

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Materjalitehnika instituut

MATERJALIÕPETUSE
PRAKTIKUMIDE JA KODUTÖÖDE
JUHENDID

Koostajad: Priit Kulu
Mart Saarna
Riho Tarbe
Jaan Kers
Renno Veinthal

TTÜ
KIRJASTUS
2010

Kaane kujundanud Ann Gornischeff

Autoriõigus: Priit Kulu, Mart Saarna, Riho Tarbe, Jaan Kers,
Renno Veinthal, 2010

ISBN 978-9949-23-019-8

SISUKORD

Eessõna.....	5
Töö nr 1. Materjalide mehaanilised omadused. Tugevus, plastsus ja löögisiskus	7
Töö nr 2. Materjalide mehaanilised omadused. Kõvadus.....	24
Töö nr 3. Metallide ja sulamite mikrostruktuur.....	35
Töö nr 4. Teraste ja malmide mikrostruktuur tasakaaluolekus.....	46
Töö nr 5. Terasestermotöötlus.....	64
Töö nr 6. Mitterauasulamite mikrostruktuur ja omadused	76
Töö nr 7. Duralumiiniumi termotöötlus	88
Töö nr 8. Plastide identifitseerimine ja kõvadus	97
Töö nr 9. Tehnokeraamika tehnoloogia ja omadused.....	111
Kodutöö nr 1. Terased ja malmid	128
Kodutöö nr 2. Polümeerkomposiidid.....	134

EESSÕNA

Bakalaureuseõppe mehaanikateaduskonna tootearenduse ja tootmistehnika, soojusenergeetika, mehhatroonika õppekavade ning energeetikateaduskonna elektriainete ja jõuelektronika õppekava kohustuslikeks õppeaineteks on materjalidega seotud kursused (Tehnoloogiamaterjalid; Materjalitehnika) koos praktikumide ja kodutöödega materjaliõpetuses (metallide omadused ja katsetamine, metallograafia, termotöötlus). Õppetööd on võimalik läbida nii tavaõppes kui ka e-toega õppes.

Praktikumide juhend sisaldab 9 materjaliõpetuse praktikumi (tavaõpe + e-õpe) ja 2 kodutööd.

Kuna praktikumidele ei eelne alati vastavat loenguosa, tuuakse juhendite lisaks töö eesmärgile selgitav osa, mis kirjeldab lühidalt antud tööga vahetult seotud teoreetilist materjali. Samuti näidatakse, mida peab töö aruanne sisaldama. Iga töö juhend lõpeb kontrollküsimustega, mis on vaja läbi töötada materjali omandamiseks.

Üliõpilane peab praktikumideks valmistuma kodus vastava juhendi järgi. Kui midagi jääb siiski ebaselgeks, tuleb kasutada õpikut P. Kulu, Metallitehnika, TTÜ Kirjastus, 2005 või õpperaamatut Materjalitehnika, TTÜ Kirjastus, 2003.

Õppejõud määrab igale tudengile järgmiseks korraks läbiviidava valmistatava töö numbriga. Sellest lähtuvalt peab tudeng enne järgmist praktikumi tööks ette valmistama, mille tõenduseks sooritama <https://webct.e-uni.ee> keskkonnas antud praktikumi teooriaga tutvumist tõendava küsimustiku. Tegemist on valikvastustega küsimustega, mille vastamisel ei ole ajalisi piiranguid. Ettevalmistust (küsimustiku täitmist) kontrollib õppejõud vahetult enne tunni algust. Samuti tuleb üliõpilasel enne praktikumi töö aruanne juhendis näidatud mahus ette valmistada, märkides ära töö eesmärgi, töö selgitava osa vajalikus mahus, töö metoodika ning katsetulemuste tabelite raamistikud. Aja säästmiseks, aga samuti vastutustunde tõstmiseks tuleb üliõpilasel töö tegemisel võimalikult rohkem materjali vormistada valmiskujul. Graafiline materjal tuleb vormistada korrektselt koha peal või arvutil ning

tuua aruandes kleebitult või eraldi lehena. Igal graafikul olgu pealkiri, telgedel tähised ja ühikud.

Aruanne vormistatagu kirjapaberil formaadis A4 (297 x 210 mm) loetavalt ja korralikult, jättes iga lehe vasakule servale 25 mm, ülejäänud servadele vähemalt 15 mm ruumi. Iga töö aruandel peab olema pealdisega tiitelleht, mis sisaldab töö nimetuse ja numbri, üliõpilase ees- ja perekonnanime, üliõpilaskoodi, rühma numbrit ja töö sooritamise/esitamise kuupäeva.

Aruanne tuleb üldreeglina esitada tunni lõpuks. Iga töö (aruanne) kuulub kaitsmisele. Enne kaitsmist tuleb õppejõu poolt näidatud vead parandada ja vajaduse korral teha vajalikud täiendused. Töö loetakse kaitstuks, kui aruande tiitellehel on vastav märg.

E-õppe praktikumid läbitakse testi vormis koha peal toimivate praktikumide ettevalmistusele analoogselt <https://webct.e-uni.ee> keskkonnas. Ajaline piirang puudub ja praktikumi läbimist võib proovida kolm korda. E-praktikum loetakse arvestatuks, kui on saavutatud 75% maksimumtulemusest.

Kodutöid esitatakse paberkandjal kalenderplaanis fikseeritud tähtajal praktikumi läbiviivale õppejõule ja need kuuluvad hindamisele.

Praktikumide sooritamine ja kodutööde esitamine on eksamieel-duseks, viimased lähevad ka jooksva töö arvestusse.

TÖÖ NR 1

MATERJALIDE MEHAANILISED OMADUSED

Tugevus, plastsus ja löögisitkus

Sissejuhatus

Materjalide mehaanilised omadused iseloomustavad materjalide käitumist koormuse või jõu mõjudes. Olulisemad nendest on tugevus, jäikus, kõvadus, plastsus ning sitkus. Inseneritöös on need materjali valikul ühed olulisimad kriteeriumid. Sageli on nad aga vastuolulised – ei ole võimalik leida materjali, mis oleks ühtemoodi nii kõva kui ka plastne. Seega, reeglina on vaja välja selgitada kindlad kriteeriumid, mille järgi materjale hinnata vastavalt kasutusale. Tundes mehaanilisi omadusi ning nende määramise meetodikaid ja eripärasid, on võimalik leida vastus kahele põhiküsimusele: kas materjal on sobilik toote valmistamiseks ning kas see toode on piisavalt töökindel.

Tõmbe- ja surveteimimisel saadud tugevusnäitajaid kasutatakse põhiliselt konstruktsiooni tugevusarvutusel ja tehnoloogilise hindamisel. Löögisitkust kasutatakse löökkoormusel töötavate detailide löögitaluvuse ja sellega töökindluse hindamisel.

Töö eesmärk

Töö eesmärk on tutvuda põhiliste konstruktsioonimaterjalide mehaaniliste omaduste ja nende määramise meetoditega, sealhulgas tutvuda

1. metallide, plastide, komposiitmaterjalide katsetamisega tõmbele, analüüsida tõmbediagrammi ning määrata selle põhjal tugevus- ja plastsusnäitajad. Võrrelda erinevaid katsetatavaid materjale ning määrata nende võimalik kasutusala;
2. polümeersete omadustega materjalide katsetamisega survele ja võrrelda nende surve- ning tõmbetugevust;
3. metalsete omadustega materjalide katsetamisega löökpaindele, selgitada välja pingekontsentraatori ning katsetustemperatuuri mõju löögitugevusele.

Töö selgitav osa

Tõmbeteim

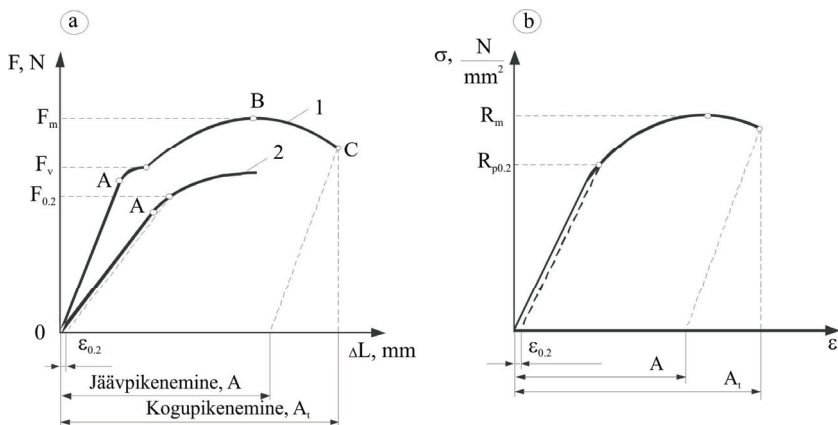
Tõmbeteim on levinuim viis materjalide tugevus- ja plastsusnäitajate määramiseks. See on sobilik paljude konstruktsioonimaterjalide puhul, mille surve- ja tugevusnäitajad on sarnased. Samuti on see parim võimalik viis pikikiuga armeeritud komposiitkonstruktsioonimaterjalide tugevusomaduste määramiseks.

Materjalide põhilised tugevus- ja plastsusnäitajad tõmbel määratakse katselisel teel mõjuva jõu ja pikenemise (deformatsiooni) (joonis 1.1 a) või pinge (jõud pinnauhiku kohta) ja suhtelise pikenemise (suhtelise deformatsiooni) kaudu (joonis 1.1 b). Selleks kasutatakse kindla kujuga katsekehi ehk teimikuid.

Suhteline deformatsioon ε on määratud seosega

$$\varepsilon = (L - L_0)/L_0, \quad (1.1)$$

kus L_0 – teimiku algpikkus,
 L – teimiku lõpp-pikkus.



Joonis 1.1. Tõmbediagrammid koordinaadistikus: a – jõud ja absoluutne pikenemine (1 – voolavusplatvormiga, 2 – ilma selleta); b – pinge ja suhteline pikenemine (A_t – kogupikenemine (%) (elastse ja plastse deformatsiooni summa) purunemisel, suurus A – katkevenivus (%) (mõõtepikkuse jäävpikenemine pärast purunemist))

Vastavalt standarditele EVS-EN ISO 6892-1:2010 (Metallmaterjalid. Tõmbeteim) ja EVS-EN ISO 527-1:2000 määratakse katsetamisel tõmbele mitmed tugevusnäitajad.

a) **Tõmbetugevus R_m** – maksimaaljõule F_m vastav pinge (vt joonis 1.1 a):

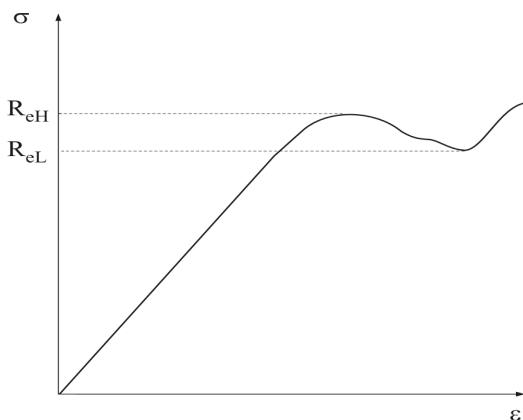
$$R_m = \frac{F_m}{S_0}, \quad (1.2)$$

kus F_m – maksimaaljõud,
 S_0 – teimiku algristlõikepindala.

b) **Voolavuspiir R_{eH}** (ülemine) ja **R_{eL}** (alumine) – (vt joonis 1.2):

R_{eH} – pinge väärtus, mille saavutamisel esmakordselt täheldatakse jõu vähenemist;

R_{eL} – pinge madalaim väärtus plastsel voolamisel.

