Nimetatud sünteetilisi elastomeere kasutatakse väga erinevates rakendustes, sh kütusevoolikute, auto jahutustorustiku osade, rihmade, jalatsitaldade, ujumiskostüümide ja tihendite valmistamiseks.

Polüuretaan PU võib olla termoplast, reaktoplast või elastomeer olenevalt ristsidemete arvust. Väikese ristsidemete arvu korral on materjalil elastomeersed omadused ja kasutatakse laialdaselt vahtmaterjalina mööbli- ja sõidukite istmetäidisena. Polüuretaanist vormitakse näiteks sageli sõiduautode põrkeruud. Polüuretaankautšukit iseloomustab veel suur tugevus, elastsus, kulumiskindlus, gaasitihedus ja seda saab kasutada temperatuurivahemikus $-30...+150$ °C.

Silikoorkummi (*silicon rubber*) **SR** näeb välja ja tundub katsudes üsna sarnane naturaalse kummiga, kuid erineb tegelikult sellest oluliselt, sest makromolekuli lineaarne ahel koosneb räni ja hapniku aatomitest (ei sisalda süsinikku). SR-i silmapaistvamaks omaduseks on tema kasutatavus äärmiselt laias temperatuurivahemikus $-100...+230$ °C. Silikoorkummi on vastupidav hapete, leeliste ja teiste veepõhiste või orgaaniliste lahuste suhtes, heade energiasalvestus- ja vibratsioonisummutusomadustega, ei väsi ega vanane, osutab vastupanu osoonile. Valmistatakse erineva kõvadusega silikoorkummit.

Kasutatakse veel paljusid teisi sünteetilisi elastomeere, mida iseloomustavad lisaks erinevale keemilisele koostisele ja mehaanilistele omadustele ka erinev vastupanu kemikaalidele, lahustitele, erinev termopüsivus, elektritakistus jpt omadused.

Elastomeere liigitatakse sageli termoreaktiivseteks ja termoplastseteks elastomeerideks. Termoreaktiivsed materjalid saadakse pöördumatu vulkanisatsiooniprotsessi tulemusena, mis tingituna oma spetsiifikast vajab toimumiseks teatavat aega. Termoplastsete elastomeeride korral põhineb kummielastus koostisse kuuluvate pehmete ja jäikade faaside küllaltki keerulisel vastasmõjul ja ristsidemeid makromolekulide vahel ei moodustata. Termoplastseid elastomeere saab vormida samu tehnoloogiaid kasutades, mille abil toimub teiste termoplastide vormimine (survevalu, ekstrusioon, puhumisvormimine, termovormimine jt). Termoplastsed elastomeerid pehmenevad märksa madalamal temperatuuril kui termoreaktiivsed materjalid (ei sobi tööks üle 90 °C). Nende eeliseks on omaduste säilimine madalal temperatuuril (materjali jäikus ei suurene madalal temperatuuril oluliselt), nende taaskasutus on palju lihtsam ning nendest saab lihtsamalt valmistada eri värvitoonides tooteid. Termoplastseid elastomeere kasutatakse üsna sageli tööriistade, kodumasinade ja olemelektroonika käepidemetes, sest nende hõõrdetegur enamiku materjalidega on suur ja nad sobituvad hästi peopesaga. Termoplastsed elastomeerid on võrreldes ristseotud elastomeeridega tunduvalt kallimad.

Elastomeeride valik

Elastomeere kasutatakse väga paljudes valdkondades – löögi-, müra- ja vibratsioonisummutava materjalina, tihendimaterjalina, korrosioonikaitseks, abrasiivkulumise vähendamiseks, elektri- ja soojustisolaatorina, hõõrdeteguri suurendamiseks, vedeliku- ja gaasitiheduse saavutamiseks, jõu ja momendi ülekandmiseks. Sobiva elastomeeri valikul tuleb arvestada paljusid tegureid, sh töökeskkonda, mõjuvaid mehaanilisi koormusi, ettenähtud kasutusaega, valmistustehnoloogia piiranguid, hinda jne. Lisaks on võimalik elastomeeri omadusi modifitseerida lisanditega (mis võivad lihtsustada valmistustehnoloogiat või alandada hinda) või mõjutada omadusi valmistustehnoloogia parameetrite valikuga. Tabelis 6.5 on esitatud levinumad elastomeeride omadused ja nende levinumad kasutusalaad.

Tabel 6.5. Levinumate elastomeeride omadused ja kasutus

Elastomeer	Tihedus g/cm ³	Shore'i kõvadus A	Tõmbe- tugevus N/mm ²	Pikene- mine, %	Töötemperatuur, °C		Vastupidavus ¹⁾			Kasutusala
					min	max	õile	veemavusele	rebe- nemisele	
Naturaalkummi, NR	0,93	20...100	17	75	-55	80	↓↓	↑	↑	Rehvid, tihendid, voolikud
Polüakrülaat- kautšuk, ACM	1,10	40...100	2	600	-18	150	↑	↓↓	↓	Õlivoolikud, rõngastihendid
Etüleenpropüleen- kautšuk, EPDM	0,85	30...100	0		-40	150	↓↓	↑	↑	Elektriisolatsioon, jalanõud, voolikud, rihmad
Klorosulfoonitud polüetüleen, CSM	1,10	50...90	0		-55	120	↑	↑↑	↑	Mahutite vooder, keemia- kindlad voolikud, kingad, sisetallad ja kontsad
Polükloropreen, CR (neopreen)	1,23	20...90	24	800	-45	105	↑	↑	↑	Isolatsioon, rihmad, voolikud, tihendid, sisevooder
Polübutadien- kautšuk, BM	1,93	30...100	7	800	-60	100	↓↓	↓↓	↑	Rehvid, sisetallad ja kont- sad, tihendid
Polüisopreenkautšuk, PIR	0,94	20...100	21		-55	80	↓↓	↑	↑	Sama, mis looduslikul kummil
Polüsulfiidkautšuk, PSR	1,34	20...80	2	600	-55	80	↑↑	↑	↑	Diafragmad, tihendid, sh klapitihendid
Stüreenbutadien- kautšuk, SBR	0,94	40...100	17		-55	105	↓↓	↑	↑	Vormitud mehaanilised too- ted, ühekordselt kasutata- vad farmaatsiatooted
Silikonkautšuk, SI	1,1	25...90			-85	230	↓	↑↑	↓↓	Elektriisolatsioon, tihendid, sh rõngastihendid
Epikloorhüdrin- kautšuk, ECO	1,27	40...90	3		-45	120	↑	↑	↑	Diafragmad, tihendid, vormitud tooted, madala- temperatuursete osad
Polüüretaankautšuk, PUR	0,85	62...95	34	700	-65	100	↑↑	↓	↑↑	Rullisurattad, kontsad, vahtpolster
Fluoroelastomeer- kautšuk, FPM	1,65	60...90	7		-40	230	↑↑	↑↑	↓	Rõngastihendid, rullkatted

¹⁾ ↑↑ – eeskujulik, ↑ – hea, ↓ – mõõdukas, ↓↓ – vilets

Elastomeerid tööriistades

Kui elastomeerist element on paigutatud mõnest teisest materjalis kapslisse ja ta kuju muutus on piiratud, käitub elastomeer sarnaselt vedelikuga ning kannab üle talle mõjuva surve ühtlaselt kõigis suundades. Näiteks lehtmetsalli mahtvormimisel on võimalik elastse templi kasutamisega läbi viia avardamisoperatsioon, mis nõuaksid metallist templi puhul kalleid mitmeosalisi templeid (näiteks kahaneva kaelaosaga õõnesanumate ja hülsikujuliste toodete valmistamine). Elastomeerist saab suhteliselt lihtsalt ja odavalt valmistada leht- ja mahtvormimismatriitse. Lehtmetsalli vormimisel määrab detaili kuju valdavalt stantsi tempel ja vajaliku vastusurve tagab stantsiõõnde paigutatud elastne element. Elastomeere kasutatakse tööriistamaterjalina järjest rohkem, sest kompaundimisega on võimalik saada väga erinevaid mehaanilisi omadusi, nad on vastupidavad õliledele ja määretele ning nende töötlemine on metallidega võrreldes palju kiirem ja kulusäästlikum. Lisaks eeltoodule ei kahjusta elastomeerist tööriistad värvitud või poleeritud metallpindasid. Levinuimaks elastomeerseks tööriistamaterjaliks on polüuretaan PUR.

6.4. KERAAMIKA

Esimesed materjalid, mida inimkond õppis kasutama, olid ilmselt loodusliku päritoluga puit ja kivi. Avastus, et savist saab vormida esemeid, mis põletamisel kõvenevad, tähistab tõenäoliselt esimese tehismaterjali avastamist. Vanim teadaolev keraamiline ese – keraamiline kujuke pärineb paleoliitikumist 29 000...25 000 a eKr ning on leitud Tšehhist, Brno lähedalt. Enamik inimesi seostavad mõistet **keraamika** (*ceramics*) tarbe- ja ehituskeraamikaga: fajanss-, portselan- ja savinõude, sein- ja põrandaplaatide, telliste või muu sellisega. Tõepoolest, need keraamilised materjalid on inimajaloo jooksul olnud tähtsal kohal ja on seda, ka tänapäeval. Nende kõrval on XX.sajandil teiste keraamiliste materjalide seas esile kerkinud **tehnokeraamika** (*engineering ceramics*). Tehnokeraamika all mõeldakse raskesulavate ühendite baasil tööriista- ja eriomadustega konstruktsioonimaterjale. Sellega eristatakse tehnokeraamika ehituskeraamikast (tellised, põrandaplaadid, drenaažitorud jt) ja tarbekeraamikast (fajanss-, portselan- ja savinõud jt). Tehnokeraamikat kasutatakse lennukimootorites, katalüütilistes konverterites, sisepõlemismootorite süüteküünalde isolaatorites, soomusmaterjalides, tehisludes ja implantaatides, kiuna fiiberoptilistes seadistes, sensorites ja kontrollierites, kümnetes erinevates elektroonikaseadmetes jpt rakendustes, ilma milleta tänapäevast maailma oleks võimatu ette kujutada.

Üldiselt on keraamilised materjalid kõvad, haprad, kõrge sulamistemperatuuriga, väikese elektri- ja soojusjuhtivusega ja joonpaisumisteguriga, inertsed kemikaalide suhtes, termopüsivad, roomekindlad, suure elastusmooduliga ja survetugevusega (mis säilib ka kõrge temperatuuril).



Joonis 6.13. Teadaolevalt vanim keraamiline kujuke (a) *Dolni Věstonice* Veenus leiti 1925. a Brno lähedalt; nüüdisaegne tehnokeeraamika Si_3N_4 baasil (b)

6.4.1. Keraamika koostis, struktuur ja omadused

Keraamiliste materjalide koostisosadeks on põhiliselt rasksulavad ühendid (oksiidid, karbiidid, nitriidid jne), mille sulamistemperatuur on üle 1500 °C. Rasksulavate ühendite omadused olenevad kristallide omadustest ja nendevahelistest sidemetest, monokristallide omadused omakorda aatomsidemetest ja kristallivõre struktuurist. Keraamika sisaldab lisaks kristalsele faasile mõnevõrra amorfset faasi. Kristalse faasi sisaldus on vähemalt 30 %.

Rasksulavad ühendid jagatakse hapnikku sisaldavaiks ja hapnikku mittesisaldavaiks ning kombineerituiks, s.o nad koosnevad mitmest ühendist. Hapnikku sisaldavad rasksulavad ühendid on oksiidid.

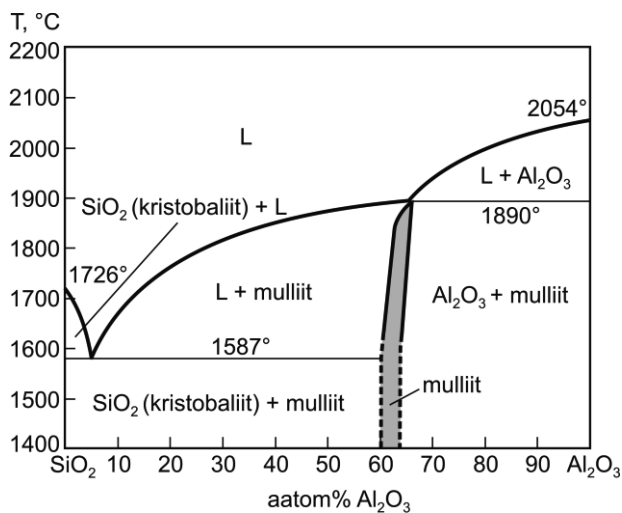
Tehnokeeraamikas kasutatavad hapnikku mittesisaldavad rasksulavad ühendid on karbiidid, boriidid, nitriidid ja silitsiidid.

Üleminekugrupi metallide rasksulavail ühendeil – karbiididel ja nitriididel on üldjuhul sisendustüüpi ruum- või tahkkesendatud kuupvõre või kompaktna heksagonaalvõre. Mittemetalli aatomid asetsevad metalli kristallivõres. Mittemetalli aatomite sisenemine metalliaatomi võresse kutsub esile tugevate keemiliste sidemete moodustumise metalli ja mittemetalli aatomite vahel, mis muudab oluliselt

komponentide füüsikalisi omadusi. Ühendeil on märksa kõrgem sulamistemperatuur, elastsusmoodul, kõvadus ja väiksem joonpaisumisetegur.

Keraamiliste materjalide kristallstruktuur erineb metallide struktuurist, sest kristallivõres on aatomid omavahel seotud ioon- või kovalentsidemetega ning vabad elektronid üldjuhul puuduvad. Seetõttu on keraamilised materjalid tavaliselt halvad elektrijuhid ja mitmed neist on nähtavas valguses kuigivõrd läbipaistvad. Kuna erinevalt metallidest moodustavad keraamika kristallivõre väga erineva aatomi-raadiusega aatomid, omandab aatomitevahelise ruumi suurus üliolulise tähtsuse. Keraamika kristallivõre on madalama pakketihedusega võrreldes metallidega, mis väljendub materjali väiksemas tiheduses.

Nagu metallidel, eksisteerib ka keraamiliste materjalide puhul polümorfism – sama keemilise koostisega aine võib olla erineva kristallivõrega. Kristallivõre oleneb temperatuurist ja rõhust. Näiteks SiO_2 võib esineda kvartsina, tridümiidina, kristobaliidina jpt erimitena (kokku 17 polümorfset erimit). Keraamiliste ühendite kombineerimisel moodustuvad keerukad mitmikühendid. Joonisel 6.14 on näitena toodud $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ faasidiagramm.



Joonis 6.14. Süsteemi $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ faasidiagramm

Keraamika haprus

Nii kristalse kui amorfse struktuuriga keraamilised materjalid on haprad. Klaasi puhul on hapruse põhjuseks selle amorfisus – puudub aatomite korrapärane paigutus. Si ja O on seotud tugevate kovalentsidemetega kolmemõõtmelisse struktuuri (ideaaljuhul on kristallivõre iga element tetraeedri kujuga, kusjuures iga räni aatom on seotud nelja hapniku aatomiga). Üldreeglina puuduvad struktuuris aatomtasandid, mis saaksid

teineteise suhtes libiseda. Väliste jõu rakendamisel tekib materjalis pinged, kuid dislokatsioonide nihke (ja plastse deformatsiooni) puudumise tõttu ei saa toimuda pingete leevenemist. Pinged, mis ületavad aatomitevahelised tõmbejõud, põhjustavad aatomsidemete katkemise ja prao tekke. Pragu algab reeglina materjali pinnal olevast mikrodefektist. Katkenud aatomsidemete tõttu langeb naabersidemetele veelgi suurem koormus. Selle tulemusena levib pragu pidurdamatult ja toob kaasa purunemise. Kristalset faasi sisaldavatele materjalidele on omased dislokatsioonid, kuid keraamika puhul toimub habras purunemine enamasti madalamal pingel, kui on vajalik plastse deformatsiooni esilekutsumiseks.

Keraamika sitkust, s.o vastupanu purunemiseks (prao arenemisele) on võimalik mõnevõrra suurendada, kasutades mõnda edaspidi esitatud võtetest. Näiteks **karastatud klaasi** (*tempered glass*) pinnakihti tekitatakse suured jääksurvepinged. Survepinged tekivad klaasi termotöötlusel, mis seisneb klaasi kiires allajahutamises õhujoas. Pinnakiht jahtub, kahaneb ja kõveneb. Kui klaasi siseosa mõnevõrra hiljem jahtudes samuti kokku tõmbub, tekivadki pinnakihis suured survepinged. Pragu saab pinnalt alguse vaid tõmbepinge olukorras. Tõmbepinge tekkimiseks peab väline jõud kõigepealt ületama pinnakihis mõjuva survepinge.

Kermiste (*cermets*) puhul on kõvad ja haprad keraamilised osakesed ümbritsetud sitke metallmaatriksiga, mis takistab pragude levikut ühest keraamilisest osakestest teise. **Keraamiliste komposiitide** (*ceramic composites*) puhul suurendatakse materjali sitkust, kontrollides faasidevaheliste piirpindade tugevust. Prao tekkimisel kujuneb suhteliselt nõrgemast faaside piirpinnast pragudele takistus – faaside piiril prao suund muutub või leeveneb prao tipus olev väga suur pinge piirpinnal seoses uute pindade tekkimisega. Selle tulemusel säilitab pragudeta materjaliosa oma töövõime.

Stabiliseerimine (*stabilization*) seisneb materjali selliste leegerivate lisandite sisseviimises, mis välistavad töötemperatuuri vahemikus keraamilise ühendi faasimuutused. Faasimuutustega kaasneks mahumuutused, mis omakorda tingiks soovimatute pingete tekkimise materjali sees. Sellised faasimuutustest tingitud pinged on eriti ohtlikud, kui keraamiline materjal töötab muutuval temperatuuril ja jahtumine või kuumenemine toimub kiiresti ja ebaühtlaselt.

Faasimuutusest tingitud sitkumise (*phase transformation toughening*) puhul takistab prao levikut prao tipus toimuv faasimuutus. Selleks viiakse keraamika koostisse ühendeid, mille faasimuutus kutsub esile uute pindade tekke, kusjuures sellega kaasnev mahumuutus on prao levikut pidurdava toimega.

Keraamika sitkuse tõstmine on võimalik, kasutades praeguseid tootmisprotsesse, peenemat tera, suuremat puhtust ja suuremat tihedust.

Tingituna kovalent- või ioonsidemetest on keraamilistele materjalidele omane väike sitkus ja suur survetugevus. Teoreetiliselt võiks keraamilistel materjalidel olla ka suur tõmbetugevus. Tegelikult on keraamika tõmbetugevus kordades väiksem kui survetugevus. Selle peamiseks põhjuseks on struktuuris leiduvad mikrodefektid. Mikrodefektide teke on seotud oksiidide jt keraamiliste ühendite kõrge sulamistemperatuuri ja väikese plastsusega.

Enamik keraamilisi materjale saadakse pulbermetallurgia meetodil ja lähtematerjalid on pulbri kujul (vt ka ptk 10). Osakesed paakuvad kokku tardolekus ning üldiselt sulafaasi ei teki. Olenemata pressiste saamisel rakendatud pressimissurvevõrrust jäävad pulbriosakeste vahele mikroskoopilised tühemikud – mikrodefektid, ning osa neist ei täitu paagutuse käigus. Pulbrite pind võib sisaldada kahjulikke, saastavaid lisandeid (mis tavaliselt satuvad sinna pulbrite segamise ja jahvatamise käigus) ning needki alandavad keraamika tugevusomadusi. Üldiselt on teoreetilise (100 %) tiheduse saavutamine äärmiselt keeruline ja paratamatult sisaldab keraamiline materjal alati suuremal või vähemal määral defekte (poorid, tühikud, mikropraod), mis toimivad pingekontsentratsioonitena. Keraamilistes materjalides plastseid deformatsioone ei esine ning seepärast tekib välise jõu rakendamisel mikrodefektide vahetus ümbruses väga suur pinget.

Materjali tundlikkust pingete kontsentratsioonile iseloomustab **purunemissitkus** (*fracture toughness*). Materjali iseloomustav kriitiline purunemissitkus K seostab omavahel defekti suuruse ja pinget järgmise valemi abil:

$$K = \alpha \sigma (\pi \cdot a)^{\frac{1}{2}}, \quad (6.1)$$

kus: α – ühikuta kujutegur,
 σ – mõjuv pinget,
 a – praod pikkus.

Purunemissitkuse ühikuks on $\text{N/mm}^2 \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$.

Kui võrratuse parem pool on väiksema väärtusega kui K , talub materjal koormust ilma purunemata. Purunemine toimub, kui defekti suuruse ja mõjuva pinget koostoimel ületatakse teguri K teatav kriitiline väärtus. Materjali koormust (maksimaalset lubatavat pinget) on võimalik tõsta ainult maksimaalse lubatava defekti suuruse vähendamise abil.

Keraamiliste materjalide tõmbetugevus on piires 20...200 N/mm^2 , mis on üle kümne korra väiksem kui nende survetugevus. Kuna võimalike defektide arv, kuju, asukoht ja suurus on erinevates detailides erinev, on samast materjalist sama tehnoloogia abil valmistatud detailid siiski erineva tugevusega. Keraamiliste detailide tugevus varieerub võrreldes metalsete materjalidega palju laiemas vahemikus. Kirjeldatud puudused

piiravad keraamiliste materjalide kasutust vastutusriikastes konstruktsioonides. Suuremat tõmbetugevust on võimalik saavutada nn defektivabade keraamiliste materjalide korral, kuid tavaliselt kaasneb sellega ülikõrge hind. Keraamiliste elementide liitmine (ühendamine) teiste konstruktsioonimaterjalidega on keerukas – kasutatakse difusioonkeevitust ja jootmist. Kuna keraamika ei ole üldjuhul lõike-töödeldav, kujuneb ka detailide lõplik kujutöötlus keerukaks ja kalliks. Seepärast pressitakse keraamiliste detailide toorikud võimalikult lähedase kujuga lõpptoote kujule.

Keraamiliste materjalide laiemat kasutust piirab nende suhteliselt kõrge hind. Tehnokeraamika hind on üldreeglina kordades kõrgem kui konkureerivate, sarnases rakenduses kasutatavate metallisulamite hind. Isegi arvestades nende suuremat vastupidavust ja pikemat kasutusaega, on keraamika kasutamise majanduslik otsustarbekus sageli küsitav. Kuna intensiivne uurimis- ja arendustöö on suunatud ülitugevate, ülisitkete ja odavamate keraamiliste materjalide väljatöötamisele, on oodata siiski nende materjalide laienevat kasutust tulevikus.

Paralleelselt toimub defektoskoopia meetodite arendamine eesmärgiga tuvastada keraamikas defektid suurusega 10...50 µm. Nende eesmärkide täitumisel võiks keraamika edukalt asendada mootorites, turboajamites, gaasiturbiinides, laagrites, pumpades ja klappides mitmeid seni kasutatavaid materjale (tööriistaterased, pinded, WC-Co kõvasulamid jmt).

Keraamilise automootori valmistamisest on unistatud juba aastaid. Kõrgemal temperatuuril töötades oleks võimalik oluliselt suurendada mootori kasutegurit. Mootori hõõrdekaod oleksid väiksemad ja täielikult saaks loobuda jahutusüsteemist (radiaatorist, veepumbast, jahutusvedelikust, ventilaatorist ja selle rihmaajamist). Tulemusena oleks võimalik vähendada kütusekulu kuni 30 %. Seni on see jäänud unistuseks, sest keeruka kujuga, kujutäpsete ja ühtlaselt defektivabade keraamiliste toodete suurseeriaviisiliseks valmistamiseks sobivat tehnoloogiat veel ei ole.

6.4.2. Keraamika liigitus

Keraamilisi materjale võib kasutusala järgi liigitada:

1. **Ehituskeraamika** (*building ceramics*) – tellised, katusekivid, vooderdusplaadid jt;
2. **Tarbekeraamika** (*whitewear*) – sanitaartehnikaseadmed, portselan- ja fajansstooted;
3. **Klaas ja klaaskeraamika** (*glass, glass ceramics*) – valgust läbilaskvate avade, vaheseinte ja piirete ehitamiseks ning klaastoodete valmistamiseks, kuumutus- ja optikaseadmed;

Tehnokeraamika (*engineering ceramics*) – tänapäevased tööriista- ja eriomadustega konstruktsioonimaterjalid.

Ehituskeraamika

Savikeraamika ja paljude keraamiliste toodete valmistamiseks kasutatakse toorainena savi. Savile lisatakse erinevas vahekorras kvartsi ja päevakivi. Päevakivi ehk põldpagu on looduses laialt levinud mineraalide rühm, mis sisaldab leelismetalle (Na, K), räni ja hapnikku. Komponentid segatakse sobivas vahekorras veega, vormitakse, kuivatatakse ja saadud toorikud põletatakse. Ehitusmaterjalidena kasutatavateks savikeraamilisteks toodeteks on näiteks savitellised, šamott-tellised, katusekivid, drenaažitorud.

Tarbekeraamika

Tarbekeraamika hulka kuuluvad sanitaartechnilised tooted (tualettpotid, kraanikausid jms), lauanõud, dekoratiivsed põranda- ja seinaplaadid, skulptuurid jne. Tarbekeraamika liigitatakse lähtematerjali, glasuuri olemasolu, põletustemperatuuri, värvi jt tunnuste alusel. Tarbekeraamika hulka kuuluvad veel tuntumatest materjalidest klinker (värvilisest savimassist, glasuurimata tumedavärvilised ilmas-tiku- ja happekindlad keraamilised tooted), fajanss (heledast või valgest savist glasuuriga kaetud keraamika), portselan (traditsiooniliselt kõige väärtuslikumaks peetav keraamika liik, valmistatud valgest savimassist, kaetud enamasti läbipaistva glasuuriga ning põletatud kuumusel kuni 1500 °C).