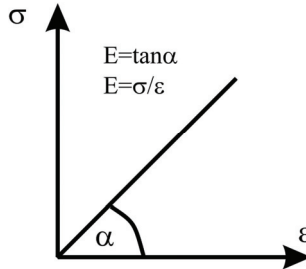


Joonis 1.2. Tõmbediagrammi *pinge ja suhteline deformatsioon* ülemine ja alumine voolavuspiir

c) **Tinglik voolavuspiir R_p** – pinge, mille juures baasi jääv-pikenemine saavutab etteantud väärtuse protsentides, nt 0,2%. Seejuures kasutatakse lisaindeksit, mis näitab baaspikkuse muutu, nt $R_{p0,2}$.

Tugevusnäitajate dimensiooniks on Si-süsteemis N/m^2 ; tavaliselt esitatakse need aga N/mm^2 -s (MPa).

Lisaks on võimalik määrata ka materjali vastupanu elastsele deformatsioonile ehk elastsusmoodul E . Elastsusmoodul määratakse tõmbediagrammi lineaarse osa tõusunurga α tangensiga (joonis 1.3):



Joonis 1.3. Elastsusmooduli määramine

Voolavuspiirist (või selle puudumisel tinglikust voolavuspiirist) väiksematel pingetel on pinge ja suhteline deformatsioon lineaarses sõltuvuses (joonis 1.1 ja 1.3):

$$\sigma = E \cdot \varepsilon. \quad (1.3)$$

Seda seost tuntakse Hooke'i seadusena, kus E on elastsusmoodul, σ – pinge ja ε – suhteline deformatsioon.

Katsetamisel tõmbele plastsusnäitajatest määratakse:

- a) **Katkevenivus A%** (suhteline pikenedamine protsentides purunemiseni):

$$A = \left(\frac{L_u - L_0}{L_0} \right) 100, \quad (1.4)$$

kus L_0 – teimiku algmõõtepikkus,
 L_u – teimiku lõppmõõtepikkus pärast purunemist.

b) **Katkeahenemine Z%:**

$$Z = \left(\frac{S_0 - S_u}{S_0} \right) 100, \quad (1.5)$$

kus S_0 – teimiku algristlõikepindala,
 S_u – teimiku minimaalne ristlõikepindala katkemiskohas.

Kuna tõmbeteimil väheneb koormamise käigus teimiku ristlõikepind, siis sel teel saadud voolavuspiiri R_p , eriti aga tugevuspiiri R_m väärtused ei kajasta tegelikke pingeid. Tegelikud pinged erinevad seda enam, mida plastsem on materjal. Kui habraste materjalide korral võib R_m väärtusi vaadelda materjali tugevuse näitajana (katkeahenemine Z on väike), siis plastsete materjalide korral võib tugevuspiiri R_m vaadelda kui vastupanu märgatavale plastsele deformatsioonile. Kõik tugevusnäitajad kujutavad endast pinget – jõudu pinnauhiku kohta. Tugevusnäitajaid kasutatakse konstruktsioonelementide arvutamisel. Üheks arvutusmeetodiks on tugevuse hindamine nn lubatavate pingete meetodil. Selle arvutusmeetodi põhimõtteks on konstruktsiooni töötamine elastsete deformatsioonide piirkonnas. Plastsetel materjalidel on lubatav pinge tugevusvaru võrra väiksem kui selle materjali voolavuspiir R_p (tinglik voolavuspiir $R_{p0,2}$). Vastavalt detaili vastutusrikkuse astmele võib selle tugevusvaru olla 1,5...10. Detaili lubatava minimaalse ristlõikepindala saame järgnevalt:

$$S = \frac{F}{[\sigma]}, \quad (1.6)$$

kus S – konstruktsioonelemendi ristlõikepindala,
 F – antud konstruktsioonelemendile mõjuv jõud,
 $[\sigma]$ – lubatav pinge (plastsetel materjalidel $[\sigma] < R_p$).

Habrastel materjalidel on lubatav pinge tugevuspiirist R_m tugevusvaru võrra väiksem. Selliste materjalide kasutamise korral võivad detailile mõjuda ainult staatilised jõud.

Kui detailile mõjuvad surve- või väändejõud, võetakse detailide arvutustes plastsete materjalide puhul aluseks voolavuspiir surve- või voolavuspiir väändel ja habraste materjalide korral survetugevus või väändetugevus.

Teise konstruktsioonelementide tugevusarvutuse meetodi puhul antakse ette detaili jäikus – lubatav suhteline deformatsioon $[\varepsilon]$.

$$\text{Kuna} \quad \frac{\sigma}{\varepsilon} = E \text{ ehk } \varepsilon = \frac{\sigma}{E}, \text{ siis } [\varepsilon] \geq \frac{\sigma}{E}. \quad (1.7)$$

$$\text{Siit} \quad [\varepsilon] \cdot E \geq \sigma = \frac{F}{S}, \quad (1.8)$$

$$\text{kusjuures} \quad \sigma \leq [\sigma] = \frac{\sigma_t}{\text{Tugevusvaru (ohutegur)}}. \quad (1.9)$$

F – mõjuv jõud,

S – vajalik konstruktsioonelementi minimaalne ristlõikepindala,

σ_t – tugevuspiir.

Staatilise koormamisega määratakse mehaanilisi omadusi tavaliselt siledatel teimikutel. 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 muudavad metallis pingelõigu ja tekitavad pingete kontsentratsiooni.

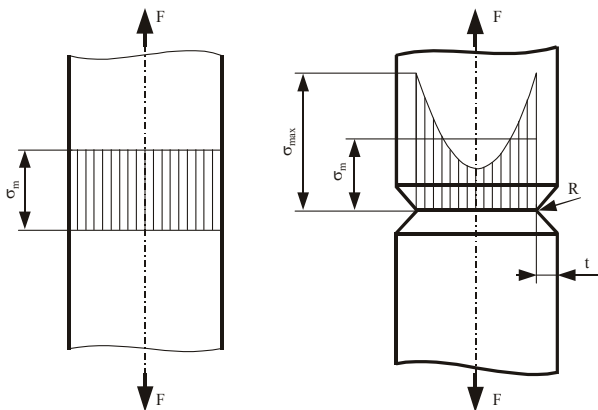
Joonisel 1.4 on pingepüürid (pinge graafiline esitusviis) sileda ja pingekontsentratsiooniga teimiku korral. Pingekontsentratsiooniga teimiku katkemismomendi maksimaalse pinget σ_{maks} arvutamiseks kasutatakse valemit

$$\sigma_{\text{maks}} = 2\sigma_m \sqrt{\frac{t}{R}}, \quad (1.10)$$

kus σ_m – keskmine pinget,

R – ümardusraadius,

t – sisselõike sügavus.



a)

b)

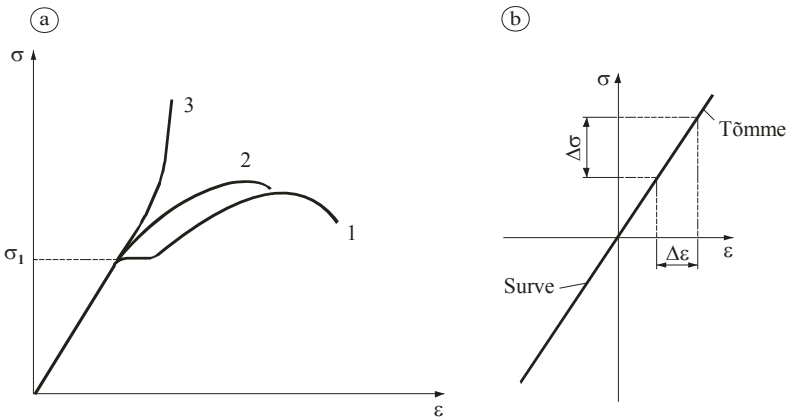
Joonis 1.4. Pingeepüürid sileda (a) ja pingekonsentraatoriga teimiku korral (b)

Surveteim

Plastsete materjalide (konstruktsiooniterased, plastid) korral kasutatakse konstruktsioonidetailide arvutamisel ka surveolukorras töötavate detailide puhul tõmbeteimil saadud näitajaid – voolavuspiiri, kuna plastsed materjalid käituvad kuni plastse deformatsiooni alguseni ühtmoodi tõmbe- ja survejõudude toimel (joonis 1.5 a).

Survejõudude korral on tegu palju pehmema koormamisviisiga valdavate tangentsiaal- ehk nihkepingete tõttu. Seetõttu paljud metallid ja sulamid (eelkõige plastsed) survejõudude toimel ei purune, vaid nendest valmistatud katsekehad lähevad laiaks (jämenevad). Mida laiemaks on läinud katsekeha, seda suuremat jõudu tuleb selle edasiseks deformeerimiseks rakendada. Tõmbejõudude korral tekib plastsetel materjalidel katsekeha ahenemine – “kael” ja selle tulemusena väheneb tõmbejõud. Survejõudude korral edasiseks deformeerimiseks jõud pidevalt kasvab. Seetõttu määratakse paljudel polümeeridel materjalidel survetugevus kindla deformatsiooni juures (nt vahtpolüstüreenplaat EPS 100, survetugevus 100 kPa 10% suhtelise deformatsiooni juures).

Kuna tõmbe- ja survejõudude korral käituvad materjalid kuni plastse deformatsiooni alguseni analoogselt, siis plastsetel materjalidel on voolavuspiir (tinglik voolavuspiir) survel võrdne voolavuspiiriga tõmbel. Väikeste pingete puhul (joonis 1.5 a, pingeni σ_1) esinevad konstruktsioonis ainult elastsed deformatsioonid, s.o sellised deformatsioonid, mis koormuse eemaldamisel kaovad. Selles osas kehtib Hooke'i seadus (vt joonis 1.3 ja 1.5 b).



Joonis 1.5. Pinge ja suhtelise deformatsiooni vaheline seos: a – tõmbe- ja survediaграмmid (plastse (1) ja hapra materjali (2) tõmbekõverad; plastse materjali survekõver (3)); b – tõmbe- ja survediaграмmi elastne osa

Konstruktsioonielementide tugevusarvutustes kasutatavad lubatavad pinged plastsetel materjalidel (on väiksemad voolavuspiirist) on nii tõmbel kui ka survel praktiliselt samad (tabel 1.1). Habraste materjalide korral erinevad lubatavad pinged (on väiksemad tugevuspiirist) tõmbel ja survel mitmeid kordi (vt betoon – tabel 1.1).