Klaas ja klaaskeraamika

Klaas on homogeense koostisega põhiliselt amorfne tahkis, mis tavaliselt tekib sobiva viskoossusega sulanud materjali kiirel jahtumisel (korrapärane kristallivõre moodustub osaliselt). Enamik klaase põhinevad ränioksiidil (SiO₂). Selle sulamistemperatuur on väga kõrge – umbes 2000 °C. Sulamistemperatuuri alandamiseks lisatakse soodat (naatriumkarbonaati Na₂CO₃) või potast (kaaliumkarbonaati K₂CO₃). Selle tulemusel alaneb klaasi sulamistemperatuur umbes 1000 °C-le. Kuna sooda muudab klaasi vees lahustuvaks, seega enamikus rakendustes kasutuskõlbmatuks, lisatakse veel lubjakivi (kaltsiumkarbonaat (CaCO₃)) või dolomiiti (MgCO₃). Tavalisem klaas on **sooda-lubiklaas** (*soda-lime glass*), mille koostises on 60...75 % SiO₂, 12...18 % Na₂CO₃ ja 5...12 % CaCO₃.

Klaasile on enamasti tema omaduste muutmiseks lisatud ka teisi lisandeid. Pliioksiidi (PbO₂) sisaldav pliiiklaas on säravam, sest tal on suurem murdumisnäitaja. Boori võidakse lisada selleks, et muuta klaasi termilisi ja elektrilisi omadusi, näiteks *Pyrex*-klaasi puhul. Ka baariumi lisamine suurendab murdumisnäitajat. Sooda või potase sisalduse suurendamist kasutatakse mõnikord sulamistemperatuuri täiendavaks alandamiseks. Mangaani lisamisega on võimalik vabaneda ebasoovitavatest

värvustest. Lisandite sisseviimine sulaklaasi on levinud meetod klaaside värvimiseks (näiteks koobalt – sinise klaasi, kolloidkuld – punase “rubiinklaasi” saamiseks).

Klaas on pehme ja kergesti vormitav kuumalt, tardolekus on klaasi survetugevus tõmbetugevusest palju suurem. Lisaks iseloomustab klaasi suur keemiline stabiilsus ja inertsus enamike kemikaalide suhtes. Klaasist valmistatakse hoonete ja sõidukite aknaklaase, klaaspudeleid vedelike säilitamiseks, hõõgpirnide klaase, peegleid, läätsesid. Klaaskiududest valmistatakse soojusisolatsioonmaterjale. Klaasil on ka palju spetsiifilisi rakendusi: klaaskiud fiiberoptikas, klaaskiud komposiitmaterjalide armatuurina, kuumuskindlad klaasnõud. Klaasil on palju rakendusi meditsiinis ja bioloogias. Näiteks biosobilikud klaasid ei põhjusta kudede äratõukereaktsiooni, imenduvad organismis aja jooksul, toetades naturaalse (luu)koe moodustumist. Klaas- ja keraamilist kiudu kasutatakse ka filtermaterjalina, milles kasutatakse nende keraamilist inertsust ja termopüsivust. Varasemalt on olnud laialdaselt kasutusel klaasist elektrisolaatorid, kuid tänapäeval on levinumad keraamilised isolaatorid, mis tagavad parema isolatsiooni ja on mehaaniliselt tugevamad.

Klaasi purunemisel tekkivaid kilde iseloomustavad sujuvalt kaarduvad murdepinnad, kuna amorfsetes materjalides puuduvad eelistasandid (erinevalt monokristallidest – vrld vilk, monokristalne räni), mida mööda materjal lõheneks.

Klaasi eelis on tema taas- ja korduvkasutatavus. Tootjad kasutavad uue klaasi tootmisel võimalikult palju kasutatud klaasi või klaasipuru, sest klaas ei kaota taaskasutuses oma kirkust või puhtust. Lisaks võimaldab taaskasutatava klaasi kasutus alandada ahju temperatuuri ja säästa energiat.

Klaaskeraamika põhineb enamasti Si-, Al- ja Li-oksiididel, mis sisaldavad nii kristalset kui amorfset faasi. Kristalse ja amorfse komponendi suhte varieerimisega saab varieerida soojuspaisumist, sh valmistada materjale väga väikese joonpaisumiteguriga.

Klaaskeraamika valmistamisel töödeldakse seda esmalt nagu klaasi ja seejärel termotöödeldakse seda sulamistemperatuurilähedasel temperatuuril. Protsessi nimetatakse klaasi **kristallumiseks** (*devitrification*) – s.o protsess, mille käigus amorfne materjal (klaas) transformeerub (mikro)kristalseks. Kuna materjal moodustub klaasist, puuduvad keraamikale omased mikrodefektid ja poorid, millest purunemisel saavad alguse praod. Klaaskeraamika tugevus ületab tunduvalt tavalise klaasi tugevust. Ta talub korduvaid ja kiireid temperatuurimuutusi, on väikese soojusjuhtivusega ja võib hästi läbi lasta infrapunast kiirgust.

Kommertsiaalne klaaskeraamika näiteks on *Ceran*[®], millest on valmistatud keraamilised pliidiplaadid. *Zerodur*[®], mille joonpaisumistegur $0,01...0,02 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ (võrdluseks harilikul klaasil $9 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$) leiab kasutust ülitäpsetes optikaseadmetes, näiteks teleskoopide peeglite valmistamiseks.

Tehnokeraamika

Samas on tehnokeraamilised materjalid väga erinevate omadustega olenevalt nende koostisest ja valmistamise tehnoloogiast. Nende seas on häid elektrijuhte (keraamilised ülijuhid) kui ka peaaegu ideaalseid dielektrikuid. Tänu eriti puhaste (puhtusega $> 99,99 \%$) ja ülipeenete pulbrite ning kuumpressimise kasutamisele on viimastel aastakümnetel saadud piisavalt heade mehaaniliste omadustega (tugevus, löögisiskus) **konstruktsioonikeraamikat** (*structural ceramics*), mis on teinud nad konkurentsivõimelisteks ja mõningates olukordades (kõrged temperatuurid, agressiivsed keskkonnad) asendamatuks materjalideks väga suurel koormusel.

Kui klaas ja klaastooted moodustavad keraamiliste materjalide (v.a ehituskeraamika) turu rahalisest mahust umbes poole, siis tehnokeraamika (tuntud ka nuudiskeraamikana), sh konstruktsioonikeraamika, elektro- ja magnetkeraamika moodustavad keraamilistest materjalidest umbes 20 %. Tarbekeraamika turuosa on 20 %, jagunedes umbes võrdselt fajanss- ja portselankeraamika vahel. Muud savil põhinevad konstruktsioonimaterjalid täidavad ülejääva osa (10 %) keraamikast.

6.4.3. Tehnokeraamika

Tehnokeraamikat liigitatakse mitmeti. Enam tuntud liigitamise alus on keemiline koostis. Keemilise koostise järgi jaotatakse tehnokeraamika kahte gruppi: oksiid- ja mitteoksiidkeraamika (Joonis 6.15).

Joonisel 6.15 on esitatud keraamiliste materjalide kõvadus võrdluses teiste levinud konstruktsioonimaterjalidega. Mitteoksiidkeraamika liigitatakse omakorda metalli sisaldavaks ja metalli mittesisaldavaks. Suurima kõvadusega on süsiniku allotroopne teisend – teemant.

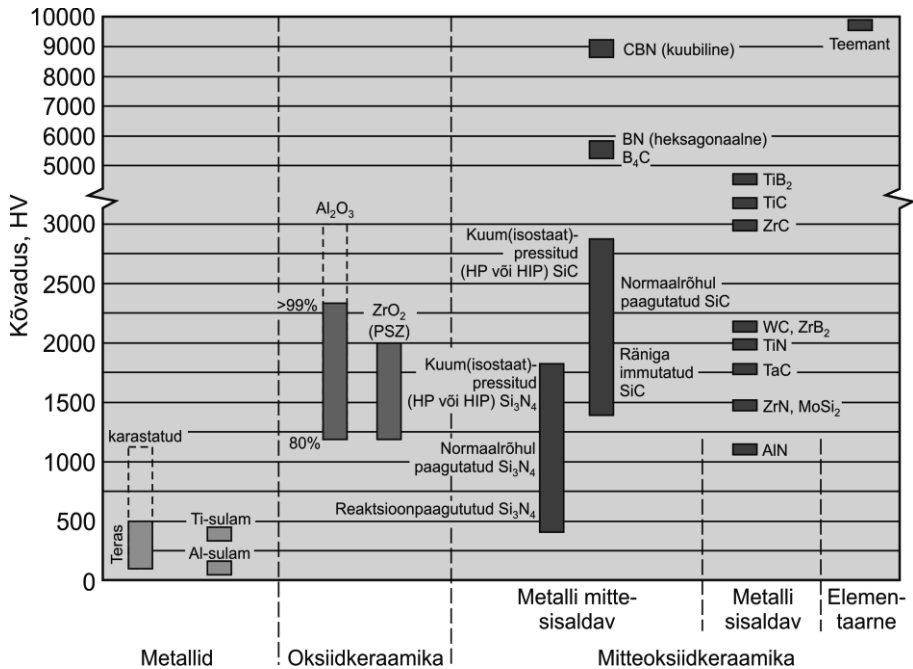
Tehnokeraamika üldised positiivsed omadused on:

- suur kuumuspüsivus (oksüdeerumiskindlus) ja termopüsivus (keemilise koostise stabiilsus),
- hea korrosioonikindlus,
- suur kõvadus ja kulumiskindlus,
- väike tihedus.

Tehnokeraamika puudused on:

- väike painde- ja tõmbetugevus,
- suur haprus,
- omaduste suur hajuvus,

- halb töödeldavus,
- kõrge hind.



Joonis 6.15. Tehnokeraamika liigitus ja kõvadus (võrdluseks metallsed materjalid)

Tehnokeraamiliste materjalide hulka kuuluvad räninitriid, ränikarbiid, tsirkooniumoksiid, alumiiniumoksiid, sialoon, boorkarbiid, boornitriid, titaanboriid ja keraamilised komposiidid (näiteks keraamiliste kiududega armeeritud klaas-, klaaskeraamiline või keraamiline maatriks).

Alumiiniumoksiid Al₂O₃ (*alumina*) ehk korund on tehnokeeraamikas levinuim materjal. Materjali iseloomustab suur survetugevus ja kõvadus (säilivad kuni 1400 °C), abrasioonikindlus, väike tihedus, suur elektritakistus ning suhteliselt madal hind. Alumiiniumoksiidi puudusteks on väike sitkus ja tõmbetugevus, piiratud vastupanu termolöögile ja agressiivsetele kemikaalidele. Kõrge sulamistemperatuuri tõttu toimub materjali valmistamine ja töötlemine pulbertehnoloogia abil.

Räninitriid (*silicon nitride*) ja **ränikarbiid** (*silicon carbide*) on väga heade tugevusomaduste, ülisuure kõvaduse, keskmise sitkuse, hea soojusjuhtivuse, väikese soojuspaisumise ja suure termolöögikindlusega keraamilised materjalid. Lisaks on mõlemad väikese tihedusega ja suure korrosioonikindlusega. Neid kasutatakse suurtel koormustel ja kõrgetel temperatuuridel töötavate osade, näiteks generaatorite labade valmistamiseks, kus räninitriid asendab edukalt Ni ja Co baasil supersulamleid.

Boorkarbiidi (*boron carbide*) kõvadus jääb alla vaid teemandile ja kuubilisele boornitriidile. Suur elastusmoodul, suur survetugevus ja väike tihedus võimaldavad boorkarbiidi kasutada kergsoomusmaterjalide valmistamiseks.

Sialoon (*sialon*) on räninitriidi, alumiiniumoksiidi ja oksinitriidi sulam ja tema omadused olenevad eelkõige kahest esimesest koostisosast: suurem Al_2O_3 sisaldus suurendab kõvadust, Si_3N_4 seevastu parandab sitkust. Sialoon on väga suure painde- ja tõmbetugevusega, ülisuure kõvadusega ja umbes sama tihedusega nagu alumiinium. Materjal on korrosiooni- ja kulumiskindel ning vastupidav termolöökidele. Sialoon on hea elektriisolaator ning säilitab oma tugevuse kuni $1400\text{ }^\circ\text{C}$. Sialoonil on hea mõõtmestabiilsus, sest tema joonpaisumistegur on terasega võrreldes kolm korda ja plastidega võrreldes kümme korda väiksem. Nagu teised keraamilised materjalid, puruneb sialoon hapralt.

Tsirkooniumoksiid (*zirconia*) on enamiku metallide suhtes inertne ja kasutatav kuni $2000\text{ }^\circ\text{C}$. Ütriumi, kaltsiumi ja magneesiumoksiidi abil stabiliseeritud tsirkooniumoksiidil on võrreldes stabiliseerimata tsirkooniumoksiidiga suurem sitkus ja paindetugevus. Tsirkooniumkeraamikat iseloomustab suur termolöögikindlus, paindetugevus, madal hõõrdetegur ja suur korrosioonikindlus. Faasimuutuse abil sitkestatud tsirkooniumoksiid on veelgi suurema sitkusega; selle põhjuseks on keraamilises maatriksis jaotunud dispersne faas, mis on metastabiilne – prao tipus mõjuvate mehaaniliste pingete tagajärjel toimuv faasimuutus tekitab suurema ruumalaga stabiilse faasi, mis sulgeb prao (või takistab selle levikut).

Tehnokeraamikat iseloomustab suur tugevus ja kõvadus, suhteliselt suur purunemissitkus, vastupidavus kemikaalidele ja kõrgetele temperatuuridele, peen mikrostruktuur, olematu või üliväike poorsus.

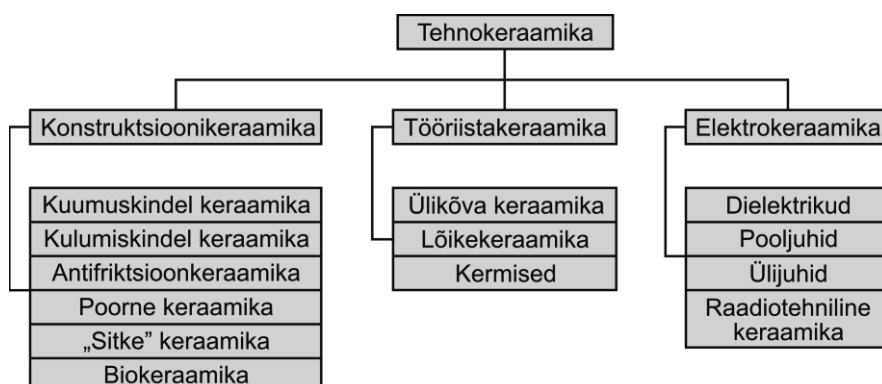
Tabelis 6.6 on esitatud levinumad tehnokeeraamika mehaanilised omadused

Tabel 6.6. Tehnokeraamika omadused

Omadus	Al ₂ O ₃	ZrO ₂	Si ₃ N ₄	AlN	SiC	B ₄ C
Tihedus, g/cm ³	3,8	6,05	3,2	3,3	3,2	2,5
Kõvadus HV	2000	1350	1600	1200	2500	3000
Survetugevus, N/mm ²	2500	2000	2800	2100	2700	2600
Paindetugevus, N/mm ²	500	1400	900	400	600	400
Elastsusmodul, N/mm ² · 10 ³	320	250	320	310	450	450
Purunemissitkus, N/mm ² · m ^{1/2}	4	10	7	6	4	3
Max. tööt temperatuur, °C	1900	2000	1100	1000	1600	1500
Joonpaisumistegur, 1/K · 10 ⁻⁶	8	11	3,4	5,6	5,8	
Soojusjuhtivustegur, W/ m · K	29	2	35	180	180	45
Eritakistus, Ω · mm ² /m	1 · 10 ¹²	1 · 10 ⁷	1 · 10 ¹¹	1 · 10 ¹²	1 · 10 ² ... 10 ⁷	0,2 · 10 ⁻²

Tehnokeraamika rakendused on erinevad: kulumiskindlad lõikeinstrumendid (stantsid, templid, matriitsid), mootorite osad (laagrid, tihendid, klapid), soojusvahetite osad, gaasiturbiinide osad, kõrgtemperatuursete seadmete (ahjud, pumbad, ajamid) osad. Poorset tehnokeeraamikat kasutatakse katalüütilistes protsessides substraadina (kasutatakse sõidukite heitgaasidest kahjulike gaasiliste lisandite püüdmiseks) ja kõrgtemperatuursete filtritena (sulametalli filtreerimiseks).

Joonisel 6.16 on toodud tehnokeeraamika liigitus (3 põhilist gruppi): konstruktsiooni-keeraamika, tööriistakeeraamika ja elektrokeeraamika.

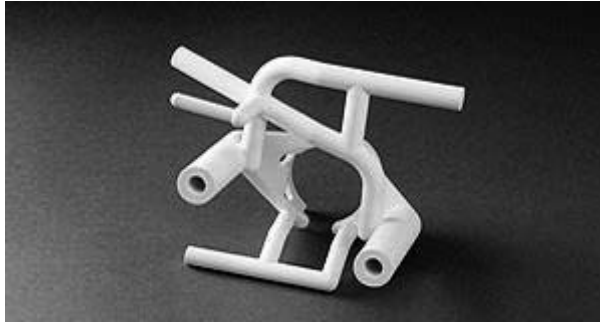


Joonis 6.16. Tehnokeraamika liigitus kasutuse järgi

Konstruksioonikeraamika

Kuumuskindel keraamika (*refractory ceramics*) on keraamiline materjal, mida iseloomustab suur tugevus ja keemiline stabiilsus temperatuuril üle 500 °C. Enamik neist põhineb stabiilsetel oksiididel. Sageli on jämeteralised oksiidiosakesed materjalis seotud peeneteralise termostabiilse ühendi abil. Kõrgtemperatuursetes rakendustes kasutatakse sageli karbiide, nitriide ja boriiide. Kuumuskindlad materjalid on kõrge sulamistemperatuuriga, suure tugevusega ka kõrgel temperatuuril, keemiliselt stabiilsed, väikese soojusjuhtivuse ja joonpaisumisteguriga, roomekindlad ja vastupidavad termolöökidele (vastupidavad kiirete temperatuurimuutustega kaasnevatele materjalikahjustustele).

Kuumuskindlad keraamilised materjalid jaotatakse happelisteks, aluselisteks ja neutraalseteks. Tavaline kuumuskindel happeline keraamika põhineb kvartsil (SiO_2) ja alumiiniumoksiidil (Al_2O_3). Nende baasil ja vastavate lisandite abil on neist võimalik saada suure mehaanilise tugevuse, kõvaduse ja kuumuspüsivusega detaile. Näiteks kosmosesüstikute termokaitse on ehitatud lõiketöödeldavast ränioksiidkeraamikast. Kuumuskindel aluseline keraamika põhineb sageli magneesiumoksiidil (MgO). Aluselised materjalid on happelistest kallimad, kuid on mõnevõrra suurema keemilise stabiilsusega. Aluselisi okside kasutatakse sageli metallurgias, sest nende sobivus metallidega on parem (rübud ja keskkond on enamasti aluselised). Neutraalseid keraamilisi ühendeid (Cr_2O_3) kasutatakse happeliste ja aluseliste keraamiliste materjalide eraldamiseks, sest kokku puutudes toimuks vastastikku lagundav reaktsioon. Happelise ja aluselise keraamika kasutamine koos on mõnikord vajalik, sest näiteks keemiliste reaktorite sisemine vooder võib olla tehtud kallimast aluselisest oksiidist, odavamast happelist keraamikast on kasutatud vajaliku tugevuse ja isolatsioonikihi loomiseks. Kuumuskindla keraamika hulka kuulub SiC (suur abrasiivkulumiskindlus), ZrO_2 , lõõmutatud SiO_2 , (kuni temperatuurini 1450 °C) ja süsinik või grafiit (seda ei märga enamik metalle ja räbusid). Kuumuspüsivat ehk tulekindlat keraamikast kasutatakse tööstuslike ahjude, tiiglite ja valukoppade voodrite valmistamiseks, erinevate tööstuslike sünteesireaktorite voodrina, keemia- ja metallurgiatööstuses kasutatavate kuumade gaaside torustike, suitsutorude jms valmistamiseks, metallivormide ning kärnide jms valmistamiseks (vt. Joonis 6.17)



Joonis 6.17. Metalli survealus kasutatav keerulise kujuga keraamiline kärn vastava siseõõnsuse saamiseks metallvalandis (*Core Tech Inc.*)

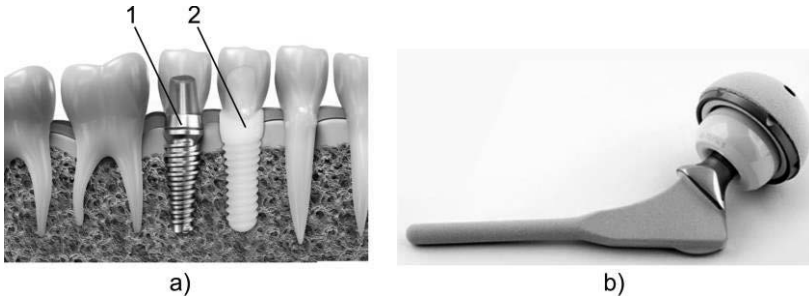
Kuumuskindlast keraamikast toodete kuju varieerub lihtsast väga keerukani, pinnetest kuni kiudmaterjalideni. Termoisolatsiooniks kasutatavate kuumuskindlate elementide struktuur on poorne ning nad paiknevad üldiselt teise kihina keemiliselt inertse keraamilise voodri taga. Kogu kuumuskindlate materjalide turust haarab tänapäeval umbes poole monoliitne ehk põletamist mittevajav kuumuskindel keraamika. Säärast monoliitkeraamikat kasutatakse sageli induktsioonahjude voodrite valmistamiseks. Keraamiline materjal kantakse kuuma tiigli või valukopa sisepinnale pulbri või graanulina sulatustevahelisel ajal. Puudub vajadus ahju mahajahutamiseks ja taas üleskuumutamiseks. Selline keraamiline vooder on ilma liitekohtadeta, selle remont on lihtsam ja puudub vajadus materjali põletamiseks. Sellest tuleneb oluline kulude kokkuhoid.

Ültermostabiilne keraamika (*ultra-high temperature ceramics*) on keraamika, mille sulamistemperatuur on kõrgem kui 3000 °C. Sellised keraamilised materjalid on mitmed üleminekurühma kuuluvate metallide (nioobium, tsirkoonium, tantaal ja hafnium) ühendid (boriidid, karbiidid ja nitriidid). Materjali ülikõrget termilist stabiilsust on vaja näiteks tiiglite ja valukoppade valmistamiseks kõrge sulamistemperatuuriga metallide sulatamisel, elektriarsulatusel elektroodides, lennunduses ja kosmosetehnoloogia materjalide puhul (süstikute termobarjäärelemendid, turboreaktiivmootorite ja raketimootorite detailid). Boriididel on kõrge sulamistemperatuur, elastusmoodul ja kõvadus, sealjuures hea elektri- ja soojusjuhtivus. Karbiididel on üldjuhul veelgi kõrgem sulamistemperatuur, kuid halvem elektri- ja soojusjuhtivus. Nii boriidide kui ka karbiidide baasil keraamil on märksa väiksem tihedus võrreldes alternatiivsete kuumuspüsivate metallide ja nende sulamitega (Nb, Mo, Ta, W ja Rh).

Biokeraamika

Lisaks eespool mainitud rakendustele leiavad keraamilised materjalid järjest enam kasutamist implantaatides, tingituna nende **biosobilikkuse** (*biocompatibility*) tõttu.

Biokeraamikast (*bioceramics*) implantaatide vastupidavus kunstliigese materjalina on vähemalt 20 aastat. Biosobivaid keraamilisi materjale kasutatakse luude ja liigeste asendamiseks ning hambaimplantaatide valmistamiseks (vt Joonis 6.18).



Joonis 6.18. Biokeraamika: a – hambaimplantaat (1 – metallkeraamiline (alumine osa Ti-sulam), 2 – täiskeraamiline CeraRoot® hambaimplantaat); b – keraamilise hõõrdpinnaga liigeseimplantaat

Tööriistakeraamika

Suure kõvaduse tõttu nii normaal- kui kõrgetel temperatuuridel ning keraamika inert- suse tõttu metallide suhtes kasutatakse **tööriistakeraamikat** (*tool ceramics*) mitmesuguste metallilõikeinstrumentide valmistamiseks. Abrasiivlõikeketaste valmis- tamiseks on levinud räninitriid. Kermiseid (eriti WC baasil Co sideainega kõva- sulamid) kasutatakse survetöötles templite ja matriitside valmistamiseks alter- natiivina tööriistaterastele. Tööriistateraste ja kermiste pinda tugevdatakse vajadusel, kasutades õhukesi keraamilisi sadestatud pindeid (PVD pindeid). Keraamiline pinne eraldab lõikeprotsessis lõiketöödeldava metalli ja tööriista terase (või metallsideaine kermises) ja välistab nende vahel toimuva reaktsiooni või difusiooni.

Lõikekeraamikat (*cutting-tool ceramics*) 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 sitkusega.

Räninitriid, boornitriid, kuubiline boornitriid ja polükristalne teemant on põhilised keraamiliste terikute materjalid, mille kasutamine võimaldab oluliselt alandada hõõr- detegurit, vähendada tööriista kulumist ja kasutada veelgi suuremat lõikekiirust. Nüüdisaegsete keraamiliste lõiketööriistade abil on võimalik lõikekiirust oluliselt suurendada: 60 m/min asemel tõsta seda kuni 1500 m/min. Nende nn ülikiir- lõikematerjalide terikutena kasutamise eelduseks on praegusaja metallilõikepingid: täpselt tasakaalustatud kiirspindlid, kinnituspadrunid, mis taluvad suurtel pööretel tekkivaid tsentrifugaaljõudusid, laastueemaldust (peab tagama kiirlõikamisel tekkiva suure laastukoguse eemaldamise lõiketsoonist).

Kuna keskkonnakaitse nõuded pidevalt karmistuvad, püütakse rohkem kasutada kuivlõiketöötlust, kasutades võimalikult vähe või loobudes täielikult jahutus- ja määrdevedelikest. Kuivlõiketöötlemiseks sobivad keraamilised terikud võrreldes teiste lõikeinstrumentideks kasutatavate materjalidega kõige paremini. Joonisel 6.18 on näidatud erinevate lõiketöötlustööriistade materjalide sitkuse ja kõvaduse võrdlus.

Kermisteks (*cermets*) nimetatakse suure kõvadusega rasksulavate ühendite (oksiidide, karbiidide, nitriidide jt) baasil pulbermetallurgilisel teel valmistatud konstruktsiooni- ja tööriistamaterjale. Kermised on keraamilis-metalsed komposiidid. Kermiste sideainena kasutatakse kõrge sulamistemperatuuriga metalle – koobaltit, niklit, molübdeeni. Kermistes on ühendatud keraamika suur kõvadus ja termopüsivus metallidele omase suure sitkuse ja termolöögikindlusega ning nad on suure kõvaduse ja kulumiskindlusega.

Kermiste tootmisel on pulbermetallurgia peamised eelised traditsiooniliste tehnoloogiatega võrreldes materjalide kokkuvõid (pulbertooted ei vaja olulist mehaanilist töötlust sellega kaasneva laastueraldamisega) ning tehnoloogia lihtsus-tumine (ka keerukate toodete valmistamisel suhteliselt väike tehnoloogiliste etappide arv) (vt ptk 10). 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. Volframkarbiidkermistes on armatuuriks WC, sideaineks tavaliselt koobalt, mille sisaldus varieerub 2...40 % (tavaliselt 5...25 %). Volframkarbiidil põhinevaid kermiseid nimetatakse **kõvasulamiteks** (*hardmetals*). Kõvasulamid leiavad kasutust lõikeinstrumentide terikutena metallide ja malmide lõiketöötlemisel, kulumiskindlate lõiketerade ja veskite tööelementide valmistamiseks, suurt kulumiskindlust nõudvate düüside valmistamisel jmt rakendustes, milles on nõutav suur materjali kõvadus, arvestatav sitkus ja termopüsivus. Põhikomponent WC on karbiididest oluliselt suurema elastsusmooduliga ja suhteliselt suure sitkusega. Volframkarbiidi sisaldavad materjalid on enamasti suure tugevusega, näiteks ainult WC ja Co baasil valmistatud kermiste paindetugevus on vahemikus 1200...2000 N/mm². Samal ajal on nende kuumuspüsivus 800...900 °C ja kõvadus 85...90 HRA, millest tingituna on nende kasutamine suurtel lõikekiirustel ja intensiivse kulumise tingimustes piiratud. Nende peamine kasutusvaldkond on habraste metallisulamite (malm, pronks jne) ja rasktöödeldavate teraste (kõrgleegeritud, roostevabad jne) töötlemine. Titaankarbiidkermistes on sideaineks nikkel või raud, armatuuri moodustab titaankarbiid ning selle korrosioonikindlus on võrreldes WC-Co kermisega tunduvalt suurem. Lisaks TiC-kermistele kasutatakse kermiseid ka TaC ja Cr₂C₃ baasil.

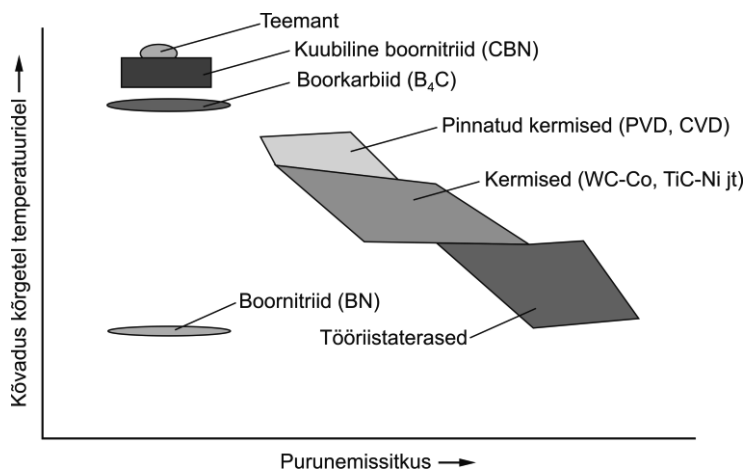
Kermiste kasutamist piirab asjaolu, et neist valmistatud terikud on suhteliselt lihtsa kujuga ning ei sobi kasutamiseks keerulise konstruktsiooniga lõikeriistade

valmistamiseks. Pealegi on materjalid pärast paagutamist suure kõvadusega, nii et edaspidine töötlemine on keerulisem ja kallim kui kiirlõiketerastest analoogsete tööriistade töötlemine.

Abrasiivid. Väga suure kõvaduse tõttu kasutatakse keraamilisi materjale sageli abrasiividena ja abrasiivtööriistade valmistamiseks. Levinuimateks abrasiivideks on ränikarbiid (SiC) ja alumiiniumoksiid (Al_2O_3). Abrasiivtööriistad liigitatakse: vaiksetatud (näiteks lihvkettad, käiad), pinnatud (näiteks liivapaber) ja puistematerjali kujul (abrasiiv-pinnatöötluks, vesi-abrasiivlõikuseks). Volframkarbiidi (WC) kasutatakse suurt abrasiivsust nõudvates rakendustes. Veel suurema kõvadusega on teemant ja kuubiline boornitriid, mida kasutatakse pinnaviimistlusoperatsioonides eriti kõvade materjalide töötlemisel.

Kõvapinded. Kõvade keemiliste ühendite baasil on arendatud välja arvukalt pindeid, sh erinevaid emaile ja glasuure, aga ka kõrgtehnoloogilisi termobarjäärpindeid ja kõvapindeid. Viimaste hulka kuuluvad muuhulgas õhukesed kõvapinded, mida kasutatakse tänapäeval laialdaselt lõikeinstrumentide (puurid, freesid, stantside templid) pinna tugevdamiseks ja nende kulumiskindluse tõstmiseks. Õhukesed kõvapinded kantakse alusmaterjalile **füüsikalise aursadestuse** (*physical vapor deposition*) ehk PVD meetodil ning nad põhinevad tavaliselt metallide nitriididel (enamlevinud PVD pinded on TiN , TiAlN , CrTiN) või karbonitriididel (TiCN , TiAlCN) (vt. ptk. 13).

Termobarjäärpinded kantakse tavaliselt kõrgetel temperatuuridel töötavatele masinuosadele (näiteks gaasiturbiinmootori labad) eesmärgiga vähendada detaili sisenevat soojusvoogu, alandades selle töötemperatuuri ja kaitstes alusmaterjali oksüdeerumise ja termolõökide eest. Pinne on reeglina mitmekihiline, kuid selle pealne kiht on üldjuhul keraamiline kiht. Levinuimaks termobarjäärpindematerjaliks on **ütriumiga stabiliseeritud tsirkooniumoksiid** (*yttria stabilized zirconia*) YSZ. Jooniselt 6.19 nähtub pinnatud tööriistmaterjalide eelis (kõvadus) võrreldes mittepinnatutega.



Joonis 6.19. Lõiketööriistade materjalide kõvaduse ja sitkuse võrdlus.

Elektrokeraamika

Mõnedel keraamilistel materjalidel on huvipakkuvad elektrilised ja magnetilised omadused – on tuntud **elektrokeraamikana** (*electroceramics*). Näiteks SiC leiab kasutust takistites ja elektriühjude kuumutuselementides. Mõned teised keraamilised materjalid (ZnO, MgB₂) on pooljuhid ning neid kasutatakse elektroonikas (alaldid, trafod). Leidub materjale, mis on piesoelektrilised (muudavad elektrivälja toimel oma kuju ning neid kasutatakse mikrofones, andurites, sondides), ferroelektrilised ja dielektrilised. Dielektrilistest keraamilistes materjalidest on tuntuimad baariumtitaanaat (BaTiO₃) ja pliiütanaat (PbTiO₃). BaTiO₃ on ühtlasi piesoelektriline materjal, mida kasutatakse kondensaatorites, mikrofones ja sondides. Keraamiliste kondensaatorimaterjalide peamine komponent on titaanoksiid (TiO₂).

Elektriisolaatorite valmistamiseks kasutatakse enamasti suure tihedusega savil põhinevaid keraamilisi materjale – näiteks Al₂O₃ automootorite süüteküünalde isolaatorite valmistamiseks. Magnetmaterjalidena on tuntumad ferriidid – Fe₂O₃ jt metallioksiidide baasil materjalid.

Järjest enam koguvad tähelepanu kõrgetemperatuursete keraamilised ülijuhid. Kriitilisest temperatuurist T_c madalamal temperatuuril kaob materjali elektritakistus ja ilmneb *Meissneri* efekt – magnetväli ei suuda ülijuhti tungida, ta muutub ideaalseks diamagnetikuks. Esimene taoliste ülijuhtide hulka kuuluv aine LaBa₂Cu₃O_{7-x} (muutub ülijuhiks kriitilisel temperatuuril 35 K) avastati 1986. a. Tänapäeva enim uuritud kõrgetemperatuurne ülijuht on YBa₂Cu₃O_{7-x}, mille kriitiline temperatuur on 93 K (–180 °C). On teada veelgi kõrgema kriitilise temperatuuriga ülijuhtivad materjalid, kuid ükski neist (stabiilsete ja kontrollitavate omadustega materjalide hulgas) ei ole ülijuhtiv toatemperatuuril.

6.5. KOMPOSIITMATERJALID

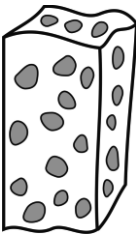
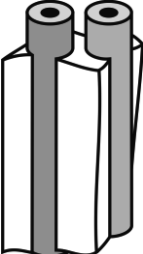
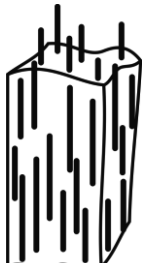
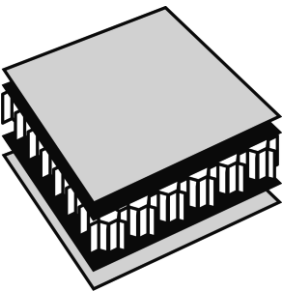
Komposiitmaterjalideks (*composite materials*) ehk **komposiitideks** (*composites*) nimetatakse kahest või enamast osast – faasist – materjale, kusjuures faaside omadused on selgelt erinevad ja nende paigutus (suund, jaotustihedus) kontrollitav. Komposiitmaterjal on heterogeenne ning tal on teatavad erilised omadused (või omaduste kombinatsioon) – näiteks jäikus, tugevus, kuumustugevus, korrosiooni-kindlus, magnetilised omadused jm, mida ei ole koostisse kuuluvatel faasidel eraldi.

Mehaanilist koormust kandvates komposiitmaterjalides on tavaliselt üks faasidest kõva ja tugev ning teine plastne ja elastne. Kõva faasi nimetatakse **armatuuriks** ehk **sarruseks** (*reinforcement*) ja plastset **maatriksiks** (*matrix, binder*). Armatuur annab komposiitmaterjalile tugevuse, jäikuse ja tagab mehaaniliste omaduste säilimise tööolukorras (kõrgel või madalal temperatuuril, agressiivses keskkonnas jne). Komposiitmaterjali põhiosa on üldjuhul maatriks, mis koos armatuuriga võtab vastu välisjõu. 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 omadused on enamasti määratud järgmiste mõjuritega: (1) koostisse kuuluvate faaside omadustega, (2) vastavate faaside suhtelise osaga (suhtosaga materjali mahust), (3) armatuuri suuruse, kuju ja jaotusega, (4) faaside orientatsiooniga ning (5) faasidevahelise sideme tugevusega.

6.5.1. Komposiitmaterjalide liigitus armatuuri järgi

Armeerivate elementide kuju järgi liigitatakse komposiitmaterjalid järgmiselt: pulberarmatuuriga, kiudarmatuuriga (diskreetsed või pidevad kiud) ja kihtarmatuuriga. Vastav skeem on esitatud Joonisel 6.20, kuid liigituse aluseks olevaid põhimõtteid on teisigi (valmistusmeetod, maatriksi koostis, kasutusotstarve).

Pulberarmatuuriga (Particle reinforced)		Kiudarmatuuriga (Fiber reinforced)		Kihtarmatuuriga (Laminate reinforced)		
Armatuuriks suured osakesed (Coarse grain reinforcement)	Dispersne armatuur (Dispersion reinforcement)	Pidevarmuur (Continuous reinforcement)	Diskreetne armatuur (Short fiber reinforcement)	Plaatjas armatuur (Laminate reinforcement)	Sändvitš-tüüpi (Sandwich Panels)	
						

Joonis 6.20. Komposiitide liigitus armeerivate elementide kuju järgi

Pulberarmeeritud komposiidid

Pulberarmeeritud komposiidid koosnevad diskreetsetest osakestest ja neid osakesi siduvast maatriksist. Sellise komposiidi näiteks võib olla betoon: see koosneb liiva ja killustikuosakestest, mis on seotud hüdraatunud tsemendi abil. Teedehituses kasutatav asfalt on samuti komposiitmaterjal: bituumen (termoplastne polümeer) seob mineraalset faasi. Mõlemal eespool mainitud juhul on armatuur üsna jämeteraline.

Konstruksioonimaterjalina kasutatavates komposiitides on tavaliselt armeerivad osakesed ülipeened; nende tüüpilisteks esindajateks on pulberkomposiidid – pulbermetallurgia tehnoloogia abil saadud kermised (keraamilis-metalsed komposiidid).

Pulberkomposiitide rühma kuuluvad **dispersioontugevdatud materjalid** (*dispersion strengthened materials*). Neis komposiitides on metalses maatriksis suhteliselt väike kogus (mõni protsent) ülipeent kõvafaasi (tavaliselt oksiid või karbiid) ühtlaselt jaotatud. Kuna armatuur on maatriksis mittelahustuv, ei toimu kõrgetel töötemperatuuridel tugevdava faasiga mittesoovitavaid muutusi (lahustumist, koagulatsiooni jne). Tavaliselt kasutatakse sellist armeerimist materjali roomekindluse suurendamiseks. Tüüpiliseks dispersioontugevdatud materjaliks on **paagutatud pulberalumiinium** (*sintered aluminium powder*) **SAP**, mis koosneb Al-maatriksist ja kuni 14 % Al_2O_3 . Kasutatakse ka SiC armeeritud Al-maatriksiga komposiite. Kuna sellistes komposiitides on ühendatud keraamiline ja metalne faas

(nende sulamistemperatuurid ja mõnikord ka tihedused on väga erinevad), valmistatakse neid üldjuhul pulbermetallurgia meetodil.

Pulberkomposiidid võivad olenevalt otstarbest sisaldada armeerivat faasi ka oluliselt rohkem. Näiteks **kermistes** (*cermets*) on sideainet vaid 5...25 %. Keraamilised karbiidiosakesed (WC, TaC, TiC) on seotud nikli või koobalti maatriksisse. Metalsest sideainest tingituna on komposiidi kõvadus tunduvalt madalam kui keraamilise faasi kõvadus. Sel juhul on kermises võrreldes puhta karbiidiga saavutatud metalse sideaine abil tunduvalt suurem sitkus, kusjuures erineva sideainesisaldusega kermiste seast on võimalik leida mistahes tarvis ligilähedaselt optimaalne kõvaduse ja sitkuse suhtega materjal.

Lihv- ja lõikekettad valmistatakse pulberarmeeritud komposiitidest. Kõvad keraamilised osakesed (Al_2O_3 , SiC, kuubiline boornitriid (CBN)) või teemandiosakesed on jaotatud polümeerses maatriksis. Töödeldava materjali lõikamise või lihvimise käigus kõvad osakesed purunevad ja eemaldatakse maatriksist (ja lõiketsoonist), kuid maatriksist paljastuvad järgmiste osakeste lõikeservad ja tipud.

Elektrotehnikas leiavad kasutamist volframi ja hõbeda ning volframi ja vase baasil pulberkomposiidid. Võimsates elektriabelates, kus voolud ulatuvad mitme tuhande amprini, on väikese elektritakistuse juures vaja säilitada kontakti kuumuspüsivus, kuna kontakti temperatuur tõuseb proportsionaalselt I^2R -ga. Seepärast peab kontaktmaterjal olema hea elektri- ja soojusjuhtivusega, rasksulav, mehaaniliselt tugev, erosiooni- ja korrosioonikindel jne. Mingi eheda metalliga on niisuguseid vastuolulisi omadusi võimatu tagada, seetõttu kasutatakse elektrikontaktides peamiselt W-Cu, W-Cu-Ni, WC-Cu, W-Ag baasil komposiitmaterjale.

Valutööstustes kasutatavad vormid ja kärnid valmistatakse sageli liivast (pulbriline armatuur) ja polümeersest sideainest – tegu on pulberkomposiidiga.

Pulberkomposiite leiame ka metallmaatrikskomposiitide seast – Al- ja Mg-maatriksi tugevdamiseks kasutatakse erinevaid keraamilisi või klaaskeraamilisi osakesi. Keraamilise maatriksiga komposiidid Zr_2O_3 ja A_2O_3 baasil leiavad kasutust laagrimaterjalidena, klapipesades, stantsipesades ja lõiketerikute materjalina.

Paljusid plaste võib vaadelda kui pulberarmeeritud komposiitmaterjale, sest nad sisaldavad pulbrilisi täiteaineid. Siiski on kohane pulberkomposiitide mõistet kasutada vaid nende polümeerkomposiitide kohta, millesse pulbriline armatuur on viidud spetsiaalse, omadusi parandava eesmärgiga. Üks selline näide on graniidi ja epoksüvaigu baasil saadud materjal (nn sünteetiline graniit), mida kasutatakse tööpinkide sängide ja täppismõõtepinkide valmistamiseks. Sellise pulberkomposiidi tugevusomadused, mõõtmepüsivus ja vibratsioone summutavad omadused on

paremad kui traditsiooniliselt selles rakenduses kasutatavad hallmalmi vastavad omadused.

Pulberarmeeritud komposiidid on erinevalt kiud- ja kihtarmeeritutest isotroopsed, st nende omadused on igas suunas ühesugused.

Kiudarmeeritud komposiidid

Looduslikud kiudkomposiidid on puit ja bambus. Neis on tselluloosikiud seotud ligniiniga. Kiudarmeeritud komposiidina võib käsitleda juba muistsel ajal (800 a eKr) savi ja õlgede segust saadud ehitusmaterjale. Raudbetoon on näide „topeltarmeeritud“ komposiidist, sest lisaks eespool nimetatud pulbrilisele armatuurile (liiv, killustik) on armatuuriks eelpingestatud terastrossid või -vardad.

Kiudarmeeritud komposiitides koosneb materjal **pidevatest** ehk **pikkadest kiududest** (*continuous fibers, long fibers*) või **diskreetsetest** ehk **lühikestest kiududest** (*discontinuous fibers, short fibers*) ja neid siduvast maatriksist. Kiudarmeeritud komposiitide puhul on tavaliselt eesmärgiks suure tugevuse, jäikuse ja suure väsimustugevusega materjalide loomine. Kasutatavad kiud on tavaliselt suure tugevuse ja elastsusmooduliga, mõnikord paraku küllaltki haprad (väikese plastisusega). Kiuline armatuur annab komposiitmaterjalile tugevuse, jäikuse ja tagab mehaaniliste omaduste säilimise tööolukorras (kõrgel või madalal temperatuuril, agressiivses keskkonnas jne). Kasutatav maatriks on tavaliselt armatuurist tunduvalt plastsem, väiksema tugevuse ja kõvadusega, mis annab materjalile monoliitsuse, seob armeerivad kiud või kiukimbud üheks tervikuks ja kannab mõjuvad välisjõud ühtlaselt üle armatuurile. Maatriks kaitseb armatuuri välismõjude eest (tagab materjali korrosioonikindluse eksploatatsioonis ja kaitseb neid ka töötlemise faasis). Kiudarmatuur võib olla riide, vildi, lindi jms kujul. Kiudarmatuuril on võrreldes pulberarmatuuriga nii positiivseid kui ka negatiivseid omadusi. Eeliseks on suurem tugevus ja võimalus luua tugevaid komposiite. Puuduseks aga on see, et kiudarmatuur võib kanda ainult teljesuunalist koormust. Ristsuunas kiudarmatuur tugevust ei suurenda, vaid võib isegi nõrgestada.

Klaaskiudkomposiidid, mis loodi vahetult II maailmasõja järel, on esimesed „moodsad“ kiudarmeeritud komposiitmaterjalid. Neile on omane väike kaal ja arvestatav tugevus, seega on nad suure eritugevuse ja erijäikusega. Klaaskiudkomposiitides on peened klaaskiud (läbimõõt umbes 10 µm) seotud polümeersideainega, milleks on tavaliselt reaktoplast – epoksü- või polüestervaik. Armatuuri sisaldus on piires 30..60 mahuprotsenti ning tavaliselt kasutatakse nn E-klaasi (boorsilikaatklaas tõmbetugevusega kuni 3500 N/mm² ja normaalelastusmooduliga 72·10⁶ N/mm²). Nõudlikumates rakendustes leiab kasutust nn S-klaas (magneesium-

aluminosilikaatklaas, tõmbetugevusega kuni 4600 N/mm^2 ja normaalelastusmooduliga $85 \cdot 10^6 \text{ N/mm}^2$).

Klaaskiud on polümeerkomposiitides levinuim armatuur. Selle põhjuseks on klaaskiu mõõdukas hind ja üsna head mehaanilised omadused, mis osutuvad sobivaks või vähemalt piisavaks väga paljudes rakendustes. Klaaskiudarmatuuriga polümeerkomposiite kasutatakse laialdaselt spordivahendite, tuulegeneraatorite tiiviku labade, väikelaevade kerede (keredetailide ja mastide), kanuude ja sanitaartehnika (vannid, tervisekapslid, kraanikausid jne), heitveemahutite jne valmistamiseks.

Klaaskiud on valmistatud paljudest peentest pikkadest kiududest ehk elementaarkiududest. Kius kasutatavate elementaarkiudude hulk võib olla mõnekümnest kuni mitmete tuhandeteni. Pidevkiu läbimõõt ehk paksus antakse tavaliselt mikromeetrites. Vastavalt ISO standardile antakse Euroopas kiu, kiukimbu või lõnga kohta nn *teks*-väärtus. *Teks*-väärtus näitab, milline on 1 km pikkuse kiu või lõnga mass grammides (*teks* = g/km). Lõnga läbimõõdu suurenedes kasvab ka *teks*-väärtus.

Klaaskiudkomposiitide veelgi laiemat kasutust on seni piiranud ebapiisavad jäikus- ja tugevusomadused. Alternatiivsete kiududena on välja töötatud boor-volframkiud (booriga kaetud volframkiud), mille normaalelastusmoodul ulatub $850 \cdot 10^6 \text{ N/mm}^2$ ja tõmbetugevus kuni 2700 N/mm^2 .

Kiudarmatuurina kasutatakse palju grafiit- või süsinikkiudu ning aramiidkiudu (laialt on tuntud *DuPont*'ile kuuluv kaubamärk *Kevlar*). Grafiidi suur tugevus ja jäikus on tingitud kovalentsidemest kristallivõre naaberaatomite vahel põhitasandil. Põhitasandite vahelised aatomid on seotud nõrkade *van der Waalsi* jõududega. Seega, kui orienteerida grafiitkiud piki põhitasandeid, siis saavutatakse ülisuur tugevus ja jäikus. Defektideta süsinikkiudude teoreetiline tõmbetugevus on $100 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$ ja normaalelastusmoodul $1060 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$. Tänapäeval on saavutatud tööstuslikult umbes 70 % teoreetilisest elastsusmoodulist ja ainult 5...7 % tugevusest. Mehaaniliste omaduste järgi jaotatakse süsinikkiud **kõrgsitketeks** (*high toughness*, *HT*) ja **kõrgelastsusmooduliga** (*high modulus*, *HM*) kiududeks, aga lähtematerjali järgi polüakrüülnitriil- (PAN) ja pigikiududeks. Grafiitkiu muudab eriliseks tema negatiivne joonpaisumistegur. Komposiitmaterjal on võimalik doseerida maatriks ja armatuur vahekorras, et maatriksi positiivne joonpaisumistegur oleks elimineeritud ja tulemuseks nullsoojuspaisumisega materjal.

Sarnaselt grafiidiga on paljudel orgaanilistel ainetel struktuur, kus aatomid on seotud jäikades aroamatsetes rõngasahelates. Kui need ahelad orienteerida piki polümeerkiudu, siis saavad kiud suure tugevuse ja jäikuse; just see põhimõte on realiseeritud aramiidkiudude korral. Aramiidkiudude valmistamist alustas 1971. a firma *Du Pont* (USA) kaubandusliku nimetuse *Kevlar* all. *Kevlari* tihedus on $1,45 \text{ g/cm}^3$, tõmbetugevus (*Kevlar-29*, *Kevlar-49*) – $2700 \dots 3800 \text{ N/mm}^2$, normaalelastusmoodul

(100...150)·10³ N/mm², katkevenivus 3...4,5 %. Tugevatel ja jäikadel aramiidkiududel on unikaalsed omadused. Väikesele tiheduse ja suure tugevuse tõttu ületab ta eritugevuselt kõik teised armatuurina kasutatavad kiud sh ka metallikiud, jäädes erielastsusmoodulilt alla ainult süsinik- ja boorkiududele. Aramiidkiud on raskesti süttivad ning nad on raadiolainele „lähipaistvad“, mis teeb sellest materjali eriti perspektiivseks militaarsetes rakendustes ja lennukiehituses.