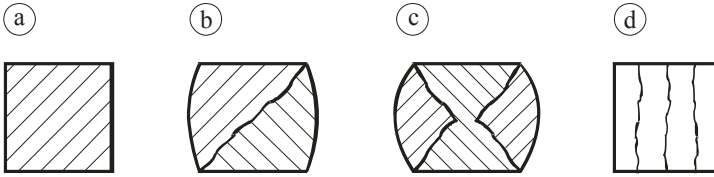
Tabel 1.1

Erinevate materjalide omadused (orienteeruvad)

Materjali grupp	Tõmbetugevus N/mm ²	Survetugevus N/mm ²	Voolavuspiir N/mm ²	Katkevenivus A %	Elastsusmoodul E GPa	Löögisitkus KU J	Tihedus g/cm ³
Süsinikteras	160...500	160...500	100...300	10..45	210	10..150	7,8
Legeerteras	500...2500	500...2500	200...1000	5...45	205...212	75..400	7,8..8,1
Al-sulamid	90...570	90...470	35...505	5...45	70	10...50	2,7
Malm	100...1000	100...1000	80...600	0...20	210	0...75	7,6
Plast	8...76	8...80	4...40	1...1000	0,5...3,5	0...2	0,9...2,2
Polümeervaik	30...90	30...90	–	1...6	2...4	0...0,1	1,1...1,6
Klaasplast	100...2100	70...800	–	0..1,5	8...45	–	1,5...1,8
Elastomeer	0,7...80	0,7...80	–	20...2000	0,05...2	–	0,9...1,3
Puit (õhkuiv)	3...70*	1,5...35*	–	1...2	7...14	0...0,3	0,1...1,3
Betoon	0,5	5...60	–	0	25...30	–	0,7...2,5

* piki kiudu

Surveteimi korral soovitatakse kasutada katsekehi läbimõduga $d = 10...25$ mm ja kõrgusega h , mis on võrdne läbimõduga. Katsekehade otspinnad peavad olema paralleelsed ja siledad (lihvitud). Hõõrdumine katsekehade otspindadel takistab materjali radiaalset deformatsiooni ja seetõttu omandavad katsekehad tünni kuju (joonis 1.6 b ja c). Hõõrdejõudude vähendamiseks soovitatakse kasutada katsekehade otstel määret.



Joonis 1.6. Surveteimik (a) ja selle purunemise iseloom (b, c); d – otspindadel on vähendatud hõõrdejõud

Survetugevus R_m^c arvutada valemiga

$$R_m^c = \frac{F_m}{S_0}. \quad (1.11)$$

Suhteline lühenemine leitakse valemiga (1.12)

$$A = \frac{H_0 - H_1}{H_0}, \quad (1.12)$$

kus H_0 – teimiku algkõrgus,
 H_1 – teimiku lõppkõrgus.

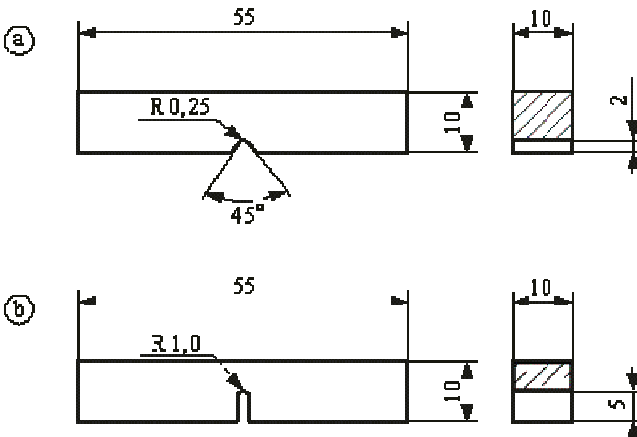
Löökpaindeteim

Tõmbeteimil saadud tugevusnäitajate kasutus konkreetse detaili või konstruktsioonialemendi tugevusarvutustes tagab selle ohutu töö staatilise või sujuvalt muutuva koormuse korral. Lisaks võib konstruktsioonile mõjuda löökkoormus, mis võib hapralt purustada detaili. Ootamatu habras purunemine on üks ohtlikumaid konstruktsioonide või detailide purunemise viise. Katsetamine löökpaindele võimaldab otsustada materjali kalduvuse üle haprale purunemisele. Katsetamine seisneb keskelt soonitud teimiku purustamises löökpendliga, määrates töö, mis kulub teimiku purustamiseks. Soon toimib kui pingekontsentraator, mis lokaliseerib pinged ja soodustab prao tekkimist.

Löögisitkuse näitajaks on purustamiseks kulunud töö (purustustöö) džaulides, J ($1 J = 1 N \cdot m$).

Vastavalt standardile EVS EN 10045-1 (Metallmaterjalid. Löökpaindeteim Charpy meetodil) kasutatakse löökpaindeteimil kahe soonekujuga teimikuid (joonis 1.7):

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



Joonis 1.7. Löökpainde teimikud: a – V-kujuline soon, b – U-kujuline soon

Katsetamine löökpaindele toimub löökpendliga, mille skeem on joonisel 1.8. Löökpendli pendel massiga m ja pikkusega L on kinnitatud liikuvale alusele. Pendli teele asetatakse teimik. Katsetamisel viiakse pendel ülemisse asendisse, milles pendli moment

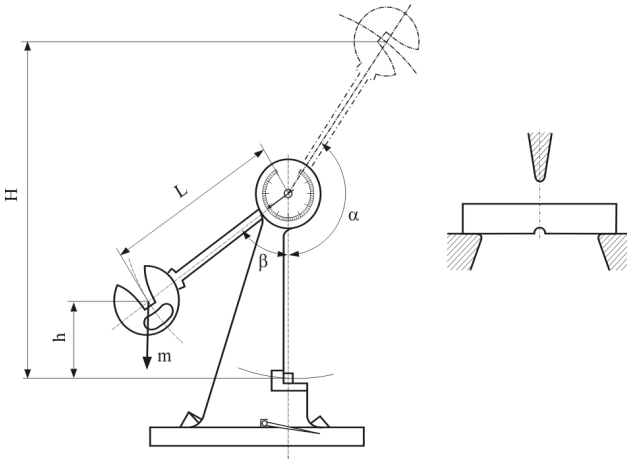
$$M = F \cdot L = m \cdot g \cdot L. \quad (1.13)$$

Pendli potentsiaalne energia ülemises asendis

$$A_p = M(1 - \cos\alpha) = m \cdot g \cdot L (1 - \cos\alpha). \quad (1.14)$$

Kui ülemises asendis olev pendel vabastatakse, langeb ta alla ja purustab teimiku. Selleks kulutatakse osa pendli energiast, mistõttu pendli väljalööginurk β on väiksem kui nurk α . Kulutatud energia leitakse seosest

$$A = M(\cos\beta - \cos\alpha) = m \cdot g \cdot L (\cos\beta - \cos\alpha). \quad (1.15)$$



Joonis 1.8. Löökpendli skeem

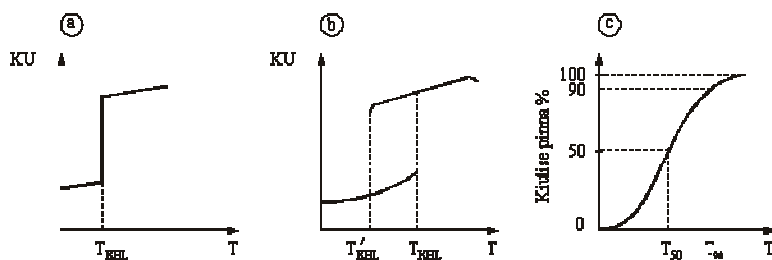
Kulutatud energiat (teimiku purustamiseks kulutatud tööd – purustustööd) tähistatakse järgmiselt:

- KU on U-soonega teimiku purustustöö,
- KV on V-soonega teimiku purustustöö.

Nii näiteks $KV = 121 \text{ J}$ tähendab standardse V-soonega teimiku purustustööd löökpendli nominaalse löögienergiaga 300 J korral. Teistsuguse löögienergiaga löökpendli puhul lisatakse tähisele KU või KV pendli löögienergiat näitav arv, standardsest erineva (kitsama) V-soonega teimiku teimimisel ka katsekeha laius, nt $KV 150/5,0 = 83 \text{ J}$ tähendab purustustööd pendli nominaalse löögienergiaga 150 J ja vähendatud ristilõikega teimiku (laiusega $5,0 \text{ mm}$) korral. Katsetamine löökpaindele on üks jäigemaid katsetamise viise. Kui materjal peab

töötama madalatel temperatuuridel, siis viiakse katsetused läbi samuti madalatel temperatuuridel. Seda tingib asjaolu, et mõningate materjalide sitkus väheneb järsult temperatuuri langedes. Materjali hapruse suurenemist (sitkuse vähenemist) madalatel temperatuuridel nimetatakse külmahaprumiseks. Enamik konstruktsiooniteraseid kaldub temperatuuri langedes haprale purunemisele. Enamiku haprale purunemisele kalduvate teraste korral toimub üleminek sitkelt purunemiselt haprale temperatuuriintervallis $+20\dots-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, mistõttu käsiraamatutes antakse tavaliselt löögitugevuse väärtused toatemperatuuril ja $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ juures. Hapra purunemise temperatuur määratakse enamasti rea teimikute katsetamise teel löökpaindele erinevatel temperatuuridel. Temperatuuri, mille juures metalli löögitugevuse näitajad langevad järsult, nimetatakse külmahapruslāveks (T_{KHL}) (joonis 1.9 a). Külmahapruslāvi on üks tähtsamaid metallide konstruktsioonitugevuse kriteeriume.

Külmahapruslāve on võimalik määrata ka purunemispildi järgi. Hapra purunemise korral on tegemist jämedateralise läikiva pinnaga; sitke purunemise korral aga kiulise mati purunemispinnaga. Kui materjalil on piiratud sitkus, siis esineb purunemispildis nii teralise kui ka kiulise purunemise tsoon. Külmahapruslāvi määratakse sel juhul kiulise ja teralise purunemispinna suhte järgi. Tavaliselt võetakse sellisel juhul külmahapruslāveks temperatuur T_{50} , s.o temperatuur, mille juures purunemispildis on vähemalt 50% kiulist pinda; vastutusrikaste detailide korral aga sageli temperatuur T_{90} – vähemalt 90% purunemispinnast on kiulise struktuuriga (joonis 1.9 c).



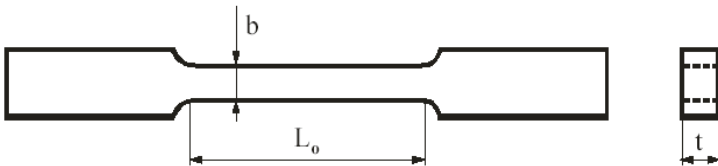
Joonis 1.9. Löögisitkuse (a – puhtad metallid, b – terased) ja kiulise pinna (sitke purunemise) osakaalu (c) sõltuvus katsetamise temperatuurist

Sel juhul on materjal suure löögitugevusega. Purustustöö ja külmahapruslävi pole materjali jäävad suurused, vaid sõltuvad suuresti materjali struktuurist, töötingimustest, pingekontsentratsioonidest, deformatsiooni kiirusest, detaili mõõtmetest jt. Detailis olevad pingekontsentratsioonid (avad, astmed, sooned jms) ja detaili deformatsiooni kiiruse suurenemine vähendavad detaili purustustööd. Enim mõjub tera suurus – mida peeneteralisem on struktuur, seda sitkem on teras (purustustöö suurem) ja seda madalam on külmahapruslävi. Teraste korral on külmahapruslävi temperatuurivahemikus $+50\dots-150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Töö käik

Tõmbeteim

Töös katsetatavad materjalid ning katsekehade arvu teatab õppejõud. Joonisel 1.10 on laboritöös kasutatava teimiku põhimõtteline kuju – algpikkus L_0 , laius b ning paksus t . Erinevatest materjalidest katsekehade mõõtmed võivad olla erinevad.



Joonis 1.10. Tõmbeteimiku kuju

Arvutuslik-analüüsisivas osas

- kõik katsetulemused ja arvutused esitada aruandes Tabeli 1.2 kujul;
- enne katset määrata katsekeha materjal (armeeringu suund komposiitmaterjalide puhul) ja mõõtmed ning arvutada ristlõike pindala mm^2 -tes;
- leida tõmbediagrammilt tugevuspiirile ja voolavuspiirile vastavad jõud F_m ja F_p ;
- arvutada tugevuspiir R_m ja voolavuspiir R_p ;

- leida tõmbediagrammilt tugevuspiirile ja voolavuspiirile vastavad suhtelised pikenemised;
- arvutada katkevenivus A ;
- arvutada suhe R_m/ρ ning reastada katsetatud materjalid selle põhjal;
- pakkuda materjalidele võimalikud kasutusalaad.

Tabel 1.2

Materjalide tugevusnäitajate määramine tõmbele – katsetulemuste tabel

Materjal	b mm	t mm	S_0 mm ²	L_0 mm	F_{maks} kN	R_m N/mm ²	F_p kN	R_p N/mm ²	L_1 mm	A %	E GPa	ρ mg/mm ³	$\frac{R_m/\rho}{\text{N}\times\text{mm}} \times \text{mg}$	Kasutusala

Löökpaindeteim

Katsetamine löökpaindele Charpy meetodil toimub löögienergiaga 300 J löökpendlil massiga $m = 21,96$ kg ja õlapikkusega $L = 1000$ mm. Teimiku materjali teatab õppejõud. Määrata teimiku soone tüüp. Määrata katsetustemperatuur. Tutvuda katsemasina skaalaga. Peale igat katset hinnata katsekehade purunemispindadel sitke ja hapra purunemise osakaalud. Katseandmed ja vajadusel arvutused kantakse tabelisse 1.3.

Tabel 1.3

Löökpaindeteimi tulemused

Teimiku soone tüüp	Nurgad α β kraad	Purustustöö KU või KV J	Katsetustemperatuur	Purunemispinna iseloom

Surveteim

Katsekehade materjali ning arvu annab teada õppejõud. Algselt määrata teimikute läbimõõd d ja kõrgus H_0 ning surveteimil purustusjõud F_m . Survepinge R_m^C arvutada valemiga (1.10) ning suhteline lühenemine valemiga (1.11). Katsetulemused kanda tabelisse 1.4.

Tabel 1.4

Surveteimi tulemused

Teimik	Mõõtmed	S_0 mm^2	H_0 mm	H_1 mm	F_m kN	R_m^C N/mm^2	A %

Aruande sisu

1. Tiitelleht.
2. Töö eesmärgid.
3. Katse- ja arvutustulemused ja nende analüüs.
4. Asjakohased järeldused tehtud töö kohta.

Kontrollküsimused

1. Mis on tõmbetugevus, kuidas seda määratakse?
2. Mis on voolavuspiir, tinglik voolavuspiir ja kuidas neid määratakse?
3. Missugust materjali omadust iseloomustab tõmbetugevus, voolavuspiir, tinglik voolavuspiir?
4. Mis on katkevenivus, katkeahenemine?
5. Missugust materjali omadust iseloomustab katkevenivus, katkeahenemine?
6. Millised on materjali plastsusnäitajad?
7. Selgitage tähiseid R_{eH} , R_{eL} , R_p .
8. Miks tugevusarvutustes plastsete materjalide korral ei sobi tugevuspiir?

9. Milline on seos materjali tugevuse R_m ja kõvaduse HB vahel?
10. Millised on löögisitkuse näitajad?
11. Mis on külmahaprus?
12. Mida tähendavad külmahapruse juures temperatuurid T_{50} ja T_{90} ?
13. Kuidas mõjutab katsetustemperatuur löögitugevust?
14. Selgitage tähiseid KU, KV.
15. Missuguseid materjale katsetatakse tavaliselt survele ja miks?
16. Kas on võimalik tõmbepingete järgi otsustada survepingete üle, ja kui on, siis missugustel materjalidel ning missuguste pingeteni?
17. Missugune survetöötlusviis eeldab materjalide suurt plastsust: traadi tõmbamine, lehe valtsimine, varda väljapressimine, ja miks?
18. Millistest pingetest lähtutakse konstruktsioonelementide arvutustel?
19. Mis on lubatava pinge meetod? Kus seda kasutatakse; milline on selle suurus plastsete materjalide ja habraste materjalide korral?

TÖÖ NR 2

MATERJALIDE MEHAANILISED OMADUSED

Kõvadus

Sissejuhatus

Kõvadust kasutatakse peamiselt kulumiskindluse ja termotöötluse kvaliteedi hindamisel. Samuti on võimalus hinnata materjali tugevust läbi kõvaduse mõõtmise.

Kõvaduse määramiseks on mitmeid meetodeid ja mõõteskaalasid, mille valik nõuab teadmisi ja kogemusi. Katseseadmed – kõvadusmõõturid varieeruvad statsionaarsetest kuni kaasaskantavateni. Erinevalt tõmbe- või surveteimidest saab detaili või materjali kõvadust mõõta ka seda rikkumata.

Töö eesmärgid

- Tutvuda põhiliste kõvaduse määramise meetoditega (Brinell, Rockwell ja Vickers, Barcol).
- Valida sobiv meetod kõvaduse määramiseks erinevatele materjalidele.
- Võrrelda katsetatud materjalide kõvadust.
- Analüüsida seost materjali tõmbetugevuse ning kõvaduse vahel.
- Hinnata materjali kõvaduse olulisust materjali valikul.

Töö selgitav osa

Kõvadus on materjali võime vastu panna kohalikule deformatsioonile tema pinda suurema kõvadusega keha (otsak) sissetungimisel. Otsak on valmistatud vähedeformeeruvast materjalist (teemant, kõvasulam või karastatud teras) ja võib olla kuuli-, koonuse- või püramiidi-kujuline. Enamlevinud mooduseks on kõvaduse mõõtmine otsaku sissesurumise teel.

Otsaku küllaltki suure koormusega sissesurumise tagajärjel deformeeritakse plastse materjali pinnakiht jäädavalt. Pärast koormuse kõrvaldamist jääb materjali pinnale jälg. Mida väiksem on kõvadus, seda sügavamale tungib otsak ja seda suurem on jälg. Mida suurem on materjali kõvadus (ka tugevus), seda väiksem on tekitatud jälg. Elastsete materjalide korral, mis on plastselt vähe deformeeruvad, mõõdetakse kõvadust koormuse mõjudes.

Kõvaduse mõõtmise meetodi valikul lähtutakse detaili/materjali

- eeldatavast kõvadusest (otsaku kõvadus peab olema mõõdetava materjali kõvadusest märgatavalt suurem),
- pinnaviimistlusest (pinnakareduse mõju),
- paksusest (kuni kümnekordne jäljesügavus),
- pinnakihi paksusest (nt pindkarastatud, tsementiitud materjalid),
- ligipääsetavusest mõõtekohale (võimalus kasutada statsionaarset või kaasaskantavat masinat).

Nagu edaspidi näha, on kasutusel mitmed kõvaduse määramise meetodid ja skaalad (joonis 2.4, tabel 2.3). Kuigi paljude materjalide kõvadust on võimalik mõõta mitmete meetoditega, pole mõõdetavad kõvadusarvud omavahel üks ühele võrreldavad. Vale kõvadusmeetodi valik viib mitteusaldusväärse katsetulemuseni või halvemal juhul kasutatava masina/otsaku purunemiseni. Seega tuleb kõvadusmeetodi valikul olla hoolikas ja lähtuda eespool toodud valikutingimustest.

Kõvaduse mõõtmine Brinelli meetodil (EVS EN ISO 6506-1)

Kõvaduse määramisel Brinelli meetodil surutakse katsetatavasse materjali kõvasulamkuul või karastatud teraskuul läbimõõduga (D) 10; 5; 2,5; 2; 1 mm ja jõuga (F) 1...3000 kgf (9,8...29430 N). Brinelli kõvadust määratakse reeglina metalsetel (terased, Al-sulamid, Cu-sulamid jne) materjalidel. Meetodi ülemiseks piiriks võib lugeda terase kõvaduse karastatud olekus, alumiseks pehmed puhtad metallid.

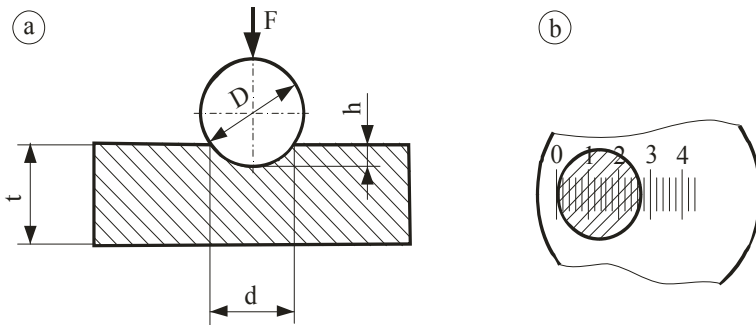
Tüüpiline kasutusala: teras lõõmutatud või lähteolekus, teras parandatud olekus, hallmalmid, pronksid.

Brinelli kõvadusarv HBW kõvasulamkuuli (HBS teraskuuli) puhul määratakse kuulile toimiva jõu ja sfäärilise jälje pindala suhtena. Siit Brinelli kõvadus:

$$HBW = \frac{F}{\text{const} \cdot S} = 0,102 \cdot \frac{2F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (2.1)$$

kus F – jõud N,
 S – jälje pindala mm^2 ,
 D – kuuli läbimõõt mm,
 d – jälje läbimõõt mm.

Valemist (2.1) nähtub, et kõvadus sõltub jõust F , kuuli läbimõõdust D ja jälje läbimõõdust d . Viimane mõõdetakse spetsiaalse mikroskoobi (eriluubi) abil, mille okulaari on kantud skaalajaotised (joonis 2.2 b), numbrid tähistavad millimeetreid.