Lisaks eeltoodud kiududele, kasutatakse komposiitide armeerimiseks keraamilisi kiude, metalltraate ja spetsiaalseid **niitkristalle** (*whiskers*), eriti kõrgtemperatuursetes rakendustes. Metallikiudude kasutamine võib olla vajalik materjali elektrijuhtivuse saavutamiseks või polümeerkomposiidetailile elektromagnetiliste häiringute varjendamiseks vajalike omaduste andmiseks. Mitmetest asjaoludest tulenevalt (omahinna alandamine, keskkonnasõbralikkus, väike kaal) on põhjendatud ka looduslike kiudude kasutamine. Kasutatakse puuvilla-, lina-, kanepi, džuudi-, sisali- jmt looduslike päritolu kiude. Väikese tiheduse ja suure sitkuse tõttu kasutatakse termoplastkiude (polüamiid- ja polüesterkiud). Nende abil on võimalik suurendada reaktoplastist maatriksi sitkust ning tõsta märkimisväärselt materjali löögitugevust.

Tabel 6.7. Polükristalsete keraamika- ja klaaskiudude omadused

Materjal	Tihedus, g/cm ³	Sulamis-temperatuur, °C	Joon-paisumistegur, 1/K · 10 ⁻⁶	Tõmbe-tugevus, N/mm ²	Eritugevus	Normaal-elastsus-moodul, N/mm ² ·10 ³
Al ₂ O ₃ niitkristallid	3,93	1980	7,5	1400	356	379
Boor (W-südamikul)	2,6	2030	8,3	3800	1460	385
E-klaas	2,55	1720	4,7	1500...2500	590...980	70
Kõrgtugev grafiit	1,75	3700	0,1...0,5	1900	1090	250
Kõrgelastsus-mooduliga grafiit	1,95	3700	-0,1...0,1	1050	540	390
Kevlar 49	1,45	-	-2...5	2800...3500	1930...2410	125
SiC niitkristallid	3,3	2700	5,7	3500	1060	430

Tabelis 6.7 on esitatud mõningate olulisemate kiudude füüsikalised ja mehaanilised omadused. Oluline komposiitmaterjali omadus on eritugevus ja erielastsusmoodul (erijäikus). Selle all mõistetakse tugevuse või elastsusmooduli suhet komposiitmaterjali tihedusse, mis võimaldab erinevaid komposiitmaterjale omavahel võrrelda.

Kiudude orientatsioonist sõltuvad suurel määral mainitud konkreetse materjali talitusomadused (eeskätt tugevus ja jäikus). **Lehtvormitav kompaund** (*sheet-molding compound, SMC*) ja **mahtvormitav kompaund** (*bulk molding compound, BMC*) sisaldavad tavaliselt lühikesi, juhusliku orientatsiooniga kiude. Pikki, ühes suunas kiudude või kiukimpude kasutamisega on võimalik kiudarmeeritud komposiidi omadused mingis sihis maksimeerida (saavutada maksimaalsed võimalikud väärtused). Sealjuures tuleb arvestada, et kõnealuse sihiga ristsihis on materjali mehaanilised omadused samaväärsed või isegi madalamad kui puhtal maatriksil.

Lisaks sellele võivad kiud omakorda olla mati, kanga, kudumi või võrkpunutise kujul. Lühikesed või diskreetsed kiud moodustavad umbes 60 % kõikidest kasutatavatest kiududest. Lühikeste kiudude kasutamisega tekivad teatud probleemid. Raske on kiudusid ühtlaselt segada polümeeriga ilma neid kahjustamata. Kui kiudude pikkus on väiksem nn kriitilisest pikkusest, ei anna nende kasutamine maksimaalset võimalikku efekti. Küllaltki keeruline on kontrollida kiudude orientatsiooni lõpptootes.

Kiudarmeeritud komposiidi omadused olenevad suurel määral järgmistest mõjuritest: (1) kiudude omadused; (2) kiudude kogus (mahuprotsent); (3) kiudude kujutegur (pikkuse-läbimõõdu suhe); (4) kiudude orientatsioon; (5) armatuuri ja maatriksi vahelise sideme tugevus; (6) maatriksi (tugevus)omadused. Armatuurisalduse suurendamine mõjub üldjuhul tugevust ja jäikust suurendavalt, kuid armatuuri maht ei saa ületada 80 mahuprotsenti, sest vastasel korral ei ole võimalik tagada maatriksi pidevust. Pikad ja peenikesed kiud (kujutegur üle paarisaja) annavad suurema tugevuse; maatriksi ja armatuuri vaheline tugev side on tavaliselt soovitatav.

Kihtarmeeritud komposiidid

Kihtarmeeritud komposiidid ehk laminaatkomposiidid (laminaadid) on materjalid, mis on saadud erinevate kihtide liitmisel üheks tervikuks. Laminaatidena võib vaadelda üliõhukesi (0,5...5 µm) paljudest kihtidest koosnevaid pindeid, pakke (0,5...10 mm) pihustus- ja sulatuspindeid, bimetalseid ning sändvihtmaterjale jt. Plastmaatriksiga laminaatkomposiittooted on sageli plaati või koorikut meenutava kujuga, milles ühesuunalised armatuurikiud, kiududest kootud riie või -matid on kihtikihi haaval asetatud üksteise peale. Sellist kihilist struktuuri nimetatakse laminaadiks. Kõige tavalisem konstruktsioonimaterjalina kasutatav kihtkomposiit ehk laminaat on vineer. Vineeris on spoonikihid kokku liimitud selliselt, et naaberkihtide puidukiud on teineteise suhtes 90° nurga all. Vineeri iseloomustab võrreldes puiduga küllalt suur

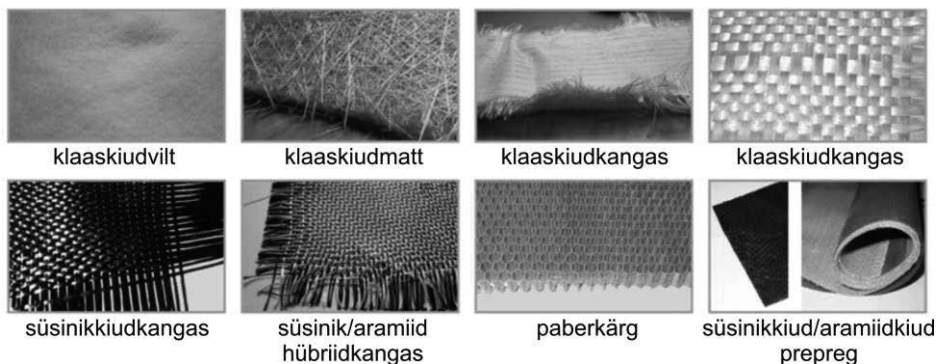
tugevus ja sitkus, omaduste väike hajuvus ning hea kujupüsivus niiskusrežiimi muutumisel. Eeliseks on ka see, et suuregabariidiliste toodete valmistamine on võimalik suhteliselt madalate kuludega.

Laialt levinud kihtkomposiitmaterjalideks on sõidukite rehvid, milles elastomeerne sideaine seob paljusid kõrgsuutlikest kiududest (nailon, teras jt) kootud armatuuri-kihte. Avalikes hoonetes kasutatakse ohutuse eesmärgil tavalise klaasi asemel lamineeritud klaasi. Lamineeritud klaas koosneb kahest või enamast klaasikihist, mis on omavahel seotud polümeerse liimainega. Klaasi purunemisel takistab polümeerkile klaasi kildumast.

Kihtkomposiitmaterjalide hulka kuulub ka näiteks **aramiidalumiiniumkomposiit** (*Arall*). Selles komposiidis on õhukesed alumiiniumsulamist lehed liimitud kokku liimvaiguga impregneeritud aramiidkangaga. Saadud konstruktsioonimaterjali kasutatakse lennukiehituses selle suure eritugevuse, löögisitkuse ning väsimustugevuse tõttu. Kihtkomposiitmaterjale kasutatakse paljude meile olmes tuttavate esemete valmistamiseks (laudade ja kappide detailid ning nende töötasapinnad), põrandakattmaterjalid (laminaatparkett), spordivahendid (lumelaud, suusad, suusakepid, jalgrattaraamid, surfilaud). Enamikus elektroonikaseadmetes on elektroonikaskeem paigutatud klaaskiudarmeeritud laminaadile.

Polümeermaatriksiga kihtkomposiitmaterjalid saadakse armatuurikihtide impregneerimise (termoreaktiivse vaiguga immutamise) ja vormis kiht-kihilt üksteise peale liimimise tulemusena. Laminaat saadakse kasutades lahtist vormi (mudelit või kärni) seda kiht-kihilt kasvatades. Kõvenemine võib toimuda ilma välise surveta, kuid võidakse kasutada ka ala- või ülerõhku suurema tiheduse saavutamiseks. Lamineerimine jaguneb märg- ja kuivlamineerimiseks.

Kuivlamineerimise korral kasutatakse eelimpregneeritud pooltooteid ehk **preprege** (*prepreg, preliminary impregnated*), siit ka nimetus – prepreglamineerimine. Prepregiks võib olla vaiguga immutatud kangas, nõör või kiukimp, milles vaik on poolkõvenenud olekus. Preprege säilitatakse madalal temperatuuril, millega täkistatakse reaktoplasti kõvenemisreaktsiooni kulgu. Märglamineerimise korral impregneeritakse armatuur vedela vaiguga. Ainult kiudarmeeritud kihtidest koosnevaid laminaate kutsutakse monoliitlaminaatideks. Levinud on paberil põhinevad komposiidid, mis on saadud paberi või papikihtide kokkuliimimise teel. Polümeerlaminaatides kasutatakse tavaliselt armatuurina erinevaid kiude ja kiutooteid (kootud ja punutud kangad, matid, vilt). Erinevad kiutooted on esitatud Joonisel 6.21.



Joonis 6.21. Kihtarmeeritud komposiitides kasutatavad kiutooted

Kiudtoodete valmistamisel levinumad on mineraalsed kiud – klaaskiud, süsinikkiud, basaltkiud. Kasutatakse looduslike kiude (puuvill, kanep, lina) ja sünteetilisi kiude (nailon, polüetüleen, aramiid jt). Üheks levinud kihtkomposiitstruktuuriks on nn **sändvitšmaterjal** (*sandwich*), mis saadakse täitematerjali liimimisel kahe, suhteliselt õhukese laminaadi vahele (vt p 6.7). Sändvitšmaterjalide eelised on kergus ja jäikus, lisaks saab valmistada häid heli- ja soojusisolatsiooniomadustega materjale. Väliskihid (pealistused) moodustatakse sageli kiudarmeeritud laminaatidest, kuid kasutatakse ka muid materjale (plastid, teras- ja alumiiniumplekk jt). Levinumad täitematerjalid on vahtplast, balsapuit, aga ka alumiiniumist või plastist valmistatud kärgmaterjalid.

Kihtkomposiitide omadused on eri suundades erinevad – tegu on **anisotroopsete** materjalidega. Tulenevalt kihilisest ehitusest on kihtidega ristisuunas materjali omadused alati erinevad võrreldes materjali omadustega kihtide sihis (mis võivad, kuid ei pruugi alla olla erinevad).

6.5.2. Komposiitmaterjalide liigitus maatriksi järgi

Komposiitmaterjali põhiosa on reeglina maatriks, mis koos armatuuriga (sagedamini kombinatsioonis kiudarmatuuriga) võtab vastu koormuse. Lisaks võib maatriksi ülesandeks olla vajaliku elektrijuhtivuse, korrosioonikindluse või termilise stabiilsuse tagamine. Tulenevalt maatriksist eristatakse polümeermaatriks-, metallmaatriks-, keraamikamaatriks- ja süsinikmaatrikskomposiitmaterjale.

Polümeermaatrikskomposiidid

Polümeermaatrikskomposiitides, **PMK** (*polymer matrix composites, PMC*), lühemalt polümeerkomposiitides kasutatakse nii termo- kui reaktoplaste. Reaktoplastide eeliseks on nende tehnoloogilisus – nad on töötlemisfaasis madala viskoossusega vaigud, mille abil on suhteliselt lihtne immutada küllastumiseni armeerivad kiud, kiukimbud või neist kootud kangad. Kõvenenud reaktoplastid on

termoplastidest suurema tugevuse ja jäikusega. Kasutatavamad reaktoplastid on polüester- ja vinüülestervaigud, epoksüvaigud, fenoolvaigud ja polüimiidid. Epoksüvaikusid kasutatakse tavaliselt vastutusrikastes polümeerkomposiitides tingituna nende headest mehaanilistest omadustest, heast adhesioonist nii klaas- kui süsinikkiuga. Paraku ei ületa epoksüvaikudel põhinevate komposiitide maksimaalne pikaajaline töötemperatuur 85 °C. Mitmete teiste polümeermaatriksite termostabiilsus on tunduvalt suurem – polüimiidil 260..320 °C, fenoolvaikudel 150...175 °C, polüeeter-eeter-ketoonil (PEEK) 310 °C.

Mahtvormitav kompaund BMC on viskoosne, taigasarnane toormaterjal, mis põhineb reaktoplastil, sisaldades 5...50 % lühikesi kiude (pikkusega 12...50 mm) koos mitmete lisanditega (täiteained, kahanemist piiravad lisandid jne). Kasutades erinevaid vormimismeetodeid saab mahtvormitavast kompaundist vormida heade mehaaniliste omadustega suure kujutäpsusega tooteid. Värvlisandi abil saab tooteid toonida soovitud värvitoonis, vajadusel saab pinnad katta pulbervärvi vmt. pinnetega.

Lehtvormitav kompaund SMC on eespool kirjeldatud mahtvormitava kompaundi erim. Lehtvormitav kompaund on mõne millimeetri paksune reaktoplastil põhinev plastne lehttoorik mis sisaldab armatuuri ja täiteaineid. Armatuuri maht on vahemikus 10...65 mahuprotsenti, kiudude pikkus on samasugune nagu eelmises. Lehtvormitavast kompaundist pressitakse tooteid, mille pikkus ja laius on 300...1500 mm.

Tootmistehnoloogia seisukohast on sageli otstarbekam, kiirem ja odavam sulatada ning jahutada termoplastist maatriksit kui oodata reaktoplastist maatriksi kõvenemist. Termoplastse maatriksi eeliseks on suurem sitkus, nad on vigastuste suhtes vähem tundlikud, lihtsamini taaskasutatavad ja ümbertöödeldavad. Termoplastsetest maatriksmaterjalidest levinumad on polüpropüleen, polüstüreen ja polüamiid (nailon). Suurema tugevusega kõrgetel temperatuuridel on polüimiid, polüfenüleensulfiid (PPS), polüeeter-eeter-ketoon (PEEK) ja vedelkristalsed polümeerid. Nende armeerimisel ülitugevate, suure elastusmooduliga kiududega saavutatakse võrreldes tavatermoplastidega märkimisväärne tugevus- ja jäikusomaduste tõus.

Tabelis 6.8 on esitatud mõnede polümeerkomposiitmaterjalides kasutatava armatuuri ja maatriksi ning komposiitmaterjalide endi omadused.

Tabel 6.8. Polümeerkomposiitmaterjalide ja nende koostisosade mehaanilised omadused

Materjal	Tihedus, g/cm ³	Tõmbetugevus, N/mm ²	Elastsusmoodul, N/mm ² ·10 ³
<u>Kiud</u>			
E-klaaskiud	2,55	1500...2000	70
S-klaaskiud	2,52	2600	86
Süsinikkiud	1,75	1600...3500	230...300
Boorkiud	2,60	3800	385
Aramiidkiud (<i>Kevlar</i>)	1,45	2800...3500	123
<u>Maatriks</u>			
Polüestervaik (UP)	1,2	30...100	2,0...4,0
Epoksüvaik (EP)	1,2...1,8	50...125	2,5...4,0
PP-tarbeplast	0,91	31...41	1,1...1,6
PA 66-konstruksiooniplast	1,14	76...94	1,6...3,8
PC-konstruksiooniplast	1,2	63...72	2,2...2,4
PEEK-konstruksiooniplast	1,3	70...100	3,5...4,0
<u>Komposiit</u>			
PP+30 % klaaskiudu	1,2	100	10
PA66+30 % klaaskiudu	1,2	120	3,5
Klaasplast (klaaskiudmatt 30 %, UP 70 %)	1,5	100	8
Klaasplast (klaasriie 30 %, UP 70 %)	1,7	250	16
Klaasplast (E-klaas pikikiudu 50 %, EP 50 %)	1,8...2,0	600	20
Klaasplast (E-klaas prepreg 50 %, EP 50 %)	1,8...2,0	1100	45
Süsinikplast (C-kõrgtugev prepreg 50 %, EP 50 %)	1,5...1,6	2000	140
Organoplast (<i>Kevlar</i> -prepreg 50 %, EP 50 %)	1,2...1,4	500	30

Metallmaatrikskomposiidid

Metallmaatrikskomposiite, MMK (*metal-matrix composites, MMC*), lühemalt metallkomposiite kasutatakse temperatuurini kuni 1250 °C, kui vajatakse suurt tugevust ja jäikust, head soojus- ja elektrijuhtivust, suurt kulumiskindlust ning sealjuures suurt plastsust ja sitkust. Sitke maatriksmaterjalina kasutatakse kõige sagedamini alumiiniumi, magneesiumi, titaani, niklit ja koobaltit, vaske, super-sulameid või sulameid intermetalliidide baasil; armatuurina nii ülitugevat ja jäika süsinikkiudu, boorkarbiid-, ränikarbiid- või alumiiniumoksiidkiude kui ka safiiri ja räninitriidi niitkristalle (monokristallid pikkusega 1...10 mm). Armatuurima kasutatakse ka Ti, W, Mo, Be kiudusid ja ülitugevat roostevaba terasest traati. Armeeriva kiu sisaldus on tavaliselt vahemikus 10...60 mahuprotsenti ning nagu polümeerkomposiitideski, kasutatakse nii pikki kui ka lühikesi kiude. Tabelis 6.9 on esitatud mõnede metallmaatrikskomposiitide mehaanilisi ja füüsikalisi omadusi.

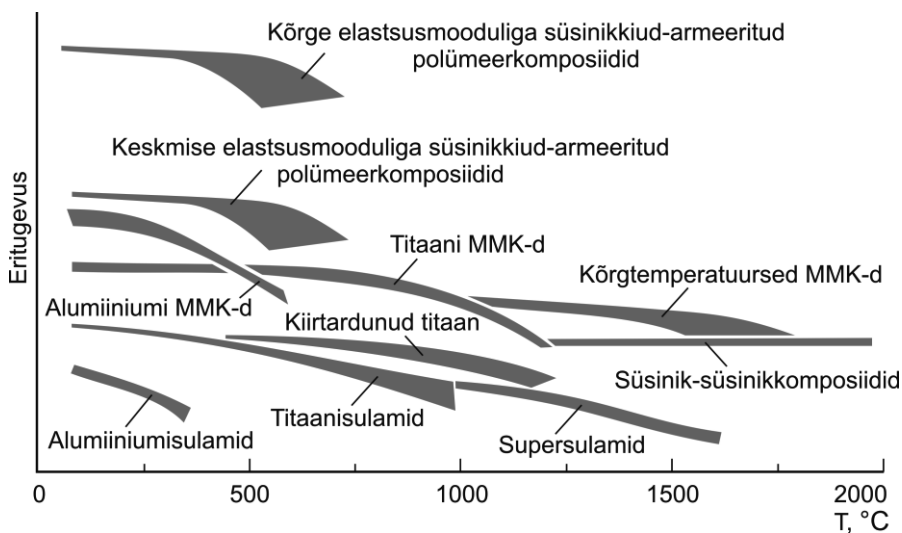
Tabel 6.9. Kiudarmeeritud metallmaatrikskomposiitide omadused

Materjal	Tihedus, g/cm ³	Suund	Eritugevus	Erielastsusmoodul
Al + 50 mahuprotsent B-kiud	2,66	pikikiudu	574	79200
		ristikiudu	54	58160
Al+50 mahuprotsent SiC kiudu	2,85	pikikiudu	90	111000
		ristikiudu	38	–
Titaanisulam Ti-6Al-4V+ 35 mahuprotsenti SiC kiudu	3,85	pikikiudu	465	80200
		ristikiudu	110	–
Al-Li-sulam + 60 mahuprotsenti Al ₂ O ₃ kiudu	3,46	pikikiudu	200	77200
		ristikiudu	56	44700
Mg-sulam + 38 mahuprotsenti grafiitkiudu	1,80	pikikiudu	290	–
Al + 30 mahuprotsenti grafiitkiudu	2,46	pikikiudu	284	65000

Metallmaatrikskomposiidid erinevad oluliselt muudest konstruktsiooni- ja tehnomaterjalidest. Olulisemad tunnused on:

- metallmaatrikskomposiidid on tunduvalt plastsemad ja sitkemad kui keraamikamaatrikskomposiidid, kuid reeglina väiksema sitkuse ja plastsusega kui maatriksi materjalid ise;
- armatuuri ülesanne on metallmaatrikskomposiidis sarnaselt polümeermaatrikskomposiidiga suurendada tugevust (voolepiir ja tõmbetugevus) ning jäikust (suurendada materjali normaalelastsusmoodulit). Keraamilise maatriksiga komposiidis on armatuuri ülesanne suurendada materjali vastupanu haprale purunemisele;
- metallmaatrikskomposiitide mehaanilised omadused säilivad kõrgematel temperatuuridel võrreldes polümeeride ja polümeermaatrikskomposiitide omadustega, kuid jäävad alla keraamika ja keraamikamaatrikskomposiitide omadustele;
- väikese ja mõõduka armatuurisisaldusega metallmaatrikskomposiidid on üldiselt töödeldavad samade plastse vormimise operatsioonidega kui armeerimata metallisulamid.

Joonisel 6.22 on esitatud erinevate komposiitmaterjalide võrdlus – eritugevuse ja töötemperatuuri vaheline sõltuvus.



Joonis 6.22. Komposiitmaterjalide omadused

Keraamikamaatrikskomposiidid

Keraamikamaatrikskomposiidid, KMK (*ceramic-matrix composites, CMC*), lühemalt keraamikakomposiidid koosnevad keraamilisest maatriksist ja armatuurist. Viimane võib olla mõni rasksulav metall (W, Mo jt) või rasksulav ühend (WC, SiC jt). Keraamilisi komposiitmaterjale iseloomustab keraamikale omase suure survetugevuse ja kõvaduse kõrval rahuldav tõmbetugevus ja sitkus. Keraamikakomposiidid leiavad kasutust temperatuuridel kuni 1500 °C.

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

Keraamilise maatriksi tugevdamist metallarmatuuriga saab realiseerida kahel viisil:

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

Esimesel juhul annab elastsem maatriks deformeermisel 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 % räni-

oksiidi, 20 % päevakivi), mida kasutatakse elektriisolaatorite valmistamiseks. Keraamikakomposiite on tutvustatud ka p 6.4. Keraamika.

Süsinikmaatrikskomposiidid

Süsinikmaatrikskomposiidid, SMK (*carbon-carbon composites, CCC*), lühemalt süsinikkomposiidide kasutuselevõtu on tingitud eelkõige kõrgtemperatuurse tehnika areng: on vaja konstruktsioonimaterjale, mille talitlusomadused säilivad kõrgel temperatuuril (üle 2000 °C). Polümeerkomposiididel on küll suur eritugevus, kuid nad kaotavad selle juba suhteliselt madalatel temperatuuridel. Metallkomposiidid on rasked, lisaks sellele on nad kallid kas keeruka valmistustehnoloogia või komponentide kõrge hinna tõttu. Sama võib öelda ka traditsiooniliste keraamikakomposiidide kohta.

Nende asjaolude tõttu pakuvad huvi süsiniku baasil ning süsinikkiududega armeeritud süsinik-süsinikkomposiidmaterjalid. Sellistel süsinikkomposiididel on väike tihedus, suur tõmbetugevus ja elastsusmoodul, hea termokindlus; nad töötavad oksüdeerivas keskkonnas temperatuuril kuni 500 °C, inertses keskkonnas ja vaakumis aga kuni 3000 °C. Sealjuures on nende tugevus kuni 20 korda suurem kui grafiidil, kusjuures nad on 30 % kergemad (1,38 g/cm³) ja äärmiselt väikese joonpaisumisteguriga. Pidevate või diskreetsete kiududega süsinikarmatuur saadakse orgaaniliste kiudude kõrgtemperatuurse pürolüüsi teel. Lähtematerjaliks on naturaalsed (tselluloos) või sagedamini tehiskiud (viskoos, polüamiid jt). Erinevalt süsinikplastidest ei valmistata süsinikkomposiidide armatuuri eraldi, vaid üheaegselt süsinikmaatriksiga. Viimasena kasutatakse pürolüüssüsinikku (kivisöevaiku, polümeere, fenool- ja teisi orgaanilisi vaike). Kõrgtemperatuurisel töötlemisel vaigud koksistuvad. Mida suurem on vaigusisaldus, seda paremad tulevad süsinikkomposiidi omadused. Süsinikkomposiite kasutatakse kosmosesüstiku ninaosa ja tiivakonstruktsiooni, lennukite ja võidusõiduautode piduriketaste valmistamiseks, sidurikatetes, turboreaktiivmootorites, raketimootorite kütusedüüsid, samuti implantaadimaterjalina. Joonisel 6.23 on süsinikkomposiidist piduriketas.



Joonis 6.23. Süsinikkomposiidist piduriketas

6.5.3. Komposiitmaterjalide kasutus

Polümeerkomposiitide kasutus algas 20. sajandi esikümnendil, mil patenteeriti esimene fenoolvaikude armeerimist (tugevdamist) käsitlev patent. Plastidega seoses ilmus trükis mõiste „komposiit“ esimest korda aastal 1923. Siis kasutati seda kaubamärgina *šellakist* valmistatud elektriisolaatorite korral. Tööstusliku läbimurdeni jõuti 1930-ndatel, mil sünteesiti polüester- ja epoksüvaigud. Samal ajal algas klaaskiu tööstuslik tootmine. Esimesed tehnoloogiad klaaskiuga armeeritud plastkomposiitide suurseeriatootmiseks olid pihustus- ja mähkimismeetod ning pultrusioon, mis juurutati 1940. aastatel. Komposiitide valmistustehnoloogiaid käsitletakse pikemalt 14. peatükis.