Joonis 2.1. Brinelli kõvaduse määramise skeem (a) ja jälje mõõtmine (b)

Jälje läbimõõt mõõdetakse reeglina 0,05 (ka 0,1) mm täpsusega kahes teineteisega ristiiolevas suunas ja leitakse keskmine väärtus. Selleks et mitte arvutada pärast iga mõõtmist jälje pindala, on koostatud tabel, mille põhjal saame jälje suuruse järgi vahetult kõvaduse väärtuse HBW või HBS. Katsetusjõud valitakse arvestu-

sega, et jälje läbimõõt oleks vahemikus (0,24...0,6) D. Selleks jõu ja kuuli läbimõõdu suhe $k = 0,102 F/D^2$ peab olenevalt materjalist olema kas 30; 15; 10; 5; 2,5 või 1 (tabel 2.1). Katsekeha minimaalne paksus t ei tohi olla väiksem kui jälje 8-kordne sügavus.

Tabel 2.1

Jõu ja kuuli kasutusala

Jõu ja kuuli läbimõõdu suhe		
1	10	30
Pehmed sulamid	Vasesulamid	Malm, teras

Brinelli kõvadusarvu 350 tähistatakse nt 350 HBW 5/750, kus 5 – kuuli läbimõõt mm, 750 – jõud kgf (7355 N), koormamise kestus 10...15 sekundit.

Teistel kestustel tuuakse see tähise lõpus, nt 600 HBW 1/30/20 – $d = 1$ mm, $F = 30$ kgf (294,2 N), jõu mõjumisaeg 20 sekundit.

Metallide ja sulamite puhul (lõõmutatud olekus) kehtib tõmbetugevuse ja Brinelli kõvaduse vahel ligikaudne seos $R_m \approx 3 HB$.

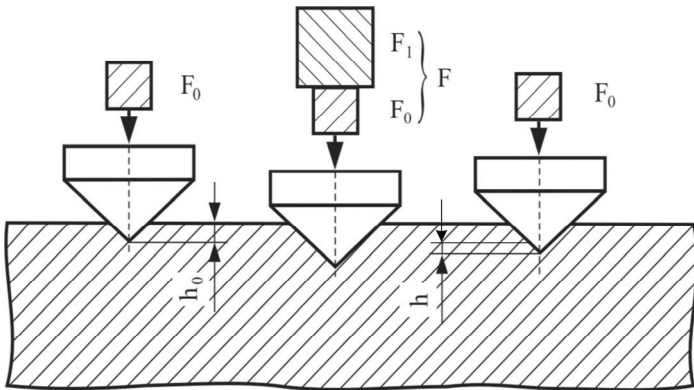
Kõvaduse määramine Rockwelli meetodil (EVS EN ISO 6508-1)

Rockwelli meetod on võrreldes Brinelli meetodiga märksa universaalsem ja sobib laiemas kõvaduse vahemikus materjalide katsetamiseks. Meetod oma põhimõttelt on lihtne ning ei ole nõutav jälje mõõtmine operaatori poolt. Tulemus loetakse otse masina skaalalt. Puuduseks on nõutav katseobjekti hea pinnaviimistlus, samuti ka korralik baseerimine töölaual. Katseobjekti läbivajumine või liikumine koormuse toimel ei ole lubatud, üks kõvadusarvu ühik vastab otsaku liikumisele 1...2 μ m.

Kõvadusarv saadakse otsaku sissetungimissügavuse järgi uuritava materjali. Mida suurem see on, seda väiksem kõvadus. Vastavalt kasutatavale koormusele ning otsakule eristatakse mitmeid erinevaid skaalasid. Metalsete materjalide korral leiavad kasutamist enamasti A-, B- ja C-skaala, pehmete sulamite ning plastide puhul H-, R-, M-

skaala. Tüüpiline kasutusala terase puhul on C-skaala, Al-sulamite korral B-skaala, kõvasulamitele korral A-skaala ning plastide puhul M-skaala (tabel 2.2).

Katsetamisel surutakse otsak materjalisse eeljõuga $F_0 = 10 \text{ kgf}$ (98 N) ja fikseeritakse asend. Seejärel suurendatakse seda põhijõuni 60 kgf (588 N), 100 kgf (980 N) või 150 kgf (1470 N) ja taastatakse esialgne jõud F_0 . Kõvadust iseloomustab kuuli või koonuse materjalisse sissetungimise sügavuste vahe (joonis 2.2).



Joonis 2.2. Kõvaduse määramine Rockwelli meetodil

Kõvadusarv saadakse järgmise valemi järgi:

$$HR = N - \frac{h}{c}, \quad (2.2)$$

- kus h – otsaku sissetungimise sügavuste vahe;
 N – skaalale omane konstant (koonuse puhul $N = 100$; kuuli puhul $N = 130$);
 c – skaalajaotis 0,002 mm; 0,001 HRN ja HRT puhul.

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

(B-skaala). Mõlemal juhul fikseeritakse otsaku sissesurumise algasend indikaatori musta skaala nulliga.

Tabel 2.2

Rockwelli põhilised kõvadusskaalad

Skaala	Otsak	Eelkoormus F_0 kgf (N)	Kogu koormus F kgf (N)	Mõõtmis- piirkond	Kasutusala
HRA	Koonus	10 (98)	60 (588)	20...88	Kõvasulamid, paksud pinded
HRB	Kuul Ø 1,588 mm	10 (98)	100 (980)	20...100	Cu-, Al-, ja Fe- sulamid (pehmed)
HRC	Koonus	10 (98)	150 (1471)	20...70	Teras (keskmine kuni kõrge kõvadus)
HRE	Kuul Ø 3,175 mm	10 (98)	100 (980)	70...100	Kõvad plastid, Al-, Mg- sulamid
HRL	Kuul Ø 6,35 mm	10 (98)	60 (588)	70...100	Pehmed sulamid, plastid
HRM	Kuul Ø 6,35 mm	10 (98)	100 (980)	70...100	Pehmed sulamid, plastid
HRR	Kuul Ø 12,70 mm	10 (98)	60 (588)	70...100	Pehmed sulamid, plastid

Kõvaduse määramine Vickersi meetodil (EVS EN ISO 6507-1)

Vickersi meetod põhineb teemantpüramiidi sissesurumisel materjali. See meetod võimaldab määrata mis tahes metalli või sulami kõvadust ning sobib nii õhukese metalli kui ka pinnakihi kõvaduse määramiseks.

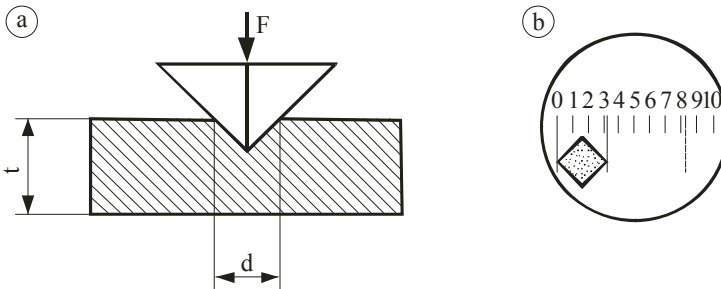
Tüüpiline kasutusala – õhukesed materjalid, pinded, tsementiiditud, nitreeritud pinnakihid ja pindkarastatud terased; keevisõmbluste termomõjutsoonid (nt terase S235J2G3 korral ei tohi kõvadus ületada

350 HV10 ühikut), kõvasulamid, keraamika. Meetodi puuduseks on kõrgendatud nõuded pinnaviimistlusele, sisuliselt on nõutud poleeritud pind.

Materjali pinda surutakse neljatahuline püramiid tahkudevahelise nurgaga 136° ja jõuga 1...100 kgf (9,8...980 N). Jälje diagonaal mõõdetakse optilise mikroskoobi abil. Jälje mõõtmise skeem Vickersi meetodil on toodud joonisel 2.3. Numbrid tähistavad kümnendikmillimeetreid. Kõvaduse arvutamine Vickersi meetodi korral toimub järgmise valemi järgi:

$$HV = \frac{F}{A} = \frac{2F}{d^2} \cdot \sin \frac{\alpha}{2} = 0,189 \frac{F}{d^2}, \quad (2.3)$$

kus F – jõud N,
 S – jälje pindala mm^2 ,
 α – püramiidi tahkudevaheline nurk ($\alpha = 136^\circ$),
 d – jälje diagonaal mm.



Joonis 2.3. Vickersi kõvaduse määramise skeem (a) ja jälje mõõtmine (b)

Vickersi kõvadust tähistatakse katsetingimuste $F = 30$ kgf (294,2 N) ja koormuse kestuse 10...15 s korral, näiteks 500 HV30. Teistel kestustel tuakse peale kõvaduse tähist koormamise kestus, nt 220 HV30/40, s.o Vickersi kõvadusarvu 220, mis on määratud koormusel $F = 30$ kgf (294,2 N) ja kestusel 40 s.

Sõltuvalt materjali paksusest ja kõvadusest kasutatakse jõudu $F = 1; 2; 2,5; 3,0; 5; 10; 20; 30; 50$ või 100 kgf (9,8...980 N). Jõud

valitakse vastavalt materjali paksusele ning teraste korral $t \geq 1,2$ d ja mitteraudmetallide ja -sulamite korral $t \geq 1,5$ d. Teraste ja malmide korral $F = 5 \dots 100$ kgf (49...980 N), vase ja vasesulamite korral $F = 2,5 \dots 50$ kgf (27,5...49 N), alumiiniumi ja alumiiniumisulamite korral $F = 1 \dots 100$ kgf (9,8...980 N).

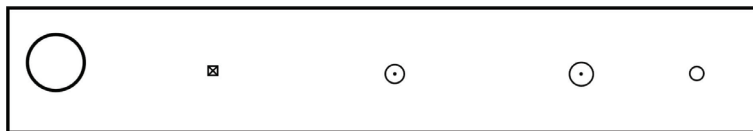
Kõvaduse määramine Barcoli meetodil

Meetod on eelkõige mõeldud komposiitmaterjalide kõvaduse määramiseks. Võimalik on määrata ka pehmete metallide ja sulamite (HB < 200) ning kõvemate plastide kõvadust. Barcoli meetodil (ASTM D2583) surutakse katsekeha pinda teraskoonus tipunurgaga 26° ja tipuraadiusega 0,157 mm. Kõvadust hinnatakse skaalas 0...100 (100 on suurim kõvadus). Iga ühik skaalal on võrdne 0,0076 mm sissetungimissügavusega. Barcoli seade on kaasaskantav.

Tabel 2.3

Erinevate materjalide kõvadusarvud

Materjal	HRC	HRB	HRA	HRM	HBW	HV	Barcol
Süsinikteras S235J2	–	98	60	–	210	228	–
Hallmalm GJL-100	–	90	55	–	175	185	–
Duralumiinium AlCu ₄ MgSi T6	–	85	52	–	159	165	88
Silumiin AlSi12	–	60	39	–	104	107	89
ABS	–	–	–	1,5	–	–	7
PE-HD	–	–	–	–	–	–	1
PMMA	–	–	–	46	–	–	53
PA	–	–	–	78	–	–	1
Polüestervaik	–	–	–	–	–	–	41
Klaaskiud-komposiit	–	–	–	91	–	–	60
Kõvasulam (WC-10Co)	75	–	88	–	–	1500	–
Klaas (SiO ₂)	60	–	80	–	–	700	–
Al ₂ O ₃	–	–	–	–	–	2000	–



201 HBW 216 HV30 56 HRA 13 HRC 95 HRB

Joonis 2.4. Erinevate kõvadusmeetodite poolt tekitatud jälje suurused

Töö käik

Tutvuda kõvadusmõõturitega ning kõvaduse määramise põhimõtetega. Selgitada välja otsaku materjal (karastatud teras, kõvasulam, teemant) ning kuju. Määrata otsaku sissesurumiseks kasutatavad võimalikud jõud (kgf või N). Valida õppejõu poolt antud materjalidele sobilikud kõvaduse määramise meetodid lähtuvalt materjalide eeldatavast kõvadusest, mõõtmetest, kujust ja pinnaviimistlusest ning mõõta kõvadus.

Erinevate materjalide eeldatavat kõvadust hinnata neid omavahel kriipides või viiliga viilides (viili kõvadus on *ca* 61 HRC). Kõvem materjal kriibib temast pehmemat, viilida saab materjale, mille kõvadus on alla 60 HRC. Viilikatse käigus hinnata, millist materjali on kõige kergem, millist kõige raskem viilida.

Järjestada materjalid nendevahelise kriipekatse/viilikatse tulemuste kohaselt.

Saadud tulemuste ning katsekeha kuju ja mõõtmete alusel valida sobilik kõvaduse määramise meetod ja mõõta materjalide kõvadus. Järjestada katsetatud materjalid määratud kõvadusarvude järgi (võimalusel kasutada ühist HV-meetodit). Võrrelda kriipe- ja kõvaduskatsete tulemusi. Kontrollida terase teimiku puhul suhet $R_m \approx 3$ HB. Katseandmed ja arvutustulemused kanda tabelisse 2.4.

Tabel 2.4

Materjalide kõvaduskatsete tulemused

Materjali iseloomustus	Kriipe (viili) katse	Valitud kõvaduse määramise meetod	Jälje suurus mm	Kõvadusarv	HV	Tugevus

Aruande sisu

1. Tiitelleht.
2. Töö eesmärgid.
3. Kõvaduse määramise meetodite lühikirjeldus, kõvaduskatsete tulemused.

Kontrollküsimused

1. Missuguseid otsakuid ja jõude võib kasutada kõvaduse mõõtmisel Brinelli meetodil?
2. Missugune peab olema mõõdetava katsekeha minimaalne paksumus, võrreldes jälje sügavusega Brinelli kõvaduse mõõtmisel?
3. Missugune nõue peab olema täidetud võrreldavate materjalide kõvaduse väärtuste saamiseks kõvaduse mõõtmisel Brinelli meetodil?
4. Missugused skaalad on enamkasutatavad kõvaduse mõõtmisel Rockwelli meetodil? Missugused on nendel juhtudel otsakud ja koormused?
5. Millist otsakut ja jõude kasutatakse Vickersi meetodil kõvaduse määramisel?
6. Selgitage tähiseid HBW, HV ja HBS.
7. Milliseid kõvaduse määramise meetodeid kasutatakse plastide korral?
8. Milliseid kõvaduse määramise meetodeid kasutatakse keraamika korral?

9. Milline on seos materjali tõmbetugevuse ja kõvaduse vahel?
10. Kas Barcoli meetodiga on võimalik määrata õhukese materjali kõvadusarvu?

TÖÖ NR 3

METALLIDE JA SULAMITE MIKROSTRUKTUUR

Sissejuhatus

Metallide ja sulamite omadused (füüsikalised, mehaanilised, tehnoloogilised) on otseselt seotud nende struktuuriga. Struktuur koosneb teradest ning põhikoostisosadeks on faas või faasid. Sulami faas on termodünaamilise sulamisüsteemi kõigi ühesuguse keemilise koostisega ja ühesuguste füüsikaliste omadustega osade kogum, mida süsteemi teistest osadest eraldab piirpind. Sulami faaside arvu ning keemilist koostist mis tahes temperatuuril iseloomustab faasidiagramm. Teiselt poolt mõjutab materjali struktuuri ja omadusi nende lõpptöötlus (deformeerimine, termotöötlus).

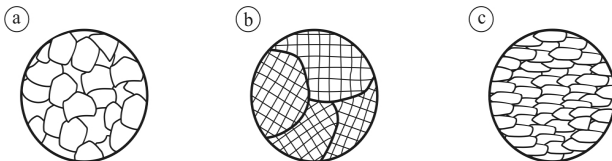
Töö eesmärk

1. Tutvuda metallide ja metallisulamite mikrostruktuuridega, nende struktuurides esinevate faaside ja mehaaniliste segudega.
2. Tutvuda survetöötluse mõjuga metallide ja metallisulamite struktuurile.

Töö selgitav osa

Puhtad metallid

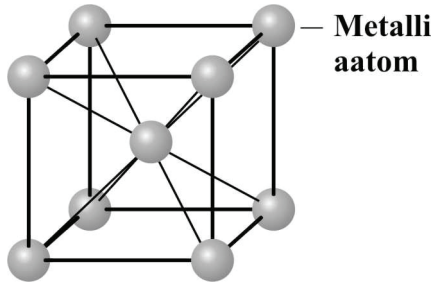
Puhta metalli struktuuri võib vaadelda kui ühefaasilise paljudest kristallidest (teradest) koosnevana – polükristallilisena (joonis 3.1 a), kusjuures üksikud kristallid on üksteise suhtes orienteeritud erinevalt (joonis 3.1 b).



Joonis 3.1. Metallide struktuur

Tuleb arvestada, et survetöötlemise tulemusena (valtsimine, tõmbamine, pressimine jt) võivad kõik kristallid saada ühesuunalise orientatsiooni. Sellist struktuuri nimetatakse tekstuuriks (joonis 3.1 c).

Ideaalne monokristall koosneb aatomitest, mis on paigutatud kindla seaduspärasuse kohaselt, mida iseloomustab kristallivõre (joonis 3.2) ja mis kordub perioodiliselt ruumis (kolmes mõõtkes).



Joonis 3.2. Puhta metalli ruumiline kristallivõre

Survetöötlemise mõju metalli struktuurile

Metallide ja sulamite survetöötlus liigitatakse lähtuvalt rekristallsatsioonitemperatuurist

- külm(surve)töötluseks (viiakse läbi rekristallsiooni- ja toatemperatuuri vahel),
- kuum(surve)töötluseks (viiakse läbi rekristallsatsioonitemperatuurist kõrgemal temperatuuril; kuumtöötlemise ülemiseks piiriks on solidusjoon).

Külm(töötlemise) käigus metall tugevneb (kalestub) ja tema füüsikalised omadused muutuvad. Kalestunud metall neelab 5...10% deformeerimiseks kulutatud energiat. Neeldunud energia kulub kristallivõre defektide moodustamiseks: tekivad võre moonutused, mida iseloomustab defektide arv pinnaühikus ja mis suureneb kuni $10^9 \dots 10^{12} \text{ 1/cm}^2$. Kalestunud metalli omadused muutuvad seda enam, mida suurem on deformatsiooniate. Deformeerimisel suurenevad

tugevusnäitajad (R_m , $R_{p0,2}$) ja kõvadus (HB), vähenevad plastsus- (A, Z) ja sitkusnäitajad (KU, KV).

Deformatsiooniastme kasvades suureneb voolavuspiir kiiremini kui tugevuspiir. Kalestumise tulemusena läheneb voolavuspiir tugevuspiirile (suhe $R_{p0,2}/R_m$ läheneb ühele), pikenemine lakkab ja metall on piirilukorras ning puruneb edasisel deformeerimisel.

Külmdeformeerimisel tekkinud mittetasakaaluline struktuur on enamikul metallidest toatemperatuuril püsiv. Metalli üleminek stabiilsemasse olekusse on seotud kuumutamisega.

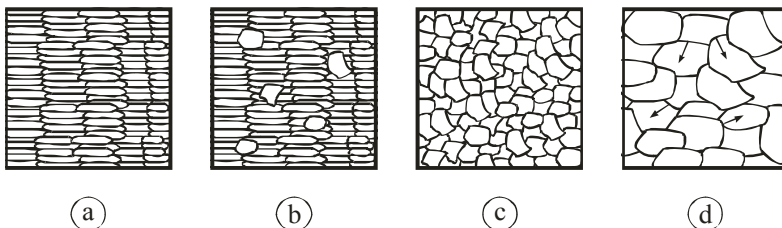
Kuumutamisel kuni rekristallisatsioonitemperatuurini kaovad kristallivõre defektid, kuid ei muutu deformeeritud metalli mikrostruktuur, s.o tera kuju ja mõõtmed – leiab aset pingetustumine (mikropingete kadumine).

Pingetustumisel väheneb defektide arv ning leiab aset nende ümberpaiknemine. Mõnel metallil, nt raual, põhjustab dislokatsioonide vastastikune toime dislokatsioonide ümberpaigutumist ja nende tiheduse vähenemist.

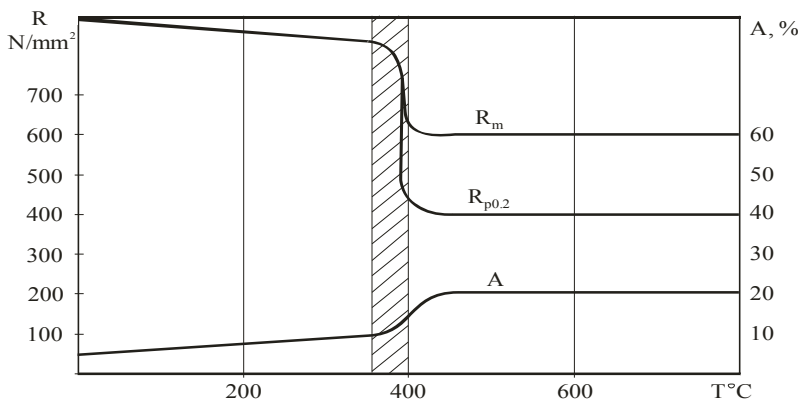
Kalestunud metalli kuumutamisel üle rekristallisatsioonitemperatuuri toimub rekristallisatsioon, mis leiab aset ainult siis, kui deformatsiooniaste ületab kindla suuruse. Väikestel deformatsiooniastmetel uute terade algeid kuumutamisel ei teki. Raua ja vase puhul on minimaalne deformatsiooniaste ligikaudu 5%. Rekristallisatsioonitemperatuuriks võetakse vähim kuumutustemperatuur, mille puhul tekivad plastse deformeerimisega moonutatud metalli struktuuris uued terad. Rekristallisatsioonitemperatuur T_{rekr} sõltub sulamistemperatuurist ($T_{\text{rekr}} = \alpha T_s$). Teguri α väärtus sõltub metalli puhtusest ja deformatsiooniastmest. Puhastel metallidel $\alpha = 0,3 \dots 0,4$, mis väheneb deformatsiooniastme kasvamisega, tardlahuse struktuuriga sulamisel $\alpha = 0,5 \dots 0,6$. Rekristalliseerumisel leiab aset kaks paralleelselt toimuvat protsessi: esimene on seotud uute kristallisatsioonikeskmete tekkega, teine nende kasvuga.