Tänapäeval pakuvad polümeerkomposiidid arvestatavat konkurentsi metallidele ja teistele materjalidele. Polümeerkomposiitide suurimad eelised võrreldes teiste materjalidega on:

- suur tugevuse ja normaalelastsusmooduli suhe tihedusse (eritugevus ja -jäikus);
- võimalus suunatud tugevusomaduste saamiseks;
- suhteliselt suur kujuvabadus (vormitavus);
- võimalus valmistada suuregabariidilisi tooteid ühe tervikuna;
- plastidele omane suur keemiline inertsus.

Lisaks on polümeerkomposiididel terve rida omadusi, mida olenevalt kasutusvaldkonnast võib pidada eelisteks või puudusteks, näiteks madal elektri- ja soojusjuhtivus. Polümeerkomposiitide kasutust piiravateks asjaoludeks on tooraine suhteliselt kõrge hind ja maatriksina kasutatavate vaikude suhteliselt madal termopüsivus. Mõnede toodete osas on piiranguks ka valmistustehnoloogia, mida ei ole suudetud arendada hinnalt suurseeriatoodete tasemel konkurentsivõimeliseks. Mõneti võib lugeda valdkonna arengut takistavateks teguriteks ka materjalide ja meetodite madalat standarditavust ja laminaatide raskesti prognoositavat käitumist.

Kiudarmeeritud plastide suurimateks tarbijateks on lennuki- ja laevaehitus. Seoses järjest tiheneva konkurentsiga (vajadus piirata toodete massi ja optimeerida konstruktsioone) ja valmistusmeetodite arenedes on hakatud polümeerkomposiite järjest rohkem kasutama ka suuremates seeriates valmistatavates transpordivahendites (sõidu- ja veoautod, eriotstarbelised sõidukid ja rongivagunid). Kiiaresti on kasvanud rakendus laevanduses, sh avamerenaftaplatvormidel. Märkimisväärne on polümeerkomposiitide kasutus elektrienergia tootmiseks mõeldud tuulikute valmistamisel. Kosmosetehnoloogia vältimatu eeldus on suure tugevusega ja kerge te komposiitide kasutamine.

Teise olulise rühma polümeerkomposiitide rakendustes moodustavad spetsiaalsed tehnoloogilised torustikud, mahutid ja muud seadmed, mis peavad vastama kõigile konstruktiivsetele ja korrosioonikindluse nõuetele. Ehitus-, energieetika- ja masina-

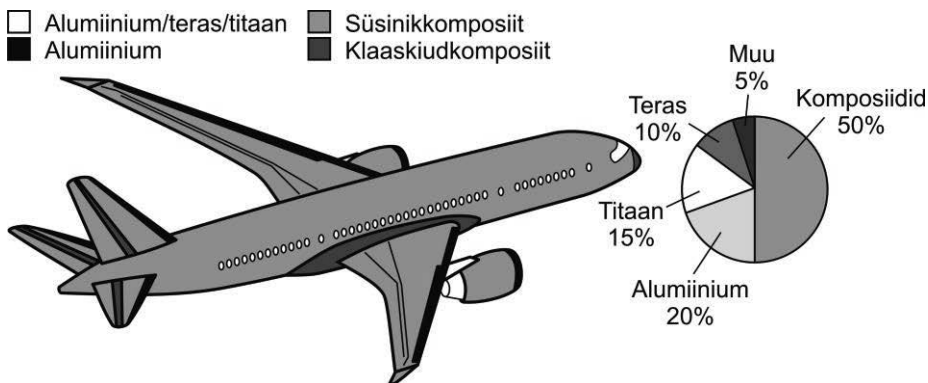
tööstus on paljudes maades märkimisväärsed polümeerkomposiitide tarbijad. Polümeerkomposiitide kasutus spordivahendites on tarbijaile küll hästi silmatorkav, kuid mahu poolest tagasihoidlikum võrreldes eeltoodutega. Uute polümeerkomposiitide kasutuselevõtt ja katsetamine on selles sektoris kõige intensiivsem.

Metallkomposiitide areng peegeldab vajadust arendada selliste omadustega materjale, mida ei saa saavutada monoliitsete ja isotroopsete materjalide kasutamisega. Metallkomposiidid paistavad silma oma eritugevuse, väsimustugevuse ja kulumiskindluse suurepärase kombinatsiooniga või siis võimalusega realiseerida kontrollitava suurusega soojuspaisumine. Metallkomposiitide kasutust piirab nende kõrge hind.

Kõrge maksumuse (100...200 korda kõrgem tavalistest metallisulamitest) ja keeruka valmistamistehnoloogia tõttu kasutatakse metallkomposiitide tingimustes, milles klassikalised metallisulamid ei ole töövõimelised: ülikõrgetel ja -madalatel temperatuuridel, agressiivsetes keskkondades, tsüklilisel koormusel, vibratsiooni-tingimustes jne. Niisugused tingimused on lennukites, kosmoseaparaatides, tuumaenergeetikaseadmetes.

Tulenevalt mõnest komposiitide spetsiifilisest omadusest on õigustatud nende kasutamine ka masinaehituses, raudteetranspordis, laevaehituses, keemiatööstuses, elektrotehnikas ja mujal. Kõik oleneb komposiitmaterjali tõhususest, mille all mõistetakse majanduslikku külge ja ka teisi tegureid, näiteks ökoloogilisust, turvalisust jt. Kui võrrelda komposiitmaterjalide kasutamise otstarbekust autos, reisi- ja sõjalennukeis, tuleb silmas pidada nende masinate maksumust massiühiku kohta (suhe on 2:30:150); 1 kg massi vähendamine lennuki massis annab mitusada korda suuremat majanduslikku säästu kui auto puhul.

Reisilennukite kasutamisega on vähemalt 15 aastat, tegelikult muidugi kauem; transpordilennukeid ekspluateeritakse keskmiselt 4000 tundi aastas. Seetõttu on lennukite puhul väga olulised väsimus- ja korrosiooniprobleemid. Massi piirangud (mitte rohkem kui 50 % lennuki kandevõimet) teevad komposiitmaterjalid väga perspektiivseks lennukitööstuses esmajoones nende eriomaduste (eritugevus ja -jäikus) tõttu. Reisilennuki *Boeing 787 Dreamliner*i põhistruktuur (kere ja tiivad) on valmistatud polümeerkomposiitidest, kusjuures komposiidid moodustavad 50 % lennukis kasutatud materjalide massist – vt Joonis 6.24.



Joonis 6.24. Komposiitmaterjalide kasutus *Boeing 787* ehituses

Üks vastutusrikkaim lennuki osa on reaktiivmootor, täpsemini selle labad. Mootori kompressori (ventilaatori) piirkonnas on laba temperatuur umbes 100...150 °C, kompressori tagaosas ulatub see juba 600...650 °C-ni. Veel kõrgem on temperatuur reaktiivmootori turbiinis, sest gaasiturbiini kasutegur sõltub oluliselt gaasi temperatuurist turbiini ees. Viimane on aga piiratud turbiinilabade materjali kuumustugevusega. Kõige paremad nikli valusulamid töötavad temperatuurini 970...990 °C. Samal ajal on reaktiivmootori turbiini soovitatav teoreetiline temperatuur 1200...1300 °C. Eeltoodust nähtub metall- ja keraamikakomposiitide perspektiiv ja olulisus.

6.6. KORDAMISKÜSIMUSED

1. Nimetage tehnomaterjalina kasutatavaid looduslikult esinevaid mittemetalseid materjale.
2. Kuidas liigitatakse plaste lähtuvalt nende keemilisest koostisest, struktuurist, töötlemistehnoloogiast?
3. Millised sidemed mõjuvad polümeeriahelas aatomite vahel?
4. Mis vahe on küllastatud ja küllastamata meerial?
5. Mis on isomeer?
6. Mis vahe on liitumispolümeerisatsioonil ja kondensatsioonipolümeerisatsioonil?
7. Mida iseloomustab polümeerisatsiooniate?
8. Mis vahe on termoplastidel ja reaktoplastidel?
9. Kirjelda mehhanismi, mille tulemusena termoplastid rõhu ja temperatuuri toimel pehmenevad.
10. Mida mõistetakse polümeeri kristalliinsusastme all? Mille poolest erineb polümeeri ja metalli kristallumine?
11. Nimetage meetodeid, mille abil on võimalik suurendada termoplastide tugevust.
12. Miks on reaktoplastid olemuslikult väikese plastsusega?

13. Mis juhtub reaktoplastiga kuumutamisel?
14. Kuidas mõjutab polümeeri tüübi (reaktoplast või termoplast) valik valmistusprotsessi tootlikkust?
15. Millised on polümeeride huvipakkuvad omadused konstruktsioonimaterjalina kasutamisel?
16. Millised omadused piiravad termoplastide kasutust konstruktsioonimaterjalina? Tooge näiteid.
17. Millised keskkonnatingimused võivad negatiivselt mõjutada plastide talitlusomadusi?
18. Millised on levinumad plastide täiteained?
19. Mis otstarve on plastifikaatoril plasti koostises?
20. Mis vahe on värvainel ja pigmendil?
21. Kirjeldage vahtplastide omadusi ja kasutust.
22. Kirjeldage plastide kasutamist autotööstuses.
23. Millised on plastide taas- ja korduvakasutuse olulisemad probleemid? Keerukus võrreldes metallidega?
24. Milliseid tegureid tuleb silmas pidada biolagunevate plastide käitlemisel?
25. Millised tegurid piiravad naturaalse kummi kasutust?
26. Milliseid lisa- ja abiaineid lisatakse naturaalsele kummile ja mis on nende eesmärk?
27. Milliseid tegureid tuleb arvestada elastomeeride valikul?
28. Millised omadused iseloomustavad keraamilisi materjale?
29. Kuidas liigitatakse keraamilisi materjale koostise (kasutusotstarbe) järgi?
30. Miks on keraamiliste materjalide siseehitus sageli tunduvalt keerukam kui metallide kristallstruktuur?
31. Miks on keraamilised materjalid haprad ning milliste meetodite abil saab suurendada keraamiliste materjalide sitkust?
32. Mille poolest erineb klaaskeraamika klaasist?
33. Mis on kermised? Millised omadused või omaduste kombinatsioon iseloomustab kermiseid?
34. Miks ei ole õnnestunud realiseerida keraamilistes materjalides nende teoreetiliselt väga suurt tõmbetugevust?
35. Miks on keraamiliste materjalide omaduste hajuvus suur? Milliste näitajate abil seda kirjeldatakse?
36. Mis on sialoon ning millised on selle materjali erilised omadused?
37. Nimetage mõned konstruktsiooni-, löike- ja kõrgtemperatuurse keraamika esindajad.
38. Mis on komposiitmaterjal ning mis on maatriksi/armatuuri ülesanne komposiitmaterjalis?
39. Kuidas liigitatakse komposiitmaterjalid lähtuvalt armatuuri kujust?

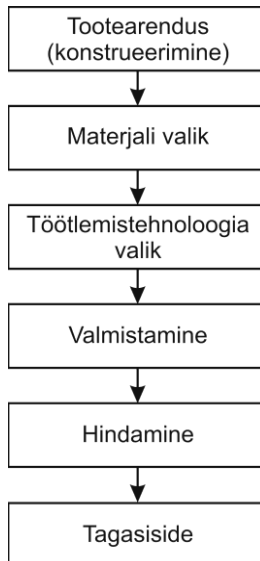
40. Kuidas liigitatakse komposiitmaterjalid lähtuvalt maatriksist?
41. Mida kujutab endast sändvitšmaterjal?
42. Millised on pulberarmeeritud komposiidi positiivsed omadused?
43. Selgitage isotroopia/anisotroopia mõistet.
44. Mis on dispersioontugevdatud komposiitmaterjalid?
45. Millised on kasutatavamad kiudmaterjalid komposiitides ning millised on kiudude põhilised omadused?
46. Millega on määratud kiudarmeeritud komposiidi omadused?
47. Mis on maht- ja lehtvormitavad kompaunidid?
48. Millised on termoplastist maatriksiga komposiidi eelised võrreldes reaktoplastist maatriksiga?
49. Kus kasutatakse süsinikkomposiite?
50. Kus kasutatakse keraamikamaatriksiga ja metallmaatriksiga komposiite?

7. MATERJALI JA TEHNOLOOGIA VALIK

7.1. LÄHENEMINE MATERJALI VALIKULE	7.4.2. Tehnoloogia valiku põhimõtted
7.2. TOOTEARENDUS	Tehnoloogia mõjurid
7.3. MATERJALI VALIK LÄHTUDES KONSTRUKTSIOONITUGEVUSEST	Põhilised valmistustehnoloogiad
7.3.1. Tugevusomadused	7.4.3. Koostamine
7.3.2. Kestvusomadused	7.5. MATERJALIDE ASENDAMINE
7.4. DETAILI/TOOTE VALMISTUSTEHNOLOOGIA VALIK	7.6. KORDAMISKÜSIMUSED
7.4.1. Materjalide ja valmistustehnoloogiate vahelised seosed	

7.1. LÄHENEMINE MATERJALI VALIKULE

Sobiva materjali valik ja sellest etteantud kuju ja omadustega toote valmistamine on üsna keerukas protsess. Joonisel 7.1 esitatud toote saamisprotsess sisaldab järgmisi järjestikke tegevusi: Tootearendus → Materjali valik → Töötlemistehnoloogia valik → Valmistamine → Hindamine → Tagasiside



Joonis 7.1. Toote valmistamisega seotud tegevused

Enne mistahes materjali valiku ja detaili/toote konstruktsiooniga seotud otsuse tegemist tuleb defineerida nõuded detailile/tootele, millised võib rühmitada järgnevalt:

- a) kuju või geomeetriaga seotud,
- b) omadustega seotud,
- c) valmistamisega seotud,

Toote kujuga seotud

1. Milline on detaili suhteline suurus?
2. Kui keerukas on detaili kuju (sümmeetriatelgede ja -tasandite ning ühtlaste ristlõigete olemusolu, võimalus lahutada detail mitmeks osaks)?
3. Palju mõõtmeid on vaja anda? Milline on nende täpsus?
4. Kuidas detail toimib teiste detailidega?
5. Millised on pinnatöötlusnõuded? Kas kõik pinnad on vaja töödelda?
6. Kui palju võivad mõõtmed muutuda kulumise, korrosiooni ja joonpaisumise käigus?
7. Kas detaili mitteoluline kuju muutmine kergendab valmistamist või tõstab selle töökindlust/tööiga?

Mehaaniliste omadustega seotud

1. Milline on koormuse iseloom (tõmme-surve, vääne, nihe, staatilised, dünaamilised)?
2. Kuidas on ülekoormuste korral lubatud käitumine (kiire habras purunemine või plastne deformeerimine ja moonded enne purunemist)?
3. Palju võib materjal deformeeruda (painduda, venida, väänduda või kokku suruda) talitusomadusi kaotamata?
4. Vibratsioonide olemasolu?
5. Kas kulumiskindlus on vajalik (millistel pindadel, millisel määral)?
6. Kas eelnimetatud nõuded on vajalikud kogu töötemperatuuri vahemikus?
7. Millised on nõuded füüsikaliste omaduste suhtes (elektrilised, magnet- ja soojuslikud omadused jt)?
8. Kas kaal on oluline?
9. Kui oluline on väljanägemine?

Valmistusprotsessiga seotud

1. Milline on toodetavate detailide kogus? (Tuleb silmas pidada, et üksik- ja väikeseeriatootmisel kasutatakse harva protsesse, mis nõuavad rakiseid, valu- ja pressvorme eelkõige nende kõrge maksumuse tõttu. Suurseeria- ja hulgitootmise korral on vajalik aga protsessi automatiseerimine.)
2. Milline on soovitatav kvaliteedi tase võrreldes analoogsete toodetega turul?
3. Millised on kvaliteedikontrolli nõuded?
4. Millised on nõuded koostamisele?

5. Milline on toote eri osade paksus (kõige õhem osa, kõige paksem osa)?
6. Kas standardsuurus ja kuju on etteantud (seda nii lõppkuju kui ka lähtematerjali osas)? Milline on sobivaim lähtematerjal (leht, varbmaterjal, valand, pulber)?
7. Kas konstrueerimisel peab silmas pidama ka valmistusprotsessi (töödeldavus, valatavus, vormitavus, keevitavus, karastatavus)?
8. Milline on toote elutsüklil?
9. Kas toote valmistamisel on soov kasutada korduvkasutatavaid materjale?
10. Kas on soov minimeerida valmistusprotsessi kogu energiavajadust?

Muudeks arvesseminevateks mõjuriteks materjali valikul on hind, keskkonnamõjurid (tava-, minimaalne ja maksimaalne temperatuur; keskkond, selle oodatav korrosiivsus ja abrasiivsus), ja toote tööiga (kogu tööea maksumus alates lähtematerjali saamisest, energiast selle tootmiseks kui ka mõjust (jalajäljest) tootmisel). Sellele lisanduvad vastava toote kasutusega seotud kulud kogu tööea jooksul. Milline on oodatav järelevalve ja hooldus kasutusperioodil? Kas toode on remonditav, ümbertöödeldav?.

Lõppotsus on kompromiss materjali hinna, valmistamise kerguse, vastupidavuse ja kvaliteedi vahel. Materjali kättesaadavus on üks muudest arvesseminevatest mõjuritest. Kas valitud materjal on kättesaadav soovitud kuju, mõõtmete või koguse poolest? Kas materjal on kättesaadav kodus või tuleb see eksportida?

7.2. TOOTEARENDEUS

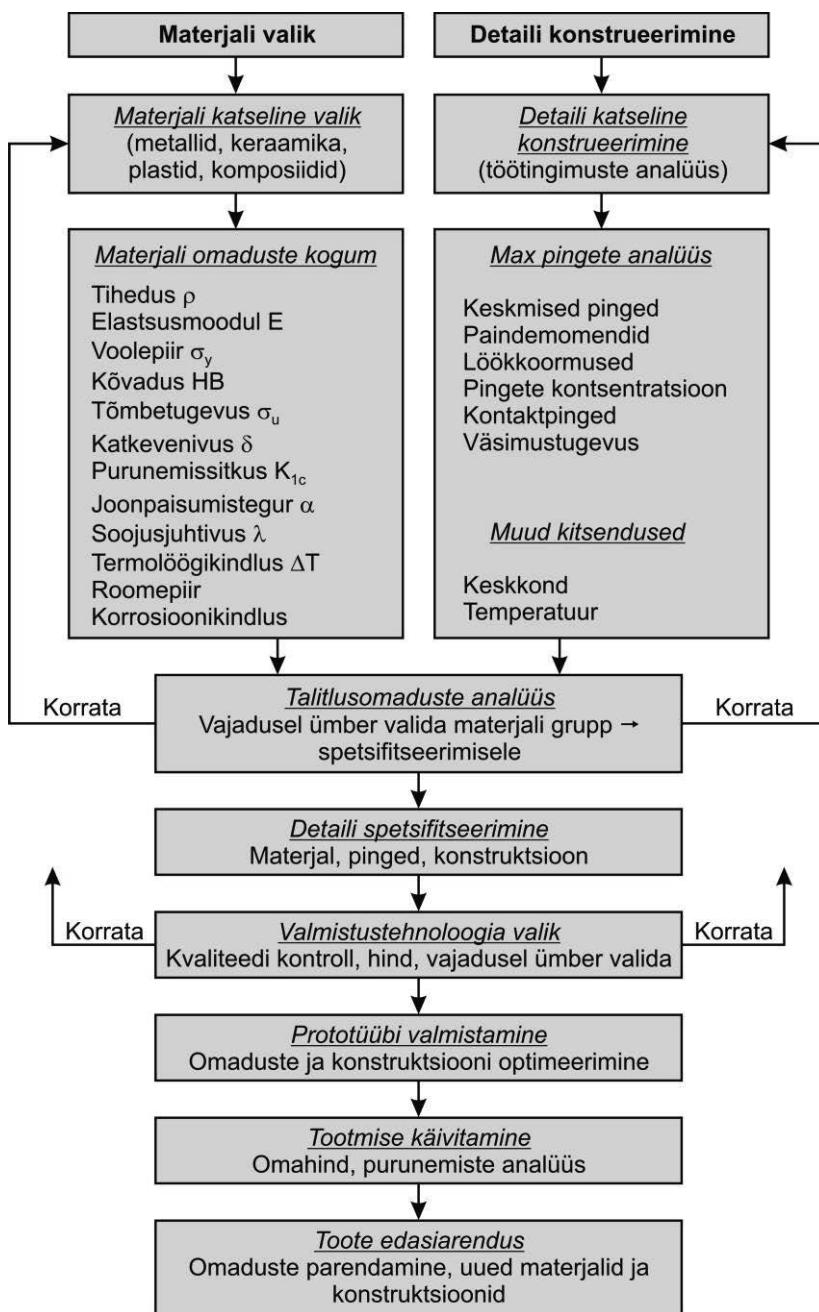
Tootearendus ja materjali valik võib olla seotud kahe juhuga:

- a) täielikult uue toote arendusega,
- b) olemasoleva toote täiustamisega.

Täielikult uue toote loomine eeldab toote valmistamiseks kõigi järjestikuste tegevuste – konstrueerimine → materjali valik → valmistustehnoloogia valik – läbimist, pidades silmas kõiki aspekte ja alternatiive.

Olemasoleva toote täiustamine eesmärgiga alandada hinda, tõsta kvaliteeti või lahendada toote kasutamisel üleskerkinud probleeme/puudusi ei pruugi sisaldada kõiki toote valmistamisega seotud tegevusi.

Nagu nähtub Jooniselt 7.2, on materjali valik ja tootearendus kaks paralleelselt läbiviidavat protsessi, mis algab detaili/toote materjalide katselisest valikust ja toote katselisest konstrueerimisest, sisaldab töötingimuste ja talitlusomaduste analüüsi, valmistehnoloogia valikut, prototüübi valmistamist ning jätkub tootmise käivitamisega ja toote edasiarendamisega.



Joonis 7.2. Materjalide valiku ja tootearenduse meetodika

7.3. MATERJALI VALIK LÄHTUDES KONSTRUKTSIOONITUGEVUSEST

Materjali valiku kriteeriumiteks on toote **konstruktsioonitugevus** (*structural strength*), mis on ühelt poolt materjali tugevusomaduste (nt staatiline tugevus, jäikus, sitkus) ja materjali/toote kestmisomaduste (vastupanu väsimusele, roomele kui ka korrosioonile ja kulumisele) kompleks ja mis kõige enam vastab detaili/toote talitlusomadustele. Konstruktsioonitugevuse hulka kuuluvad ka kriteeriumid, mis iseloomustavad purunemise iseloomu, eelkõige hapra purunemise vastu, s.o purustus-töö, haprumise temperatuur ja purunemissitkus.

7.3.1. Tugevusomadused

Mõistet „tugevus“ kasutatakse tunduvalt laiemalt. Selle all peetakse silmas eelkõige staatilist tugevust (vastupanu lühiajalistele koormustele normaaltemperatuuril), väsimustugevust (vastupanu pulseerivale või ajas muutuvale koormusele) ja roometugevust (vastupanu koormustele temperatuuridel, mis kutsuvad esile progresseeruva mõõtmete muutuse).

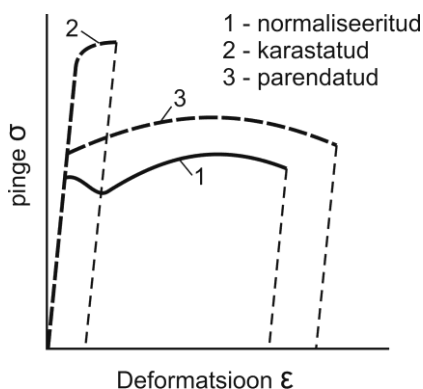
Pidades silmas tõmbeteimi lihtsust, antakse metalsete materjalide korral enamik tugevusnäitajaid, mis on määratud tõmbel, habraste materjalide korral ka surveteimil. Kui sitkete materjalide – metallide korral on omadused survele ligilähedased omadustega tõmbel, siis teistel materjaligruppidel võivad need märgatavalt erineda (Tabel 7.1).

Tabel 7.1. Mõningate materjaligruppide tõmbe- ja survetugevusnäitajad

Materjaligrupp	Tõmbetugevus või voolepiir, N/mm ²	Survetugevus, N/mm ²
Terased		
madalsüsinikteras S275,	275 ¹⁾	275
madalsüsinikteras C22 (normaliseeritud)	290 ¹⁾	290
kesksüsinikteras C45 (parendatud)	430 ¹⁾	430
Hallmalmid		
ferriitmalm	150 ²⁾	600
perliitmalm (kõrgtugev)	350 ²⁾	1400
Komposiidid		
klaasplast (60 % kiudu) ³⁾	360 ²⁾	360
Keraamika	–	2500
korund Al ₂ O ₃		

¹⁾ voolepiir, ²⁾ tõmbetugevus, ³⁾ pikikiudu.

Joonisel 7.3 on erinevalt termotöödeldud terase tõmbediagrammid.



Joonis 7.3. Tõmbediagrammid erinevalt termotöödeldud terase korral: 1 – normaliseeritud, 2 – karastatud, 3 – parendatud

Tugevuse tase

Nii metalsete kui ka mittemetalsete materjalide tugevuse taset võib vaadelda

- tugevuse absoluutväärtustes
- suhtelise tugevusega (eritugevusena)

Lähtudes tugevuse (voolepiiri) absoluutväärtustest, eristatakse nelja tugevustaset (vt Tabel 7.2).

Tabel 7.2. Metallide ja metallisulamite tugevusgrupid

Tugevuse grupp	Voolepiir, N/mm ²	Materjalide esindajad
Madaltugevad	0...250	Lõõmutatud puhtad metallid Madalsüsinikterased Mittetermotöödeldavad Al-Mg-sulamid
Keskugevad	250...750	Termotöödeldud Al-Cu- ja Al-Zn-sulamid Kõrge voolepiiriga konstruktsiooni-terased Kesküsinikterased Puhas titaan Korrosioonikindlad terased
Kõrgtugevad	750...1500	Titaanisulamid Berülliumpronksid Kesküsinikmadallegeerterased Kõrgtugevad madallegeerterased Dispersioontugevdatud korrosioonikindlad terased
Ülitugevad	> 1500	Martensiitvanandatud terased Patenteeritud traat Tööriistaterased

Madaltugevad

Tehniliselt puhaste metallide tõmbetugevus lõõmutatult piirdub *ca* 100 N/mm²-ga, kalestatud olekus kuni paarisaja N/mm²-ga. On kaks põhjust madaltugevate materjalide kasutamiseks:

- 1) odavus ja töötlemise lihtsus,
- 2) väikese tugevuse juures mõne teise omaduse olulisus (elektri- ja soojusjuhtivus jt).