Alumiiniumi, vase ja raua rekristallisatsioonitemperatuurid on vastavalt 100, 270 ja 450 °C.

Kalestunud metalli struktuuri muutumise skeem kuumutamisel on joonisel 3.3. Kuumutamise ja sellest tuleneva rekristallisatsioon (rekristalliseeriva lõõmutamise) tulemusena vähenevad tugevusnäitajad, suurenevad aga plastsus- ja sitkusnäitajad (joonis 3.4).



Joonis 3.3. Mikrostruktuuri muutumise skeem kuumutamisel: a – deformeeritud metalli tekstuur; b – kristallisatsioonikeskmete teke ja kasv; c – rekristalliseerumine; d, e – tera kasv



Joonis 3.4. Madalsüsinikterase omaduste muutumine rekristalliseerival lõõmutamisel

Metallisulamid

Faasid ja mehaanilised segud metallisulameis

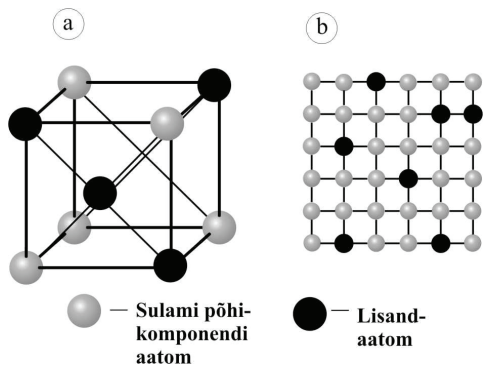
Sulam on aine, mis on saadud kahe või enama komponendi kokkusulatamise või -paagutamise teel. Sulamit, mille põhikomponent (>50%) on metall, nimetatakse metallisulamiks.

Metallisulami ehitus on puhta metalli ehitusest keerukam ja see sõltub sellest, kuidas toimivad omavahel sulami komponendid. Sulami komponendid võivad vastastikku lahustuda üksteises (joonis 3.5, joonis 3.6), moodustades **tardlahuseid**; reageerida omavahel, moodustades **keemilisi ühendeid**; või mitte lahustuda ega reageerida omavahel, koosnedes tardolekus üksikute komponentide/faaside **mehaanilisest segust**.

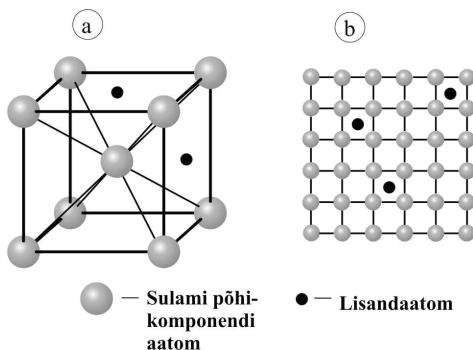
Tardlahused

Tardlahusteks nimetatakse sulaolekust moodustunud faase, kus üks komponentidest (lahustajakomponent) säilitab oma kristallivõre, teise (lahustunud) komponendi aatomid paigutuvad lahustajakomponendi kristallivõresse. Sõltuvalt lahustunud komponentide aatomite paigutusest lahustajakomponendi kristallivõres võivad tardlahused olla järgmised:

- 1) **Asendustardlahused** (lahustuva komponendi aatomid asendavad lahustajakomponendi aatomeid). Lahustuvus võib asendustardlahuste korral olla piiratud või piiramatut. Piiramatud (täielikud) tardlahused tekivad metallide korral, mille aatomiraadiused ei erine rohkem kui 15% ja mis omavad üht tüüpi kristallivõresid (on isomorfseid) ja ligilähedasi füüsikalisi-keemilisi omadusi (nt Ag-Au, Cu-Ni, Ti-Zr jt) (joonis 3.5 a, b).
- 2) **Sisendustardlahused** (lahustuva komponendi aatomid paigutuvad lahustajakomponendi kristallivõre tühimikesse). Sellist lahustuvust nimetatakse piiratud ehk mittetäielikuks. Sisendustardlahused tekiavad nii metalli ja mittemetalli (H, N, C, B jt) kui ka metallide vahel. Sisendustardlahused on alati piiratud lahustuvusega (nt Fe-N, Fe-C, Fe-Cr, Cu-Si jt) (joonis 3.6 a, b).



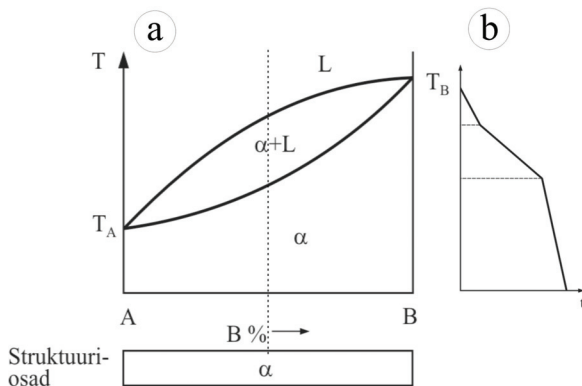
Joonis 3.5. Sulami kristallivõre asendustardlahuse korral: a – võreelement, b – kristallograafiatasand



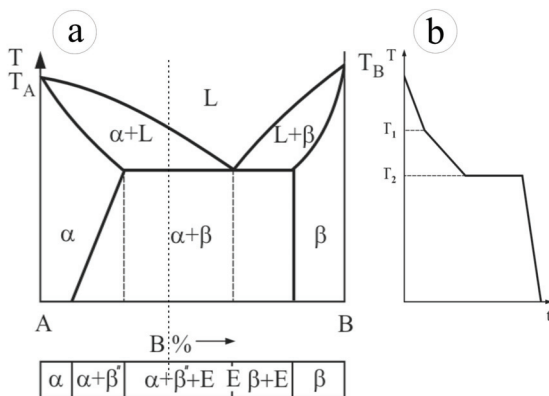
Joonis 3.6. Sulami kristallivõre sisendustardlahuse korral: a – võreelement, b – kristallograafiatasand

Kahe- või enamakomponentse sulamitesüsteemide faasilist koostist iseloomustab faasidiagramm. Üksiku komponendi või sulami kristallsatsiooni aga jahtumiskõver.

Joonisel 3.7 ja 3.8 on toodud faasidiagrammide kujud komponentide piiramatu ja piiratud lahustuvuse korral ja sulameile iseloomulikud jahtumiskõverad.



Joonis 3.7. Faasidiagramm komponentide piiramatu lahustuvuse korral (a) ja ühe sulami jahtumiskõver (b)



Joonis 3.8. Faasidiagramm komponentide piiratud lahustuvuse korral (a) ja ühe sulami jahtumiskõver (b)

Keemilised ühendid

Keemilist ühendit iseloomustab erinevalt tardlahusest komponentide kristallivõredest erinev kristallivõre, millele on omane komponentide aatomite korrapärane paigutus ja lihtne täisarvukordne aatomite arvude suhe.

Sõltuvalt kristallivõret kooshoidvatest sidemetest eristatakse kolme liiki keemilisi ühendeid:

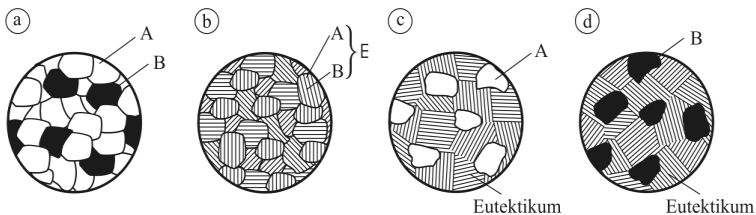
- 1) **elektrokeemilised ühendid**, mis moodustuvad metalli ja hapniku vahel;
- 2) **sisendusfaasid**, mis moodustuvad üleminekugrupi metallide (Fe, Mn, Cr, Mo, W jt) ning mittemetallide (C, N, B, H) vahel;
- 3) **elektronühendid**, mis moodustuvad ühevalentsete (Cu, Ag, Au jt) või üleminekugrupi metallide (Mn, Fe, Co jt) ja kahe- kuni viievalentsete metallide (Be, Mg, Zn, Cd, Al) vahel.

Keemilisi ühendeid moodustavatest komponentidest lähtudes eristatakse oksiide, karbiide, nitriide, boriide, intermetalliide.

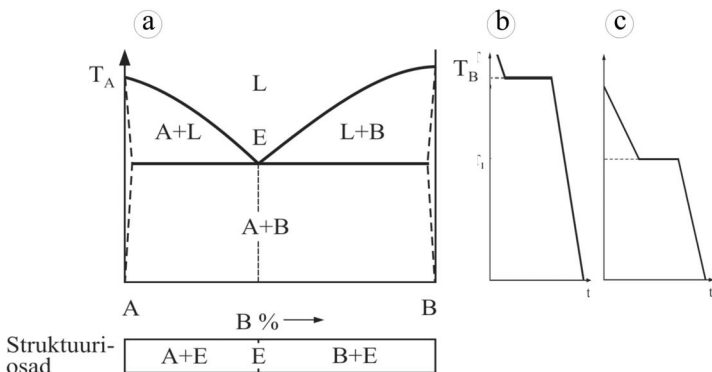
Mehaanilised segud

Mehaanilise segu korral koosneb sulam komponentide/faaside, nt A ja B, kristallidest (joonis 3.9 a), sagedamini aga kristallidest, mis koosnevad vaheldumisi paiknevatest komponentide A- ja B-kihtidest (joonis 3.9 b).

Mehaanilist segu, mis tekib vedelfaasist konstantsel temperatuuril kahe tardfaasi üheaegse väljakristalliseerumise tulemusena (joonis 3.10), nimetatakse **eutektikumiks**; segu, mis tekib tardfaasi konstantsel temperatuuril ümberkristalliseerumise/lagunemise tulemusena, nimetatakse **eutektoidiks**.



Joonis 3.9. Sulami struktuur mehaaniliste segude korral: a – kristallide segu, b – eutektne segu, c ja d – ala- ja üleutektne sulam; A ja B on sulami moodustavad komponendid



Joonis 3.10. Faasidiagramm komponentide mittelahustuvuse korral (a) ja jahutamiskõverate kuju puhta komponendi A (b) ja eutektsulami korral (c)

Sulamite struktuuri mõju sulamite omadustele

Sulamite füüsikalis-mehaanilised (kõvadus, tugevus, plastsus jt) ning tehnoloogilised omadused (valatavus, surve- ja lõiketöödeldavus) sõltuvad eelkõige nende struktuurist ja eelnevast töötlemisest.