Eelnimetatut silmas pidades piirdub materjali valik konstruktsiooniteraste valikuga (külml- ja kuumvaltsitud konstruktsiooniterastega S185, S235).

Kuna nimetatud teraste puuduseks on vähene korrosioonikindlus, pakuvad nende kõrval konkurentsi ka mittetermotöödeldavad alumiiniumisulamid (Al-Mg-, Al-Mn-sulamid), mille tugevus kalestatult võib ulatuda kuni 200 N/mm²-ni.

Kesktugevad

Siia gruppi kuulub suurem osa parendatud mittelegeerkonstruktsiooniteraseid (nt C60, S500Q jt voolepiiriga kuni 500 N/mm²), Al-sulameist termotöödeldud Al-Cu-sulamid ning tugevad Al-Zn-Cu-sulamid ja ka mõningad Cu-sulamid voolepiiriga kuni 500 N/mm².

Kõnealusesse gruppi kuuluvate *ca* 0,4 % C-sisaldusega parendatud teraste puuduseks võib olla väike läbikarastuvus (10...12 mm). Kui kõrvuti tugevusega on nõutav ka korrosioonikindlus, tuleb kasutada korrosioonikindlaid teraseid. Kui mittetermotöödeldud korrosioonikindlate austeniiteraste voolepiir on ainult 200...250 N/mm², siis kalestatud olekus võib see ulatuda 650 N/mm²-ni; korrosioonikindlate martensiit-teraste Cr-sisaldusega 12...14 % voolepiir olenevalt C-sisaldusest võib ulatuda kuni 650 N/mm².

Kõrgtugevad

Kõrgtugevad materjalid on enamasti kõrglegeeritud ja keeruka termotöötusega parendatud legeerterased, mitterauasulameist kuulub siia gruppi ainult berülliumpronks (voolepiiriga 900 N/mm²) ja mõningad titaanisulamid.

Parendatud kesksüsinikmadallegeerterastel (Ni-Cr-Mo-terased) on kergesti saavutatav voolepiiri alumine tase (750 N/mm²); voolepiiri ülemine tase (1500 N/mm²) on kättesaadav karastamise ja järgneva vanandamisega (dispersioontugevdamisega). Martensiitsete kroomteraste voolepiir võib ulatuda 900 N/mm²-ni. Nende sitkust saab suurendada Ni lisamisega.

Tugevamate Ti-sulamite voolepiir võib ulatuda väga tugevate teraste omani, s.o 1250 N/mm²-ni, kuid pidades silmas Ti-sulamite väiksemat tihedust (4,5 g/cm³ 7,8 g/cm³ vastu) on nad ligi kaks korda suurema eritugevusega (vt Tabelit 7.3).

Ülitugevad

Siia gruppi kuuluvad eelkõige keerukalt legeeritud ja termomehaaniliselt töödeldud terased, nagu martensiitvanandatud terased jt. Viimased terased olid kuni viimase ajani lennuki teliku mehhanismi hammasrataste põhiline materjal. Väga kõrge voolepiir on saavutatav ainult vastavate teraste termomehaanilise töötlemise teel.

Erinevate materjaligruppide eritugevus (materjali voolepiiri või tugevuspiiri N/mm^2 suhe tema tihedusse ρ , g/cm^3) on Tabelis 7.3.

Tabel 7.3. Mõningate materjalide eritugevus

Materjaligrupp	$R_{p0,2/\rho}$ või $R_{m/\rho}$	Materjaligrupp	$R_{p0,2/\rho}$ või $R_{m/\rho}$
<u>Metallid</u>		<u>Plastid</u>	
malmid	100 ¹⁾	polüetüleen (PE)	40 ²⁾
terased		polüvinüülkloriid (PVC)	40 ²⁾
mittelegeerterased	130 ²⁾	plastkomposiidid (EP + 50 % klaaskiudu)	225 ²⁾
legeerterased	210 ²⁾	<u>Keraamika</u>	
Al-sulamid	180 ²⁾	korund (Al_2O_3 keraamika)	100 ¹⁾
Cu-sulamid	80 ²⁾	ränitriid (Si_3N_4 keraamika)	220 ¹⁾
Ti-sulamid	320 ²⁾	süsinikkomposiidid	350 ¹⁾
Mg-sulamid	200 ²⁾	<u>Puit</u>	
<u>Metallkomposiidid</u>		mänd	160 ¹⁾
Al-B-komposiidid (50 %B)	90 ²⁾	tamm	140 ¹⁾

1) $R_{m/\rho}$

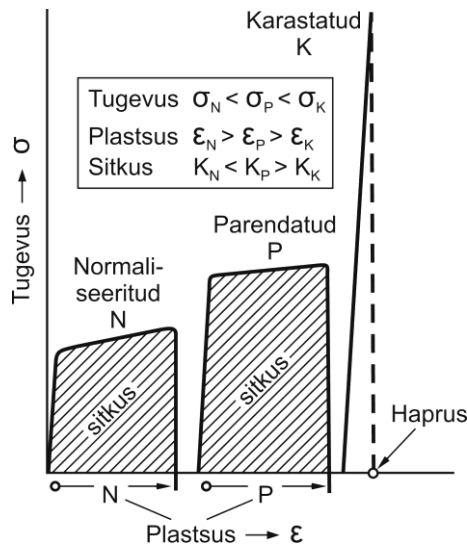
2) $R_{p0,2/\rho}$

Sitkus

Tehnomaterjalide korral on küll olulisem omadus tugevus, kuid mitte peamine. Purunemispõhjuste analüüs on näidanud, et habras purunemine madalatel temperatuuridel võib toimuda ilma eelnevate märgatavate deformatsioonideta voolepiirist madalamatel pingetel. Siit on ka oluline sitkus ja sellest tulenev töökindlus; niisiis tugevus kombinatsioonis sitkusega (Joonis 7.4).

Tegelikkuses on võimalik tagada materjali vajalik sitkus mis tahes temperatuuril. Selleks on vaja teada:

- 1) millist sitkuse taset on vaja tagamaks rahuldavat töökindlust vastuvõetava hinna korral;
- 2) kuidas seda numbriliselt väljendada.



Joonis 7.4. Tugevuse ja plastsuse vaheline seos erinevalt termotöödeldud teraste korral.

Valitud tugevuse tasemel mõjutab suurendatud sitkus oluliselt hindu (enamasti hind tõuseb), mistõttu materjali valikul ei peaks konstruktor näitama selle suuremat sitkust kui vaja.

Sitkus (*toughness*) on vastupanu purunemisele. Sitkuse puudumist iseloomustab selline materjali omadus nagu **haprus** (*brittleness*).

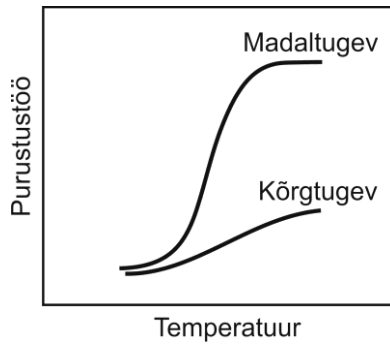
Materjali sitkuse mõjureiks on tavaliselt temperatuur, deformatsiooniaste, pingete intensiivsus. Sitkus väheneb temperatuuri alanemisega, deformatsiooniastme tõusuga ja pingete intensiivsuse tõusuga.

Kui materjal peab töötama madalatel temperatuuridel, siis katsetatakse seda samuti madalatel temperatuuridel, sest mõne materjali sitkus väheneb järsult temperatuuri langedes. Materjali hapruse suurenemist (purustustöö või lõõgisitkuse vähenemist) madalatel temperatuuridel nimetatakse külmahapurumiseks ja materjali omadust külmahapuruseks.

Seetõttu hinnatakse materjali vastupanu purunemisele põhiliselt kahe näitajaga:

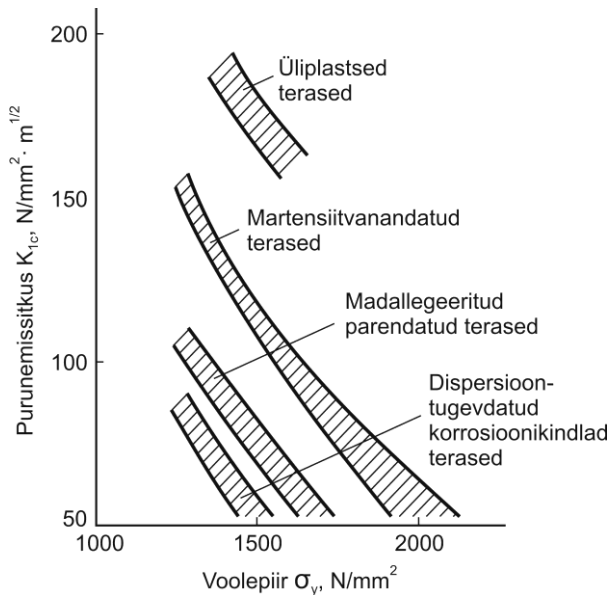
- 1) haprumise temperatuuriga (külmahapurustlõuaga),
- 2) purunemismehhanismiga.

Metallsete materjalide külmahapurustlõu määramise aluseks on teimimisel saadud purustustöö temperatuurist sõltuvuse kõverad (Joonis 7.5). Puhaste metallide ja madaltugevate teraste korral on see üleminekugraafik ligilähedaselt vertikaalne; kõrgtugevate materjalide (nii terased kui ka mitterauasulamid) lõõgisitkus olenevalt teimimistemperatuurist iseloomustab suur hajuvus.



Joonis 7.5 Teraste purustustöö olenevus temperatuurist

Metallsete materjalide valiku kriteeriumiks, lähtudes sitkusest, on ka purunemissitkus K_{IC} , kusjuures eksisteerib pöördvõrdeline seos materjali tugevuse ja sitkuse vahel (Joonis 7.6). Seega ilma purunemissitkust teadmata on võimalik prognoosida kõrgtugevate materjalide kalduvust haprale purunemisele. Samas on aga kõrgtugevate materjalide valik mõnevõrra kergem, kuna üldiselt on vajalikud tugevusnäitajad kättesaadavad ja arvessevõetavad purunemisega seotud tugevusarvutustes, lähtudes rakendatavatest pingetest σ .



Joonis 7.6. Seos teraste purunemissitkuse ja voolepiiri vahel

Mis puutub madaltugevatesse materjalidesse, siis näiteks ehitusterastel antakse purustustöö tasemed erinevatel temperatuuridel, samas mitterauasulamitel need andmed praktiliselt aga puuduvad.

Polümeermaterjalide kasutamist tehnikas soosib nende suur sitkus. Kuna plastide kasutus aasta-aastalt laieneb, on oluline purunemismehhanismi tundmine nii purunemiste analüüsi kui ka konstrueerimise kontekstis. Mitmete füüsikaliste omaduste iseärasuste tõttu ei sobi keraamika ja metallide purunemismehhanismid plastidele.

Erinevat materjalide tõmbetugevuse ja purunemissitkuse võrdlevad andmed on Tabelis 7.4.

Tabel 7.4. Mõningate materjalide tõmbetugevus ja purunemissitkus K_{1C}

Materjal	Tõmbetugevus R_m , N/mm ²	Purunemissitkus K_{1C} , N/mm ² · m ^{1/2}
<u>Terased</u>		
Normaliseeritud madalsüsinikterased	250...500	50
Parendatud kesksüsinikterased	1000...1500	100...50
Martensiitvanandatud terased	1500...2000	150...50
<u>Alumiiniumisulamid</u>		
Duralumiinium	350...550	20...55
Kõrgtugevad Al-Zn-sulamid		
<u>Titaanisulamid</u>		
Kahefaasilised ($\alpha+\beta$)-sulamid	800...1100	30...60
<u>Termoplastid</u>		
PMMA, polüstüreen	30	1
Akrüülplastid, polükarbonaat	–	2
<u>Keraamika</u>		
Korund (Al ₂ O ₃)	–	2,5...12

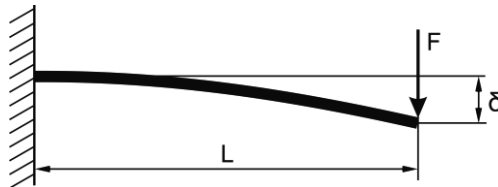
Jäikus

Jäikus on materjali võime säilitada oma kuju koormuse all. Jäikus on oluline, kui jutt on läbipaindest või energia absorptsioonist.

Läbipaine suureneb jäikuse vähendes. Vaatleme tala pikkusega L , mille läbipaine δ (Joonis 7.7) võrdub

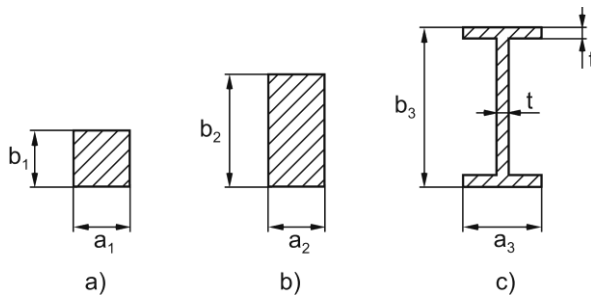
$$\delta = \frac{F \cdot L^3}{3EI}, \quad (7.1)$$

kus I on tala ristlõike inertsimoment.



Joonis 7.7. Otsast koormatud konsooltala läbipaine

Siit ilmneb, et näiteks kahest erinevast materjalist – üks alumiiniumisulamist, teine terasest – ühesuguse ristlõike ja inertsimomendiga tala korral on läbipaine alumiiniumitalal 3 korda suurem kui terastalal (alumiiniumi elastsusmoodul on 1/3 terase elastsusmoodulist). Kuna elastsusmoodul on struktuurist mitteolenev näitaja, siis praktiliselt pole võimalik ei struktuuri muutmise (termotöötuse) ega ka legerimise teel muuta elastsusmoodulit enam kui 10 % ulatuses mõlemas suunas. Seega, väikese jäikusega materjali kasutamisel on see kompenseeritav inertsimomendi suurenemisega. Teed, kuidas seda teha, on seotud eelkõige erinevate profiilide kasutamisega. Joonisel 7.8 on esitatud kolm võrdpindset profiili ($A = 31,4 \text{ cm}^2$), mille inertsimomendid (siit ka jäikused) erinevad tunduvalt (suhted vastavalt 1:3:53,3).



Joonis 7.8. Kolm võrdpindse ristlõikega profiili ($A = 31,4 \text{ cm}^2$): a – ruudukujuline ($a_1 = b_1$, $I_1 = 82,16 \text{ cm}^4$), b – ristkülikukujuline ($b_2 = 3a_2$, $I_2 = 246,5 \text{ cm}^4$), c – I-tala ($b_3 = 3a_3$, $I_3 = 4381 \text{ cm}^4$)

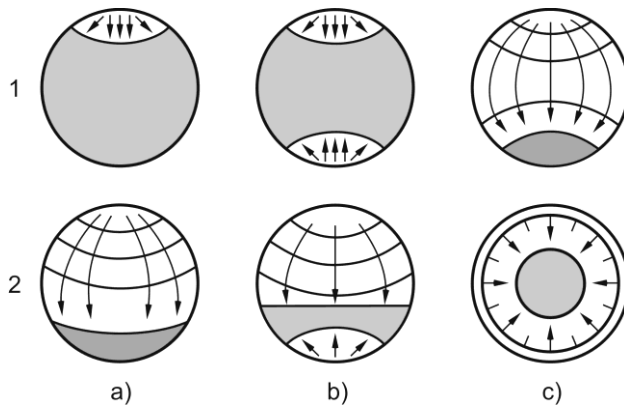
7.3.2. Kestvusomadused

Materjali/toote kestvusomadusteks on ühelt poolt tugevusomadused (väsimustugevus, roometugevus), teiselt poolt keskkonnast tingitud nõutavad omadused (korrosioonikindlus, kulumiskindlus).

Suure osa masinaosade purunemise põhjuseks on materjali väsimus. Väsimuspurunemisele on iseloomulik ka asjaolu, et võib tekkida detailides, milles pinged on allpool materjali voolepiiri.

Materjali mikroosade korduva plastse deformatsiooni tõttu purunevad aatomitevahelised sidemed järk-järgult, mille tulemusena materjali katketugevus väheneb. Väsimuspragu tekib momendil, kui katketugevus väheneb mõjuvate pingeteni. Kuna tegelikud pinged ristlõike ulatuses on väikesemad materjali tugevuspiirist, ei põhjusta väsimuspragu detaili purunemist. Edasisel tsüklilisel koormusel muutub väsimuspragu sügavamaks ja materjali tegelik ristlõikepindala väheneb. Kui tegelikud pinged ületavad tugevuspiiri, siis detail puruneb.

Väsimuspurunemise pind koosneb alati kahest tsoonist: väsimuspurunemise ja lõpliku staatilise purunemise alast (vt p 1.3 ja Joonis 7.9).



Joonis 7.9. Väsimusmurde skeemid: a – tõmbel-survel; b – kahepoolsel paindel; c – pöörleval paindel (1 – suured nimipinged, 2 – väikesed nimipinged; hele – väsimuspurunemise ala, hall – lõpp-purunemise ala)

Väsimus- ja staatilise purunemise ala pindalade suhe iseloomustab mõjunud pingete suurust: väikestel pingetel on väsimuspurunemise ala suur, suurtel pingetel aga on lõpp-purunemise ala suur. Väsimuspurunemise ala on sile, sageli väsimuspraorenemist iseloomustavate joontega. Lõpp-purunemise ala on kristalne või kiuline.

Eristatakse paljutsüklilist (pingetel alla voolepiiri) ja vähetsüklilist väsimust (pingetel üle voolepiiri) vahel. Paljutsüklilise väsimuse korral ületab koormustsüklite arv 10^4 tsüklit ja selle all kannatavad kõik pöörlevad ja vibreerivad süsteemid (rattad, võllid, masinaosad), vähetsüklilise väsimuse korrale ei ületa koormustsüklite arv 10^4 ning see iseloomustab karkasskonstruktsioone, turbiiniosasid jt ülekoormustel töötavaid detaile.

Tabelis 7.5 on esitatud mõningate konstruktsioonimaterjalide gruppide (terased ja mitterauasulamid) tõmbetugevus, voolepiir ja väsimuspiir. Mittelegeer- ja madallegeerteraste korral kehtib pöördpaindel väsimuspiiri ja tõmbetugevuse vahel ligikaudne seos

$$\sigma_{-1} = 0,5\sigma_u \quad (7.2)$$

Tabel 7.5. Metallide tõmbetugevus, voole- ja väsimuspiir

Materjal	Tõmbetugevus R_m , N/mm ²	Voolepiir $R_{p0,2}$, N/mm ²	Väsimuspiir σ_{-1} , N/mm ²
<u>Terased</u>			
Mittelegeerterased (külmtõmmatud)	455	275	240
Mittelegeerterased (parendatud)	750	475	340
Legeerterased (parendatud)	2000	1720	690
Alumiiniumisulamid (duralumiinium)	420	315	97
Titaanisulamid	1035	885	515
Vasesulamid (messing <i>ca</i> 30 % Zn)	530	330	145
Magneesiumisulamid	215	110	80

Metallsete materjalidest detailide väsimus oleneb paljudest mõjuritest (pinge, temperatuur, mikrostruktuur, konstruktsiooni iseärasused, pinnasiledus). Teraste väsimuspiir oleneb suuresti teraste keemilisest koostisest, termo- ja pinnatöötlustest. Nii on poleeritud pinnaga kui ka kalestatud pinnaga katsekehade väsimuspiir *ca* 20...30 % kõrgem töötlemata pinnaga katsekehade omast. Teistest pinnatöötlustehnoloogiatest, näiteks termokeemiline töötlus, tõstab oluliselt väsimuspiiri nitriitimine, eelkõige paindel ja väändel. Galvaanpinded on aga kahjulikud väsimustugevuse seisukohalt.

Roome

Roome (*creep*) seisneb aeglasel pidevas deformeerumises, mis oleneb pingetest, temperatuurist ja ajast:

$$\varepsilon = f(\sigma, T, t) \quad (7.3)$$

Metallide roomavus ilmneb rekristallisatsioonitemperatuuridele lähedastel temperatuuridel

$$T > 0,3...0,4 T_s, K \quad (7.4)$$

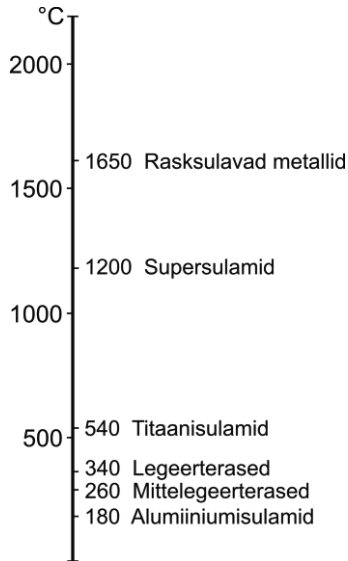
Terastel ja malmidel ilmneb roomavus temperatuuridel üle 300 °C ja on seda suurem, mida kõrgem on temperatuur. Madala sulamistemperatuuriga metallisulamitele (näiteks alumiiniumisulamid) on roomavus täheldatav ka toatemperatuuril.

Paljude kõrgtugevate teraste korral viivad juba suhteliselt väikesed roome-deformatsioonid (1 %) purunemiseni. Seetõttu materjali valikul detailide korral tööks kõrgetel temperatuuridel tehakse eelkõige kindlaks:

- 1) roome lubatavus ja selle vastavus purunemisele vastava roome-deformatsiooniga,
- 2) vajalik tööiga – purunemiseni kuluv aeg.

Roomekindlate metalsete materjalide valikul on esimene nõue kõrge sulamis-temperatuur. Erinevalt töökindlusest (sitkusest) on roomekindlamad jämeteralisemad struktuurid, legeerteraste kõrval supersulamid, dispersioontugevdatud materjalid.

Joonisel 7.10 on metalsete tehnomaterjalide (alustades alumiiniumist ja lõpetades rasksulavate metallidega) kasutuspiirid, lähtudes mehaanilistest omadustest (roomepiirist).



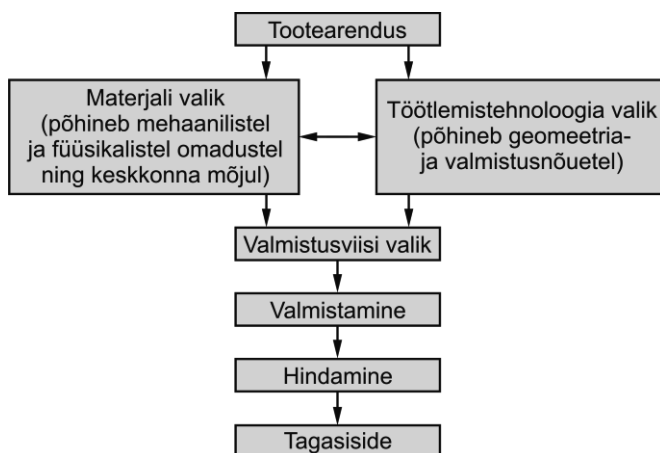
Joonis 7.10. Erinevate metalsete tehnomaterjalide ülemine kasutuspiir

Termoplastidele on erinevalt metallidest roome oluline juba toatemperatuuril. Ainult vähesed neist sobivad pidevaks tööks temperatuuridel üle 100 °C.

7.4. DETAILI/TOOTE VALMISTUSTEHNOLOOGIA VALIK

7.4.1. Materjalide ja valmistustehnoloogiate vahelised seosed

Materjali valik on otseselt seotud tehnoloogia valikuga. Ei ole mingit kasu suurepärase omadustega materjalist, kui sellest ei ole võimalik valmistada toodet või pooltoodet majanduslikult mõistlike kulutustega. On küllalt tavaline, et materjali töötlemise maksumus ületab materjali maksumuse mitmekordselt. Silmas pidades materjalide töötlemisprotsesside (edaspidi: valmistustehnoloogiate) mitmekesisust, saab selgeks, kui võrd oluline on tehnoloogia valikul õige otsuse tegemine. Resümeerides – materjali ja selle töötlemistehnoloogia valik tuleb alati teha paralleelselt (Joonis 7.11).



Joonis 7.11. Toote valmistamise alternatiivskeem – materjali ja töötlemistehnoloogiate paralleelne valik

Tehnilistel põhjustel ei ole tehnoloogia valik täiesti vaba. Selliseid materjale nagu kõvamagnetmaterjalid, kõvasulamid jt ei ole tavaliselt võimalik mehaaniliselt töödelda (v.a lihvimine), mistõttu saadakse nendest materjalidest pooltooteid või tooteid enamasti valutehnoloogiat või pulbermetallurgiat kasutades.

Nagu nähtub Jooniselt 7.12, on nii materjali valikul piirangud töötlemistehnoloogiatele kui ka töötlemisviiside valikul piirangud materjalidele. Igal materjalil on kompleks püsiomadusi, nii tugevusi kui ka nõrkusi. Erinevate valmistustehnoloogiatega kaasnevad materjali erilised omadused ja need ei pruugi olla alati kasulikud (nt anisotroopia, poorsus, jääkpinged). Tugevdavad tehnoloogiad, näiteks termotöötlus, parandavad teatud omadusi, samas aga mõjuvad vastupidi teistele.

Materjal \ Valmistusviis	Materjal								
	Malm	Teras	Alumiinium	Vask	Magneesium	Nikkel	Raskuslavad metallid	Titaan	Tsink
Liivvormvalu	X	X	X	X	X	X			0
Kokillvalu	X	0	X	0	X	0			0
Survevalu			X	0	X				X
Sulavmudeltäppisvalu		X	X	X	0	0			0
Vormstantsimine		X	0	0	0	0	0	0	
Ekstrusioon		0	X	X	X	0	0	0	
Külmjäändamine		X	X	X		0			
Lehtstantsimine		X	X	X	0	X		0	0
Keermestamine	0	X	X	X	0	X	0	0	0
Pulbermetallurgia	X	X	0	X		0	X	0	

X - Hästi teostatav
0 - Teostatav raskustega

Joonis 7.12. Materjalide ja detaili/toote valmistustehnoloogiate kokkusobivus

Tuleb silmas pidada, et mitmed tehnoloogilised protsessid mõjutavad töödeldava materjali omadusi. Näiteks metallide valtsimist ja teisi survetöötlustehnoloogiaid kasutades muutub lähtematerjali struktuur. Valutingimused, näiteks jahtumiskiirus, sooja äravoolu suund jne mõjutavad samuti oluliselt valandite struktuuri. Tehnoloogia mõju materjali struktuurile ja omadustele ei tee neid kasutuskõlbmatuks. Tehnoloogiliste protsesside mõju tuleb arvestada ja võimaluse korral kasutada.

Detaili/toote valmistustehnoloogiate eesmärkideks on tagada toodete kuju ja mõõtmed, struktuur ja omadused ning lõppviimistlus.

Kuju ja mõõtmed

Toodete (pooltoodete) kuju ja mõõtmeid tagavad protsessid võime liigitada kolme suurde gruppi:

- 1) vormimine,
- 2) lõiketöötlemine,
- 3) koostamine (kinnitamine ja liitmine).

Vormimise all mõistame vedel- või plastset vormimist. Toodete ja pooltoodete vedel- vormimise näideteks on metallide valu (liivvormvalu, survevalu jne) ning plastide vormimine vedelas olekus (survevalu, ekstrusioon jne). Plastse vormimise all mõistame metallide survetöötlemist (sepistamine, stantsimine, valtsimine jne), samuti pulbortoorikute vormimist (külmpressimine, isostaatpressimine jne).

Valutoodete ehk valandite mehaanilised omadused jäävad üldjuhul alla surve- töödeldud toodete vastavatele omadustele. Seda põhjustavad valustruktuuri iseloomustavad jämeteraline struktuur, tühikud, likvatsioon ja samuti sisepinged. Survetöötlemise teel saadud toodete eelisteks on üldjuhul soodsam struktuur, plastse deformeerimise ehk metalli kalestumise ja sellest tulenevad paremad mehaanilised omadused, aga ka survetöödeldud toodete sobiv kuju. Survega töötlemist pole võimalik kasutada kõrge voolepiiriga metallisulamite korral.

Lõiketöötlemist iseloomustab energia- ja töömahukus, materjali madal kasutustegur ning tehnoloogilise sisseseade kallidus. Puudustele vaatamata on lõiketöötlus säilitanud oma tähtsuse tänu paindlikkusele ja võimalusele kõrvaldada teiste tehnoloogiate defekte ja puudusi.

Lõiketöötlemise eeliste hulka kuulub samuti võimalus saada tahkistest igasuguse kujuga tooteid. Piirangud on vaid õõnsate detailide töötlemisel. Lõiketöötlemine on teistest tehnoloogiast otstarbekam toodete väikese arvu, eriti üksikute prototüüpide valmistamisel. Lõpuks juhtub, kui teisi tehnoloogiaid ei saa kasutada, on lõiketöötlemine ainsaks võimalikuks tehnoloogiaks. Olgu siinjuures mainitud, et toorikute (pooltoodete) tootmise tehnoloogiate (valutehnoloogia, survetöötlemine, keevitamine, jootmine) täiustumisega kaasneb lõiketöötlemise osatähtsuse pidev vähenemine.

Koostamine võib toimuda, kasutades mehaanilisi, metallurgilisi või keemilisi meetodeid. Mehaaniline liitmine – kinnitamine – toimub neete, polte ja teisi kinnitusdetaile kasutades. Mehaanilist ühendamist kasutatakse eelkõige liidete lahtivõetavuse ja tehnoloogia lihtsuse tõttu. Pealegi halvasti keevitatavatest metallisulamitest detailide korral on see sageli ainuvõimalik lahendus.

Metallurgiline liitmine on keevitamine ja jootmine. Keevisliide on mittelahtivõetav ja jooteliitega võrreldes suurema tugevusega. Keevitamine leiab kasutamist keeviskonstruktsioonide tootmisel. Jootmine on levinud elektrotehnikas ja elektroonikas kvaliteetse elektrilise kontakti saamiseks.

Keemiliseks liitmismeetodiks on liimimine. Puidu puhul on liimimine prevaleeriv tehnoloogia, samal ajal kui paljude plastide puhul liimimine ei taga piisava tugevusega liite saamist. Liimimist kasutatakse üha sagedamini ka metallist pooltoodete liitmisel. Raskusi tekib suuregabariidiliste liimkonstruktsioonide saamisel konstruktsioonelementide täpsusele ja pinnatöötlusele esitatavate nõuete tõttu.

7.4.2. Tehnoloogia valiku põhimõtted

Töötlemisprotsessi (tehnoloogia) valikul on tarvis arvesse võtta toodete (detailide) arvu (tootepartiid), suurust ja massi, kuju keerulisust, mõõtmete tolerantse ja nõutavat pinnaviimistlust.

Tehnoloogia mõjurid

Tootepartii suurus

Üks toode tehakse tavaliselt vaid prototüüpide valmistamise korral. Suurseeria- ja hulgitootmisel ulatub toodete (detailide) arv kümnete tuhandeteni, isegi miljoniteni. Suurem tootepartii võimaldab oluliselt vähendada tooteühiku maksumust, kuna toodete suurem arv võimaldab kasutada tänapäevasemaid tootmismeetodeid, tehnoloogilist sisseseadet ja rakistust.

Mass ja mõõtmed

Igale tehnoloogiale ja materjalile kehtivad mõõtmete piirangud. Mõõtmete ülemised piirid on enamasti seotud tehnoloogilise rakistuse maksimaalselt võimalike mõõtmetega, näiteks survevaluvormide suurus valamisel ja stantside maksimaalsed mõõtmed vormistantsimisel. Teras pole hea valumetall (kõrge sulamistemperatuur), kuid põhimõtteliselt on võimalik toota kuni 200 tonniseid terasvalandeid. Samas on malmist võimalik toota veelgi suuremaid valandeid kui valuterastest. Terasest sepiste maksimaalne mass tavaliselt ei ületa mõndsada kg.

Enamiku materjalitehnoloogiate puhul on samuti olemas mõõtmete ja massi alumised piirid. Näiteks stantsimisel ja sepistamisel ei toodeta tavaliselt alla 0,1 kg massiga stantsiseid ja sepeid, samas võimaldab survevalu toota mõnekümnegrammise

Võimalikud valutehnoloogia protsesside valikud erinevad valuvormi materjali, suuruse ja samuti valandite partii suuruse poolest, mida saab majanduslikult põhjendatult toota. Valuvormi materjali valikut mõjutavad põhiliselt kolm tegurit:

- hind,
- valandi kuju ja mõõtmete täpsus,
- soojusfüüsikalised omadused (termiline püsivus).

Valutoodete (valandite) mehaanilised omadused jäävad üldjuhul alla survetöödeldud toodete (sepised, stantsised) vastavatele omadustele. Seda põhjustavad valustruktuuri (valatud metalli struktuuri) iseloomustavad tühikud (poorid), lisandite suur kontsentratsioon ja ebahütlane jagunemine (likvatsioon), jämeteraline struktuur ja samuti sisepinged.

Tühikud ja poorsus on tingitud gaasidefektidest (gaasipoorsus ja -tühikud) või kahanemisdefektidest (kahanemispoorsus ja -tühikud). Gaasidefekte põhjustavad gaaside lahustuvuse erinevused sula- ja tardmetallis, valuvormi liigne niiskus või puudulik gaasiläbilaskvus. Kahanemisdefektid tekivad valandi massiivsete osade puudulikul toitmisel sulametalliga.

Jämateralise struktuuri põhjustab aeglane jahtumine valandi suure ristlõikega osades või samuti väikese soojusjuhtivusega mittemetalsest vormimaterjalist.

Peeneteralise struktuuriga, tühikute ja poorideta valumetalli omadused ei jää survetöödeldud metalli omadustele oluliselt alla. Sageli on see saavutatav vaid tehnoloogilise protsessi märgatava keerulisuse ja kallidusega, mis ei tarvitse olla majanduslikult põhjendatud. Seetõttu peab valandit projekteeriv konstruktor enamasti arvestama valumetalli halvemaid mehaanilisi omadusi survetöödeldud metalliga võrreldes.

Eeltoodut arvestades eelistatakse valutehnoloogiat järgmistel juhtudel:

- 1) valumetalli tugevus on kõnealustes kasutamistingimustes piisav,
- 2) toote valutehnoloogia abil lihtsalt saadav kuju või saavutatav massi kokkuvõtte on valumetalli halvematest omadustest olulisemad,
- 3) toote keeruline kuju või kui valutehnoloogia ongi ainuvõimalik tehnoloogiline lahendus (kasutatud materjalist või toote kujust tingituna),
- 4) valutehnoloogia on erinevatel põhjustel majanduslikust seisukohast eelistatavam.

Kõikidest metallisulamitest ei ole valandite tootmine ühtviisi tehniliselt ja majanduslikult otstarbekas. Sageli osutub, et potentsiaalselt parimate mehaaniliste omadustega metallid on halbade valuomadustega. Näitena saab tuua teraseid ja rasksulavaid metalle, mida iseloomustab kõrge sulamistemperatuur.

Survetöötlemine (vt II osa, 8. ptk)

Survetöötlemise teel toodetakse tükktöoteid (tükktoorikuid) – sepiseid ja stantsiseid.

Survetöödeldud metalli kastutamisel on valumetalliga võrreldes põhiliselt kaks eelist:

1. Üldjuhul soodsam struktuur ja sellest tulenevad paremad mehaanilised omadused. Just soodsama struktuuri ja mehaaniliste omaduste ning sellest tuleneva suurema töökindluse tõttu leiavad sepised ja stantsised laialdast kasutamist lennuki- ja raketiehituses, autotööstuses.
2. Survetöödeldud toodetele (pooltoodetele) sobiv kuju. Näiteks sel põhjusel on lehtmetsalli sügavtõmbamine õhukeseseinaliste, kergete teras- ja alumiiniumnõude tootmisel eelistatud, võrreldes valutehnoloogiaga, kus on seinapaksuse suhtes piirangud. Vastupidi, paksuseinalised suure tugevusega nõud toidu valmistamiseks kõrgendatud rõhul võivad olla valmistatud valutehnoloogiast kasutades.

Suured plastsed deformatsioonid, eriti juhul kui need toimuvad prevaleerivalt ühes suunas, põhjustavad märgatavat struktuuri ja omaduste anisotroopiat. Eristatakse kristallograafilist ja mikrostruktuurset anisotroopiat. **Kristallograafilist anisotroopiat** (*crystallographic anisotropy*) iseloomustab kristallograafiliste pindade prevaleeriv orienteerumine mingis suunas. Selline anisotroopia on mõnikord soovitatav. Näiteks saab tuua elektrotehnilise teraspleki, millest lõigatakse välja trafode ja elektrimootorite magnetahelate elemente või spetsiaalset, sügavtõmbamisoperatsioonide tarvis toodetavat plekki.

Mikrostruktuurset anisotroopiat (*microstructural anisotropy*) iseloomustab terade või sekundaarse faasi (karbiidide ja teiste metalliühendite) orienteerumine maksimaalsete deformatsioonide suunas – vastavalt metalli kiud- või kihtstruktuur. Mikrostruktuurne anisotroopia on enamasti ebasoovitav, kuna põhjustab materjali madalat sitkust maksimaalsete deformatsioonide suunale risti olevates suundades.

Mikrostruktuurse anisotroopia esimest juhtu – kiudstruktuuri – saab kõrvaldada termotöötlemisega (rekristalliseerivat lõõmutamist kasutades) ja teist juhtu – kihtstruktuuri – läbise pistamisega („läbimuljumisega“).

Mehaaniline töötlemine plastse deformatsiooni teel pakub rea võimalusi toodete ja pooltoodete mehaaniliste omaduste muutmiseks. Lihtsaim meetod on **kalestamine** (*work hardening, strain hardening*). Kalestatud valtsmetalli (või tõmmatud traadi) kasutamisel tuleb arvestada, et selliseid pooltooteid ei ole edasisel vormimisel võimalik kuigipalju täiendavalt plastset deformeerida. Suuri plastseid deformatsioone eeldava sügavtõmbamise tarvis kasutatakse seetõttu vaid lõõmutatud plekki. Mõningaid metallisulameid, näiteks titaanisulameid, saab sügavtõmmata vaid ettekuumutatult.

Plastsetest madalsüsinikerastest tooteid on võimalik valmistada külmpressimist (pressstantsimist) ja külmmäändamist kasutades. Külmsurvetöödeldud ning kalestu-

nud toodetel on kõrge voolepiir ja nad ei vaja täiendavat termotöötlust. Külmsurvetöödeldud toodete eeliseks on samuti suurepärase pinnakvaliteet.

Pulbermetallurgia (vt II osa, 10. ptk)

Pulbermetallurgia on metallurgiaharu, kus detaile (pooltooteid) saadakse metallide ja/või mittemetallide pulbreid kasutades. Pulbermaterjalidest tooted on enamasti piisavalt täpsed ega vaja täiendavat töötlemist. Harvemini toodetakse pulbermaterjalidest pooltooteid.

On kaks peamist põhjust, miks eelistatakse pulbermetallurgiat teistele võimalikele tehnoloogiatele: 1) tehnilised põhjused – teiste tehnoloogiate kasutamise raskus või võimatus; 2) majanduslikud põhjused – pulbermetallurgia on majanduslikult eelistatud alternatiivsete tehnoloogiatega võrreldes. Pulbermetallurgia on eriti sobiv seeriatootmises, näiteks autoehituses.

7.4.3. Koostamine

Koostamine võib toimuda, kasutades mehaanilisi, metallurgilisi või keemilisi meetodeid. Meetodi valik oleneb eelkõige liite lahtivõetavuse või mittelahtivõetavuse nõudest. Keevis-, kõvajoodis- ja liimliited projekteeritakse tavaliselt mittelahtivõetavatena. Mittelahtivõetavatena projekteeritakse samuti mõningad mehaanilised kinnitusega liited, näiteks neetliited. Kruvi- ja poltühendusi, samuti pehmejoodisliiteid on võimalik vajadusel lahti võtta.

Mehaaniline kinnitus

Keermesliited (*screw joints*). Detailide lahtivõetavat kinnitamist tehakse enamasti polte ja kruvisid kasutades. Maksimaalne kinnitusjõud kinnitusdetailis ei tohi esile kutsuda plastseid deformatsioone. Seetõttu peamine nõue kinnitusdetaili materjalile on piisavalt kõrge elastsuspiir. Juhul kui on vaja saavutada hermeetilist liidet (näiteks surveanumad), on oluline kinnitusdetaili jäikus (kõrge elastsusmoodul), sest kinnitusdetaili ebapiisava jäikusega kaasnevad märgatavad elastsed deformatsioonid ja seetõttu liite tiheduse vähenemine. Tuleb siiski silmas pidada, et tsüklilistel koormustel on väiksema jäikusega kinnitusdetaili materjali kasutamisel pingete amplituud väiksem. Lisaks jäikusele nõutakse kinnitusdetailide materjalidelt piisavat plastsust deformeerimiseks (tavaliselt külmalt, harvem kuumalt), näiteks polti pea külmjämendamiseks ja keermespealerullimiseks.

Plastsetest madalsüsinikerastest kinnitusdetailid sobivad enamikus kasutamistingimustes töötemperatuurideni kuni 300 °C. Korrosioonikindluse parandamiseks on kinnitusdetailid enamasti kaetud pinnetega (kadmeeritud, tsingitud, kroomitud).

Suure tugevuse nõude korral on sobivad termotöödeldud keskmise süsinikusisaldusega madallegeerterased. Samas tuleb silmas pidada, et tugevuse kasvades suureneb tunduvalt materjalide tundlikkus pingekontsentraatorite suhtes. Keermestatud kinnitusdetailide puhul on selleks keere. Tugevate keermesdetailide tootmiseks kasu-

tatakse sageli madallegeritud (näiteks ca 1 % Cr; 0,3...0,5 % Mo) kesksüsinikteraseid (0,35...0,45 % C).

Korrosioonikindlaid kinnitus detaile toodetakse vasesulamitest (messingid, pronksid) või korrosioonikindlatest terastest. Odavamad ja piisavalt tugevad vasesulamid on suure Zn-sisaldusega messingid. Eelistatakse suure (kuni 38 %) Zn-sisaldusega messingeid, millest on kerge külmsurvetötluse teel kinnitus detaile toota. Suurima Zn-sisaldusega (> 40 %) kahefaasilised α - β messingid on märksa väiksema plastsusega, kuid sobivad hästi kinnitus detailide tootmiseks lõiketötlust kasutades.

Vasesulamitest kinnitus detailid ei sobi elektrokeemilise korrosiooni tõttu kasutamiseks alumiiniumisulamitest konstruktsioonides. Sellistel juhtumitel kasutatakse suure tugevusega alumiiniumsulamidest kinnitus detaile. Kõrgetel temperatuuridel töötavaid polte (näiteks elektri- ja soojusjaamade seadmetes) toodetakse roomekindlatest metallisulamitest. Näiteks madallegeritud kesksünikteras 40CrMo4 on kasutatav kuni töötemperatuurideni 450 °C. Kõrgematel temperatuuridel (kuni 550...560 °C) kasutatakse kesk- ja kõrgleegerteraseid. Temperatuuridel üle 600 °C kasutatakse niklisulameid.

Neetimine (riveting). Enne keevitustehnoloogia laiemat kasutuselevõttu kasutati laialdaselt kuumneetimist. Kuumneetimisel tekkis needi jahtumisel täiendav, liidet kokkusuruv jõud. Needimaterjali struktuur ja omadused olenesid suurel määral needi materjalist ja jahtumiskiirusest, millega ühendatavad detailid neeti alla jahutasid. Praegu saadakse enamik neetliiteid külmeetimist kasutades. Sellise tehnoloogiaga ei saavutata küll neetide jahtumisega kaasnevat täiendavat kokkusurumisjõudu, kuid külmeformeerimisega kaasneva kalestumise tõttu on sellised needid ja neetliited tugevamad.

Alumiiniumisulamitest needid toodetakse vanandatavatest sulamidest. Enne neetimist on sellised needid plastses karastatud olekus, mis tagab neetamise tõhusa tootlikkuse. Needid saavutavad lõpliku tugevuse edasisel loomulikul vanandamisel.

Keevitamine (vt II osa , 11. ptk)

Mittelahtivõetavad keevisliited saadakse eelkõige termilise (sulakeevitus) energia abil. Laiemat kasutamist on leidnud kaar- ja kontaktkeevitamine. Kevitamise eesmärgiks on saada liide, mille tugevus, plastsus ja sitkus on võrdväärsed liidetavate detailide omaga.

Halva keevitatavuse põhjustab keevitusdefektide moodustumine. Kevitatavus ei olene mitte ainult keevitatavast materjalist, vaid ka kasutatud keevitustehnoloogiast. Seetõttu rahuldava keevisliite saamiseks on vaja teada seoseid keevitatava materjali ja kasutatava keevitustehnoloogia vahel. Kevitusprotsessi mõjurite hulka kuuluvad energiaallika (elektri- või plasmakaar, elektronkiir, gaasileek jne) loomus, keevitusenergia, keevituskeskkond, automatiseerituse aste. Materjalimõjuriteks on eelkõige

keevititava materjali keemiline koostis ja olek enne keevitamist, füüsilised omadused, liidetavate detailide ristlõikepind ja mõõtmed.

Teraste keevitamisel kõige levinum keevitusdefekt sulakeevitamisel on keevisõmbluse ja termomõju tsooni (piirkonna, kus toimuvad põhimetalli struktuurimuutused) vesinikhaprus, mis põhjustab nn külmpagasid.

Materjaliga soetud mõjuritest, mis avaldavad mõju teraste keevitatavusele, on olulisimaks terase süsinikusisaldus. Hästi keevitatavateks loetakse süsinik- ja madallegeerteraseid süsinikusisaldusega alla 0,2 %. Suurema süsinikusisaldusega terastest keevisõmblustes ja termomõju tsoonis tekib jahtumisel suhteliselt habras martensiit- ja beiniitstruktuur.

Süsinik ei ole ainus keevitatavust (külmpragudekindlust) mõjutav element. Analooget, kuigi nõrgemat mõju avaldavad legerivad elemendid. Süsiniku ja legerivate elementide koosmõju keevitatavusele hinnatakse nn **süsinikekvivalendiga** (*carbon equivalent, CE*):

$$CE\% = C\% + \frac{Mn\%}{6} + \frac{Cr\% + Mo\% + V\%}{5} + \frac{Ni\% + Cu\%}{15} \quad (7.5)$$

Keevitatavus ei ole küll üheselt hinnatav vaid keemilise koostisega, kuid kui toodud empiirilisest seosest selgub, et $CE \geq 0,40\%$, siis tuleb keevitusprotsessis rakendada erimeetmeid: detailide ettekuumutus, madallõõmutus sisepeingete kõrvaldamiseks jms.

Roostevabad austeniitsed madala süsinikusisaldusega ($< 0,12\%$ C) kroomnikkelterased on üldjuhul hästi keevitatavad. Vaatamata mõningale karastumisele (martensiidi tekkele) õhu käes jahtumisel pärast keevitamist, loetakse hästi keevitatavateks väikese süsinikusisaldusega roostevabad kroomterased (13 ja 17 % Cr).

Alumiiniumsulamite keevitamisel esineb nelja liiki probleeme: oksüdeerumine, keevisõmbluse poorsus, keevisõmbluse pehmenemine (tugevuse vähenemine) ja tardumispragude (kuumpragude) tekkimine. Kaks esimesena nimetatud probleemi on kõrvaldatavad keevitamisega kaitsegaasides sulamatu W-elektroodiga või sulava metallektroodiga. Keevisõmbluse ja termomõju tsooni pehmenemine on probleemiks termiliselt mittetöödeldavate, kalestamise teel tugevdatud alumiiniumsulamite, samuti termotöödeldud (vanandatud) sulamite keevitamisel. Enamasti on siiski lihtsam projekteerida sellised keevisõmblused keeviskonstruktsioonide vähekoormatud piirkondadesse. Teisel juhul (termotöödeldud sulamid) on keevitatud toodete väikeste mõõtmete korral võimalik teha keevitusjärgset termotöötlust (karastamine + kunstlik vanandamine). Suurte keeviskonstruktsioonide puhul ei ole see teostatav. Sellisel juhul on parem kasutada loomulikult vananevaid alumiiniumsulameid.

Vasesulamid on üldjuhul rahuldavalt keevitatavad. Probleemiks on puhta vase suur soojusjuhtivus, mistõttu sellist metalli keevitatakse ettekuumutatult. Probleeme tekib samuti Zn lenduvuse tõttu messingite keevitamisel. See on enamasti lahendatav

pronksist keevitusmaterjalide kasutamisega. Pronkside, sh. nikkelpronkside keevitamisega võib kaasnedä õmbluse haprus ja oksüdeerumine. Probleem on lahendatav keevitusprotsessi parameetritest täpse kinnipidamise ja spetsiaalse koostisega keevitustraadi kasutamisega.

Titaanisulamid (ühefaasilised α -sulamid) ja puhas titaan on rahuldavalt keevitatavad juhul, kui keevitada kaitsegaasides (tavaliselt argoonis). Kahefaasiliste α - β -sulamite keevitamisega kaasneb keevisõmbluse haprus. Lennukiehituses on siiski viimasel ajal edukaks osutunud suure tugevusega kahefaasiliste titaanisulamite keevitamine.

Jootmine

Erinevalt sulakeevitamisest ei sula jootmisel liidetavad metallid. Eristatakse pehmejoodisjootmist – joodise sulamistemperatuur $< 450\text{ }^{\circ}\text{C}$, tavaliselt $< 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja kõvajoodisjootmist – joodise sulamistemperatuur $> 450\text{ }^{\circ}\text{C}$, tavaliselt $> 850\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pehmejoodisjootmisel on joodisliide väikese tugevusega – tavaliselt kuni $50\dots60\text{ N/mm}^2$, kõvajoodisjootmisel märksa suurema tugevusega – $300\dots700\text{ N/mm}^2$.

Liimimine

Liimimist saab põhimõtteliselt kasutada igat liiki materjalide puhul (metallid, plastid, keraamilised materjalid jne). Suurimad raskused tekivad mõnede termoplastide liimimisel.

Liimidele esitatakse järgmised nõuded:

- 1) liimitava pinna hea märgamine;
- 2) mõningane deformeerumisevõime kõvenemisprotsessis selleks, et vältida elastseid pingeid detailides ja väheneks pingete kontsentratsioon;
- 3) kõvenemine maksimaalse, antud liimile omase tugevuseni.

Liidetavate materjalide hea märgamine liimiga tagab mitte ainult liimi ja liidetava materjali vahelise tugeva sideme, vaid samuti minimaalse pingete kontsentratsiooni liitega külgnevates alades.

Liimimise üks eelis teiste liitmismeetoditega võrreldes on see, et liimimine ei mõjuta liidetavaid materjale ei mehaaniliselt (polt- ja neetühenduste põhipuudus) ega metallurgiliselt (keevitamisel ja jootmisel). Liimimisel puuduvad pingekontsentratsioonid, mis on tingitud avadest polt- ja neetliidetest või termomõju tsoonist keevitamisel.

7.5. MATERJALIDE ASENDAMINE

Olemasoleva konstruktsiooni või valmistustehnoloogia korral võib materjalide asendamine – uute materjalide kasutuselevõtt – olla tingitud kas uue tehnoloogia kasutuselevõttust või turu survest. Üsna sagedasti toob asendus kaasa parema kvaliteedi, madalama maksumuse, kergema töödeldavuse, lihtsama koostamise või paremad talitlusomadused. Väiksem kaal, tõhusam kütusekasutus ja väiksem tootmisemissioon on väga oluline näiteks seoses autodega. Suurema tugevusega lehtteraste kasutus annab võimaluse toota traditsioonilisi keredetaile õhemast plekist. Kõrgtugevate teraste kasutus toob omakorda kaasa uusi probleeme nende vormimisel, aga õhemast materjalist tuleneva detailide jäikuse ja korrosioonikindluse vähenemise.

Alumiiniumi tihedus on 1/3 terase omast, sama on ka jäikusega – 1/3 terase omast. Alumiiniumpleki kasutamine teraspleki asemel tagab küll kaalu 50 % vähenemise, kuid arvestama peab madalamast elastsusmoodulist tingitud vibratsiooni jt probleemidega

Alumiiniumisulamid on üks auto mootoriplokkide ja muude korpusdetailide alternatiive. Tagatud on korrosioonikindlus ja märgatav kaalu vähenemine. Kui eeldame, et mehaanilised omadused on võrdsed, tuleb silmas pidada müra ja vibratsiooniga seotud küsimusi. Hallmalmil on head vibratsioonisummutavad omadused, alumiiniumis aga levib müra ja vibratsioon, mistõttu tuleb kasutada näiteks transmissioonis korpuse korral müra isoleerivaid materjale.

Plaste on laialt kasutatavad autokere detailide, kaitseraudade, kütusepaakide, pumpade ja jm korpusdetailide korral. Plastkomposiidid on asendanud metalli roolirataste korral, valusulamid, pulbermaterjalid ja komposiitmaterjalid on kasutusel kepsude korral, keraamika ja plastkomposiidid mootoridetailidena, laialt on levinud magneesium rattavelje materjalina.

Tabelis 7.6 on kokkuvõtlikult näidatud mõningad materjalide asendamisega seotud lahendused autode korral, kusjuures tuleb silmas pidada, et paljudel juhtudel kaasneb sellega kallim hind (kallim materjal ja suuremad tootmiskulud).

Tabel 7.6. Materjali asendamisest tingitud kaalu vähenemine auto korral

Uus materjal	Senikasutatud materjal	Kaalu vähenemine %	Uus suhteline hind %
Kõrgtugev teras	Tavateras	10	100 (jäab samaks)
Alumiiniumisulam	Teras või malm	40...60	130...200
Magneesiumisulam	Teras või malm	60...75	150...250
Magneesiumisulam	Alumiinium	25...35	100...150
Klaasplast	Teras	25...35	100...150

7.6. MATERJALI FORMALISEERITUD VALIK

Materjali valikul tuleks vastata järgmistele küsimustele:

1. Millised on detaili/toote töötingimused (töötemperatuuri vahemik, keskkond jne)?
2. Millised olulised materjali omadused tagavad töökindluse?
3. Milliseid valikukriteeriumeid kasutada (optimeerimise eesmärk)?
4. Milliseid materjale võiks kaaluda, miks?
5. Milline võiks olla toote valmistusviis (üldiselt)?
6. Kas ja milline peaks olema tugevdav termotöötlus?
7. Kas detail/toode eeldab mõnda pinnatöötlust, mis eesmärgil?
8. Millised võiks olla keskkonda puudutavad asjaolud (mõju keskkonnale, taaskasutus)?

Materjali valiku lihtsustamiseks on loodud nn **hindamistabel** (Tabel 7.7) (*rating chart*), mille alusel võrreldakse kuni viit materjali. Leitakse arvesseminevate materjalide omaduste absoluutväärtused või kriteeriumid ja nendest tulenevad hinnangud, võrreldakse suhtelisi omadusi ja materjalikandidaadid järjestatakse skaalal 1...5, pidades silmas selle omaduste saavutatavust.

Tabelis on esitatud materjalidele võtmenõuded (näiteks keevitatavus või optiline läbipaistvus), mis peavad olema tagatud ning võimalikud omaduste võrdlusväärtused – materjalihinnangud.

Materjalid järjestatakse valitud omaduste alusel (omadushinnang), korrutades selle vastava omaduse kaalufaktoriga (1...3), saadakse materjali suhtelised hinnangunumbrid (HN), mis summeeritakse. Lõpuks jagatakse suhteliste hinnangunumbrite summa hindamisfaktorite (HF) arvuga, saades materjali hinnangu.

Seejärel võrreldakse võimalikke materjale ühtlaselt ja erapooletult ning leitakse parim materjal. Lisaks, tuues eraldi välja kõik nõutud omadused, saadakse ülevaade vähemolulistest nõuetest. Lõppmaterjalid hinnatakse üle, tagamaks, et võtmenõudeid pole jäetud arvestamata või ülemääraselt mindud kompromissile.

Analoogselt võib toimida ka detaili/toote valmistustehnoloogia valikul, mille alusel võrreldakse erinevaid võimalikke valmistusviise valituks osutunud materjali(de) korral.

Tabel 7.7 Materjalide hindamistabel konkreetsel kasutusel

Materjal/ valmistusviis	Võtmenõude hinnang ¹⁾			Suhteline hinnangunumber (SHN) (omadushinnang ²⁾ x kaalufaktor ³⁾						Materjali hinnang
	Korrosioon	Keevitatavus	Optiliselt läbipaistev	Tugevus	Sitkus	Jäikus /elastusmoodul	Kõvadus/kulumiskindlus	Väsimus	Hind	Hinnangunumbrite (HN) summa jagatud hindamisfaktorige (HF) arvuga

¹⁾ Jah – rahuldav, Ei – mitterahuldav.

²⁾ Omadushinnang (1...5) = 1 – kehv, 2 – rahuldav, 3 – hea, 4 – väga hea, 5 – suurepärane.

³⁾ Kaalufaktor (1...3) = 1 – väheoluline, 2 – oluline, 3 – väga oluline.

Näide

Olgu meil kättesaadavad kolm materjali (X, Y ja Z). Valitud materjal peab olema hästi keevitatav (võtmenõue), omadushinnanguteks on valitud tõmbetugevus (kaalufaktor – väga oluline), jäikus (väheoluline), sitkus (oluline), väsimustugevus (väga oluline) kui ka hind (väheoluline). Kolm materjali järjestuvad järgnevalt:

	X	Y	Z
Keevitatavus	Suurepärane (Jah)	Kehv (Ei)	Hea (Jah)
Tõmbetugevus	Hea (3)	Suurepärane (5)	Rahuldav (2)
Jäikus	Hea (3)	Hea (3)	Hea (3)
Sitkus	Hea (3)	Suurepärane (5)	Hea (3)
Väsimustugevus	Rahuldav (2)	Hea (3)	Suurepärane (5)
Hind	Hea (3)	Hea (3)	Rahuldav (2)

Sulgudes omadushinnangud tulenevalt vastavate omaduste arvväärtustest.

Koostatakse hindamistabel (vt Tabel 7.7), otsustamaks, millist materjali soovitada.

Materjal	Võtme- nõude hinnang	Suhteline hinnangunumber (SHN) (omadushinnang x kaalufaktor)					Materjali hinnang
		Tõmbetugevus (3)	Sitkus (2)	Jäikus (1)	Väsimus (3)	Hind (1)	
	Keevitatavus						Suhteliste hinnangunumbrite (SHN) summa jagatud hindamisfaktorite (HF) arvuga
X	Jah	3x3	3x2	3x1	2x3	2x1	49/5 ≈ 9,8
Y	Ei	5x3	5x2	3x1	3x3	2x1	67/5 ≈ 13,4
Z	Jah	2x3	3x2	3x1	5x3	2x1	57/5 ≈ 11,4

Valituks osutub materjal „Z“, kuigi materjalil „Y“ on kõrgem hinnang, ei ole täidetud võtmenõue, s.t pole keevitatav.

7.7. KORDAMISKÜSIMUSED

1. Millised on nõuete 3 põhigruppi detailile/tootele?
2. Millised on põhilised tootearenduse (konstrueerimise) etapid?
3. Mis on konstruktsioonitugevus?
4. Millised materjali tugevusnäitajad on aluseks plastsete ja habraste materjalide valikul?
5. Mis on materjali/toote töökindluse näitajaiks?
6. Loetlege materjali/toote tööea näitajad.
7. Milline on seos väsimustegevuse ja tugevusomaduste vahel? Väsimuse mõjurid?
8. Milline on esimene samm mistahes materjali valikul?
9. Kuidas liigitatakse metallsed materjalid voolepiiri järgi?
10. Mis on eritugevus? Milline materjaligrupp on suurima eritugevusega?
11. Mis on prototüüp? Milleks on vaja valmistada prototüüpi?
12. Millised on materjalide tehnoloogilised omadused? Nende näitajad?
13. Kirjeldage seoseid tehnomaterjalide ja nende töötlemismeetodite vahel saamaks etteantud kuju ja omadusi?
14. Millised on põhilised survevõllid?
15. Loetlege vormstantsitavaid materjale?
16. Millistest materjaligruppidest valmistatakse pulbermetallurgia meetodil detaile?
17. Kirjeldage, kuidas detaili mass ja mõõtmed mõjutavad materjali ja tehnoloogia valikut?
18. Milliseid kinnitus- ja liitmismeetodeid kasutatakse?
19. Millised eelised ja puudused on teraste asendamisel alumiiniumisulamitega?
20. Mis tingib magneesiumisulamite kasutuselevõttu autodes? Tooge näiteid.

Soovitav kirjandus

1. DeCarmo's *Materials and Processes in Manufacturing*, International Student Version, Eleventh Edition, 2013, John Wiley ja Sons, Inc., 512 p.
2. Mikell P. Groover. *Principles of Modern Manufacturing*, Fourth Edition, 2011, John Wiley ja Sons Inc., 1002 p.
3. P. Kulu, *Metalliõpetus*, 2005, TTÜ kirjastus, 290 lk.
4. J. Kübarsepp, P. Kulu, *Materjalitehnika seletav sõnaraamat (eesti-inglise-vene)*, 2013, TTÜ kirjastus, 438 lk. + inglise-eesti ja vene-eesti registrid.
5. *Mehaanikainseneri käsiraamat* (üldtoimetaja P. Kulu), 2012, TTÜ kirjastus, 492 lk.
6. P. Christjanson, *Polümeeriteadus*, 2008, TTÜ kirjastus, 279 lk.

Aineregister

A

Aatommass	40
Aatomsidemed	41
Abrasiivid	280
Adsorptsioon	117
Aglomerimine	132
Akrüülpolümeerid	240
Al-Cu-sulam	204, 208
Al-Mg-sulam	203, 208
Al-Mn-sulam	203
Al-Si-sulam	207
Al-Zn-sulam	205
Alpaka	198
Alumiinimine	121
Alumiinium	200
Alumiiniumi laagrisulam	209
Alumiiniumimetallurgia	187
Alumiiniumisulamid	200
deformeeritavad	202
valatavad	202, 207
Alumiiniumoksiid	145, 187, 273
Alumiiniumpronks	197
Aminoavaigud	245
Anisotropia	321
Antifriktsioonisulam	220
Antistaatik	250
Armkoraud	150
Austeniidi isothermilise lagunemise diagramm	98
Austeniidi pidevjahtumise diagramm	100
Austeniit	79
Austeniitmuutus	85
Austenitisatsioon	85

B

Babiit	220
Beiniit	82, 99
Bessemermenetlus	136
Biokeraamika	277
Boksiit	187
Boorkarbiid	274
Boriidid	58

C

C-köverad	98
Charpy löökpaandeteim	28

D

Deformatsioon	51
Deformatsiooniaste	94
Dendriitlikvatsioon	149
Desoksüdeerimine	138
Dispersioonkövenemine	97
Dislokatsioonid	50
Dissotsiatsioon	117
Difusioon	117
Difusioon-desoksüdeerimine	138
Dolomiit	189
Duralumiinium	204

E

Elastsus	18
Elastomeerid	258, 264
Elastsusmoodul	9
Elektrikaarahi	142
Elektrijuhtivus	12
Elektrolüüser	189
Elektrometallurgia	130, 141
Elektronkate	41
Elektronkiirümbesulatus	144
Elektrongaas	43
Epoksüvaigud	245
Eritakistus	12
Eutektikum	59, 67
Eutektmuutus	67, 80
Eutektoid	59, 70, 82
Eutektoidmuutus	70, 82, 155

F

Faasidiagramm	62
Fe-C	75, 87
Fe-Fe ₃ C	80, 83
kahekomponentne	65
kolmekomponentne	74
Fenoolvaigud	246
Ferriit	78
Ferrosulam	135
Flotatsioon	185
Fluoroplastid	240
Fosfor	152, 181
Fraktsioondestilleerimine	191
Fraktsioonimine	132
Fulleriinid	77

G		hele ~	106
Gaasipoorsus	147	induktsioon ~	116
Gaasitühik	147	isoterm ~	110
Grafeen	77	katkend ~	109
Grafiit	77, 174	laser ~	117
Gravitatsioonrikastamine	132	leek ~	116
		otse ~	119
H		pind ~	115
Hapnikkonvertermenetlus	136, 139	pool ~	105
Haprus	18, 152, 309	tava ~	104
Hastelloi	218	titaanisulamite	214
Heksagonaalvõre	47	täis ~	104
Hematiit	131	vann ~	109
Hindamistabel	327	Karastustemperatuur	104
Hõbe	222	Karastuspinged	108
Hõõrdetegur	32	Karastusviisid	108
Hüdrometallurgia	129	Karastuvus	112
Hülsimessing	194	Karbamiidformaldehüüd	245
		Karbiidid	58
I		Karbotermia	190
Ilmeniit	190	Karnalliit	189
Induktsioonahi	143	Katkeahenemine	20
Inkonell	218	Katkevenivus	19
Intermetalliid	59	Kaudtaandamine	134
loonside	41	Kaudtoimekaarahi	142
Isomeer	229	Kauper	135
Isomorfism	48	Keemiline ühend	58
		Keevitatavus	37
J		Keraamika	
Jahtumiskõver	49, 64	bio ~	277
Jomini läbikarastuvuse teim	113	ehitus ~	269
Joonpaisumistegur	11	elektro ~	281
Jäikus	311	klaas ~	269
Jääkausteniit	101	konstruktsiooni ~	272, 276
		kuumuskindel	276
K		lõike ~	278
Kaevusahi	133	savi ~	270
Kahanemispoorsus	147	tarbe ~	269
Kahanemistühik	146	tehno ~	264, 272
Kalestumine	53, 97, 321	tööriista ~	278
Kaltsineerimine	188	ülitermostabiilne	277
Kaltsineeriv särdamine	188	Kermis	219, 267, 279, 284
Karastatud klaas	267	Kiirlõiketerased	172
Karastus		Klaas	269
alumiiniumisulamite	124, 204	Klaasistustemperatuur	222
aste ~	109	Koks	131
beiniit ~	110	Kompaund	288, 291
elektrolüüt ~	117	Komposiidid	237, 282
elektronkiir ~	117	keraamikamaatriks ~	294

kihtarmeeitud	288	Kuupvõre	
kiudarmeeitud	285	ruumkeskendatud	53
metallmaatriks ~	292	tahkkeskendatud	53
polümeermaatriks ~	290	Kõrgahi	130
pulberarmeeitud	283	Kõrgahjugaas	135
süsinikmaatriks ~	295	Kõvadus	18
Konstantaan	198	Brinelli	25
Konstruksiooniterased		Rockwelli	26
süsinik ~	154	Vickersi	27
leeger ~	158	Kõvaduskatse	24
teras ~	161	Kõvasulam	130, 279
Kopametallurgia	145	Känkimine	132
Kopolümeer	230	Käsnaud	149
Korrosioon	12	Käsntitaan	191
elektrokeemiline	13	Külmaga töötlus	122
gaas ~	14	Külmahaprus	29, 152, 309
keemiline	13		
metallide	12	L	
plastide	17	Ledeburiit	80
Korrosioonikaitse	14, 16	Leegiaeglustid	249
Kovalentside	42	Legeeriv element	75, 154, 181
Kristallisatsioon	48, 80	Liimid	252
Kristall		Likvatsioon	149
dendriit ~	49	Likvidusjoon	66
niit ~	287	Lõiketöödeldavus	37
samm ~	49	Lõõmutus	
võrdtelg ~	49	homogeniseeriv	91, 97, 123
Kristalliinsus	233	isoterm ~	99
Kristallivõre defektid	51	madal ~	93
Kristallivõre		pehme ~	93
heksagonaal ~	47, 53	pingetus ~	93
kuup ~	47, 53	pool ~	92
primitiivne	45	rekristalliseeriv	56, 94, 123
põhitahkkeskendatud	45	sferoidiseeriv	93
ruumkeskendatud	45	täis ~	92
tahkkeskendatud	45	Läbikarastuvus	112, 114
tetragonaal ~	46, 219	Läbipuhumine	139
Kroomimine	121	Löökpaindeteim	
Krüoliit	188	Charpy	28
Kuld	222	Izod	29
Kulumine	32		
adhesioon ~	35	M	
mehaaniline	34	Maak	130
Kuumahaprus	152	Maagikontsentraat	132
Kummi		Magnaalium	203
naturaalne	259	Magneesium	210
polükloropreen ~	261	Magneesiumimetallurgia	189
silikoon ~	262	Magneesiumisulamid	210
stüreen-butadieen ~	261	Magnesiit	189

Magnetiit	131	Mitterauasulamid	122, 183
Magnetrikastamine	132	Mitteraudmetallid	183
Magnetsärdamine	132	Molekulaarside	43
Makrolikvatsioon	149	Monelmetall	217
Makropinged	93	Monomeer	228
Makrostruktuur	40	Muntsmetall	195
Malm		Mündihõbe	222
alaeutekt ~	86	Mündimelhior	198
eutekt ~	86		
ferriit ~	177	N	
ferriitperliit ~	177	Naatriumhüdrosüüd	187
grafiit ~	174	Naturaalkummi	259
hall ~	174, 180	Nikkel	216
kang ~	135	Niklisulamid	216
keragrafiit ~	174	Nikroom	217
kompaktgrafiit ~	177	Nimonik	217
liblegrafiit ~	174	Niresist	182
perliit ~	177	Nitriitimine	119, 214
temper ~	175	Nitriidid	58, 164
toor ~	130, 135	Nitrotsementiitimine	120
valge ~	174	Noolutus	
valu ~	130, 135	madal ~	110
üleeutekt ~	86	kesk ~	110
Malmisulatus	133	kõrg ~	111
Mangaan	151, 181	Noolutusmartensiit	110
Mangaanimaak	131	Normalisatsioon	95
Margitähistus		O	
alumiiniumisulamite	209	Oksiidid	59
malmide	182	Osistamine	132
teraste	159	Otsetaandamine	134, 150
vasesulamite	199	Otsetoimekaarahi	142
Martensiit	101, 181	Otskarastustest	113
Martensiidiagramm	102		
Martensiitmuutus	101	P	
Martäänmenetlus	136	Parendamine	111, 159
Mehaaniline segu	59	Peenestamine	132
Melamiin	245	Perliit	
Messing		lible ~	82, 99
hea lõiketöödeldavusega	194	tera ~	93
hülsi ~	194	Perliitmuutus	85
kahefaasiline ($\alpha+\beta$)	195	Pidevvalu	146
ühefaasiline (α)	194	Pindamine	16
Metalliside	43	Pinded	16, 253, 280
Metallotermia	191	Pindtugevdus	115
Metallurgiline destilleerimine	191	Pingekontsentraator	21
Mikrolikvatsioon	149	Pinnadefekt	51
Mikropinged	39	Plaatina	222
Mikrostruktuur	39	Plasmakaarümbersulatus	145
Mitterauametallurgia	184		

Plastid	227	Rauasüsinikusulamid	75
bio ~	257	Raud	75, 128
biolagunevad	257	Reaktoplastid	235, 245
konstruktsiooni ~	251	Redutseerija	131
kõrgsuutlikud	251, 292	Relvametall	197
reakto ~	235, 245	Rekristallisatsioon	53, 55
tarbe ~	251	Rekristallisatsioonitemperatuur	55
termo ~	232	Ringlus	255
Plastifikaatorid	248	Roome	259, 314
Plastsus	18	Rutiil	190
Poissoni tegur	10	Ruumdefekt	51
Polüamiidid	241	Räbu	131, 135
Polümiidid	247	Räbusti	131
Polüestrid	241	Räbuümbersulatus	145
Polüestervaigud	246	Räni	151, 180
Polüetüleenid	242	Ränikarbiid	273
Polükarbonaadid	241	Räninitriid	273
Polükondensatsioon	230		
Polümeerliim	252	S	
Polümeervärv	253	Sadestuskõvenemine	97, 122
Polümerisatsioon	229	Segregatsioon	149
Polümerisatsiooniaste	230	Sialoon	274
Polümorfism	47, 154	Sifoonvalu	146
Polüpropüleen	243	Silikonvaigud	247
Polüstüreen	243	Silikotermia	190
Polüüretaan	243, 261	Silumiin	207
Polüüretaanvaigud	247	Sitkus	18, 309
Polüvinüülkloriid	244	Sferoidiit	93
Pronksid	194, 197	Sferoidisatsioon	95
Pruun rauamaak	131	Solidusjoon	66
Plii	219	Solvusjoon	67
Pliisulamid	220	Soojusjuhtivus	11
Pulbermaterjal	131	Soojuspaisumine	10
Pulbermetallurgia	130, 322	Soorauamaak	131
Purunemine	55	Stabilisaatorid	249
Purunemissitkus	23, 268	Stõhhiomeetriline koostis	42
Pürometallurgia	129	Sulam	52, 126
		Sulamistemperatuur	11
R		Supersulamid	217, 315
Rafineerimata metall	185	Surveteim	23
Rafineerimine	144	Survetõdeldavus	37
Raskmetallid	9	Sändvitšmaterjal	290
Rasksulavad metallid	217, 315	Särdamine	131, 186
Raua otsetaandamine	134	Särdis	186
Raua rikastamine süsinikuga	134	Süsinik	77, 150
Rauamaak	130	Süsinikekvivalent	324
Rauametallurgia	129	Süsiniknanotorud	77
Rauamurd	136	Süsinikrikastus	118
Rauasulamid	128		

Š		tsemendiiditav	159, 163
Šahtahi	133	tööriista ~	154, 158, 168
Šifoonvalu	146	valu ~	154
		üleutekoid ~	83
T		Terasmurd	136
Taandaja	131	Termokeemiline töötlus	117
Taandamine	131, 190	Termomehaaniline töötlus	121
Tardlahus	56	Termopinged	93, 108
asendus ~	57	Termoplastid	232
sisendus ~	57	Termotöödeldavus	37
korrastus ~	57	Termotöötlus	89
vakants ~	58	alumiiniumisulamite	123
Tardlahustugevnemine	97	malmi	180
Tardlahustöötlus	123, 204	protsessi ~	90, 96
Tardumiskahanemine	146	tugevdav	97
Terase desoksüdeerimine	138	titaanisulamite	214
Terase keemine	138	terase	90, 98
Teras	150	Terpolümeer	230
alaeutektoid ~	83	Tihedus	8
eri ~	158	Tina	219
eutektoid ~	83	Tinasulamid	220
Hadfieldi	167	Titaan	213, 315
hea löiketöödeldavusega	154	Titaanimetallurgia	190
keev ~	139, 148	Titaanisulamid	213
kesklegeer ~	158	Tombak	194
kesksüsinik ~	154	Toomasmenetlus	136
kiirlõike ~	172	Toorvask	186
konstruktsiooni ~	154, 158, 161	Tselluloos	240
korrosioonikindel	165	Tsementiit	79
kulumiskindel	167	Tsementiitimine	118
kuumstantsi ~	170	Tsink	212
kõrgsüsinik ~	154	Tsingisulamid	212
kõrgtugev	165	Tsirkooniumoksiid	274
kõrglegeer ~	158	Tsüaanimine	120
külmstantsi ~	170	Tugevus	18
legeer ~	136, 154, 157	eri ~	22, 308
madalsüsinik ~	154	konstruktsiooni ~	22, 305
madallegeer ~	158, 169	surve ~	23, 305
martensiitvanandatav	165	tõmbe ~	19, 28
mittelegeer ~	136, 150, 153, 169	Tulekindel materjal	139
mööteriista ~	170	Tunnusnumbrite süsteem	
nitriiditav	159, 164	alumiiniumisulamite	210
nitrotsementiiditav	159	malmide	183
parendatav	159, 163	teraste	161
poolrahulik	139, 148	vasesulamite	199
rahulik	139, 147	Tõmbeteim	18, 20
stantsi ~	170	Tööriistaterased	
survemahutite	162	kiirlõiketerased	172
süsinik ~	136	legeer ~	158, 168

madalleger ~	169
mitteleger ~	169
mittesoojuskindlad	170
poolsoojuskindlad	170
soojuskindlad	171
süsinik ~	154
Tükistamine	132

U

Uushõbe	198
---------	-----

V

Vaakumkaarümbersulatus	144
Vaakumtöötlus	144
Vahud	253
Vakants	50
Valatavus	37
Valgevask	194
Valukopp	145
Valuplokivalu	145
Valuplokivorm	145
Valuplokk	145
Vanaadimine	121
Vanandamine	123, 204, 214
Vananduskövendamine	123
Vananemine	123
Vasekivi	186
Vasemetallurgia	185
Vaseniklisulam	198
Vasesulam	192
Vask	185, 192
Vaskläik	185
Vaskrähk	185
Veerkänk	132
Vesinikhaprus	152
Vinüülid	244
Voolepiir	19, 24
Vulkaniseerimine	260
Värvlisandid	249
Väsimus	30
Väsimuspiir	30, 913
Väsimusteim	31
Väärismetall	221
Väävel	152, 181

Ü

Ülaltvalu	146
Ümbersulatus	144
Ülevanandamine	205, 123