Ühefaasilised struktuurid (puhtad metallid, tardlahuse struktuuriga sulamid) on väikese tugevusega ja kõvadusega ning suure plastisusega. Sellest tulenevalt on nad hästi survetöödeldavad. Samal ajal on tardlahuse struktuuriga sulamid kehvemate valuomadustega ja suurest sitkusest tingituna halvemini lõiketöödeldavad.

Kahefaasilise struktuuriga sulamid on halvemini survetöödeldavad. Parimate valuomadustega sulamid on eutektse või eutektkoostisele ligilähedase koostisega sulamid tänu madalamale sulamistemperatuurile ja heale vedeloolavusele (väikesele kristallisatsioonivahemikule). Keemilise ühendi olemasolu sulami struktuuris halvendab selle tööeldavust, eelkõige lõike- ja survetöödeldavust.

Töö käik

Töö läbitakse auditoorselt või e-õppes. Auditoorselt läbides kasutada metallimikroskoopi, mis annab vastava okulaari ja objektiivi valikuga mikroskoobi vajaliku suurenduse (piires 200...500 korda).

Enne töö alustamist tutvuda mikroskoobi ja mikrolihvide käsitlemise juhenditega (saab õppejõult). Kõik vaadeldavad mikrostruktuurid joonistada musta pliiatsiga ringi (läbimõõt 40...50 mm) lehe vasakule poolele, lehe paremal poolel esitada struktuuriosad ja vastused iga lihvi kohta käivatele küsimustele. Kindlasti tuleb lisada ka kasutatud suurendus.

E-õppes

Lihv nr 1 – puhas lõõmutatud vask vasesisaldusega 99,95%. Joonistage vase jahtumiskõver, pidades silmas, et Cu-sulami kristallsatsioonitemperatuur on *ca* 1083 °C.

Lihv nr 2 – puhas külmdeformeeritud Cu. Analüüsige vase tekstuuri (milline oli deformeerimise suund ja deformatsiooniaste?) ja võrrelge seda lihv nr 1 struktuuriga.

Lihv nr 3 – tardlahuse struktuuriga Cu-Ni-sulam (80% Cu, 20% Ni). Mis liiki lahustuvusega on Cu-Ni korral tegemist? Millised on eeldused seda liiki lahustuvuse tekkeks? Tooge sulami põhimõtteline jahtumiskõver. Millised on sulami füüsikalised-mehaanilised (kõvadus, tugevus, plastsus) ja tehnoloogilised omadused (valatavus, surve- ja lõiketöödeldavus)? Vask ja nikkel on head elektri- ja soojusjuhid. Millised on Cu-Ni-sulami elektri- ja soojusjuhtivus võrreldes Cu ja Ni omadega?

Lihv nr 4 – sulam, mille struktuuris esineb keemiline ühend. Pseudosulam – pulbermetallurgia meetodil valmistatud WC-Co kõvasulam (85% WC, 15% Co). Millise struktuuriga on tegemist: kas karkassstruktuuriga (karbiidkarkass on pidev) või maatriksstruktuuriga (metalne põhimass on pidev, milles paiknevad karbiidiosakesed)? Milline on antud sulami struktuuris keemilise ühendi protsentuaalne sisaldus? Milline on sulami lõiketöödeldavus? Kus kasutatakse sellist kõvasulamit?

Lihv nr 5 – eutektkoostisega Pb-Sb-sulam (87% Pb, 13% Sb). Kuidas nimetatakse faasimuutust, mille tulemusena antud struktuur tekib? Tooge sulami põhimõtteline jahtumiskõver ja faasimuutus sellel. Millised on vaadeldava sulami valuomadused (koos põhjendusega)?

Lihv nr 6 – eutektoidkoostisega Fe-C-sulam (teras süsinikusisaldusega 0,8%). Kirjeldage struktuuri. Kuidas nimetatakse faasimuutust, mille tulemusena see struktuur tekib? Kuidas nimetatakse eutektoidi Fe-C-sulameis ja milline on selle faasiline koostis?

Aruande sisu

1. Tiitelleht.
2. Töö eesmärk.
3. Vaadeldud metallide ja metallisulamite mikrostruktuuride joonised, millel on näidatud struktuuri osad.
4. Vastused töös toodud küsimustele.

Kontrollküsimused

1. Mis on kalestumine?
2. Mille poolest erineb külmdelormeeritud ja kuumdelormeeritud metalli struktuur?
3. Mis on sulam?
4. Missugune on puhta metalli ja eutektsulami jahtumiskõver?
5. Mis on tardlahus?
6. Mis on keemiline ühend?
7. Missugust struktuuri nimetatakse tekstuuriks?
8. Missuguse struktuuriga sulamid on hästi survetöödeldavad?
9. Missuguse struktuuriga sulamid on hästi valatavad?
10. Missuguse struktuuriga metallid ja sulamid on väikese tugevuse ning kõvadusega, kuid suure plastsusega?

TÖÖ NR 4 TERASTE JA MALMIDE MIKROSTRUKTUUR TASAKAALUOLEKUS

Sissejuhatus

Põhilisteks tehnomaterjalideks tänapäeval on rauasulamid – terased ja malmid, mille arvele langeb umbes 80% kasutatavatest metalsetest materjalidest. Ülevaate rauasüsinikusulamite struktuurist, muutustest rauasüsinikusulameis ja nendega seotud omadustest annab raudtsementiidi (Fe-Fe₃C) faasidiagramm.

Töö eesmärk

Tutvuda Fe-Fe₃C faasidiagrammi, rauasüsinikusulameis esinevate faaside ja mehaaniliste segude ning teraste ja malmide struktuuride ning nende margitähistussüsteemiga.

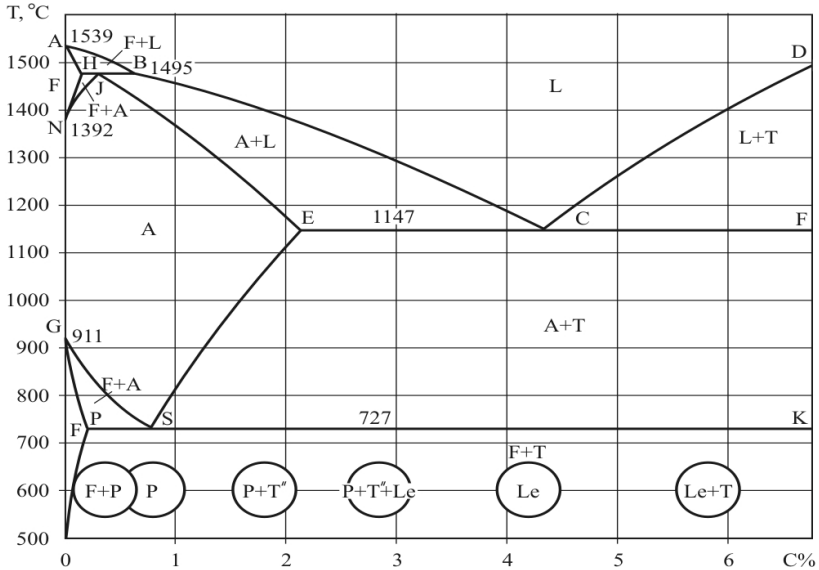
Töö selgitav osa

Sulam on tasakaaluolekus, kui kõik faasimuutused temas on toimunud täielikult faasidiagrammi kohaselt. Selline olek saavutatakse ainult väga aeglasel jahtumisel. Järelikult on rauasüsinikusulamite (teraste ja malmide) tasakaaluliste struktuuride leidmise aluseks Fe-Fe₃C faasidiagramm (joonis 4.1).

Terastes ja malmides esinevad järgmised faasid ja mehaanilised segud:

Faasid

- a) **Ferriit** (F) – süsiniku tardlahus α -rauas. Temperatuuril 727 °C lahustub α -rauas kuni 0,02% C (massiprotsentides), toatemperatuuril aga kuni 0,01%. Ferriidil on ruumkesendatud kuupvõre (K8), väike tugevus ja kõvadus, kuid suur plastsus. Ferriidi mehaanilised omadused on toodud tabelis 4.1.



Joonis 4.1. Rauda-süsiniku süsteemi faasidiagrammi vasakpoolne (Fe – Fe₃C poolne) osa

- b) **Austeniit** (A) on süsiniku tardlahus γ -rauas tahkkesendatud kuupvõreaga (K12). Süsiniku maksimaalne lahustuvus γ -rauas on 2,14% temperatuuril 1147 °C, temperatuuril 727 °C – 0,8%. Toatemperatuuril austeniiti süsinikterastes ei esine, sest ta laguneb 727 °C juures ferriidiks ja tsementiidiks ehk perliidiks.
- c) **Tsementiit** (T) on raua ja süsiniku keemiline ühend Fe₃C – raudkarbiid. Tema süsinikusisaldus on 6,67% ja ta on raudsüsinikusulamite struktuuriosadest kõige kõvem ja hapram (vt tabel 4.1).

Mehaanilised segud

- d) **Ledeburiit** (Le) on eutekne segu C-sisaldusega 4,3%, mis tekib vedelfaasi kristalliseerumisel temperatuuril 1147 °C:



Kuni temperatuurini 727 °C koosneb ledeburiit austeniidist ja tsementiidist, alla 727 °C ferriidist ja tsementiidist.

e) **Perliit** (P) on ferriidi ja tsementiidi eutektoidne segu süsinikusisaldusega 0,8%; esineb neis rauasüsinikusulamites, milles C > 0,02% ja ta tekib austeniidi (süsinikusisaldusega 0,8%) lagunemisel temperatuuril 727 °C:



Tabel 4.1

Rauasüsinikusulamite struktuuriosade mehaanilised omadused

Struktuuriosa	R_m N/mm ²	$R_{p0,2}$ N/mm ²	A %	Z %	HV
Ferriit	180...250	100...140	40...50	70...80	70...200
Tsementiit	30...35	–	0	0	840...1100
Perliit	860...900	–	9...12	10...15	250...320
Ledeburiit	–	–	0	0	900...1000

Terased

Teras on paljukomponentne sulam, mis peale süsiniku sisaldab ka tavalisandeid (mittelegeer- ehk süsinikterased) ja legeerivaid elemente (legeerterased). Teras C-sisaldus avaldab otsest mõju selle omadustele (joonis 4.2).

Teraste C-sisalduse suurenedes kasvavad nende kõvadus- (Brinelli kõvadus HB) ja tugevusnäitajad (tõmbetugevus R_m ja voolavuspiir $R_{p0,2}$), vähenevad aga plastsus- (katkevenivus A ja katkeahenemine Z) ning sitkusnäitajad (purustustöö KU, KV). Kõik terased süsinikusisaldusega kuni 0,8% koosnevad ferriidist (hele) ja perliidist, mis väikestel suurendustel paistab ühtlaselt tumedana, suurteil suurendustel on näha selle kihiline ehitus (joonis 4.3), ning neid nimetatakse **alaeutektoidseteks**. Süsinikusisalduse suurenemisega väheneb neis ferriidi kogus ja suureneb proportsionaalselt perliidi kogus.

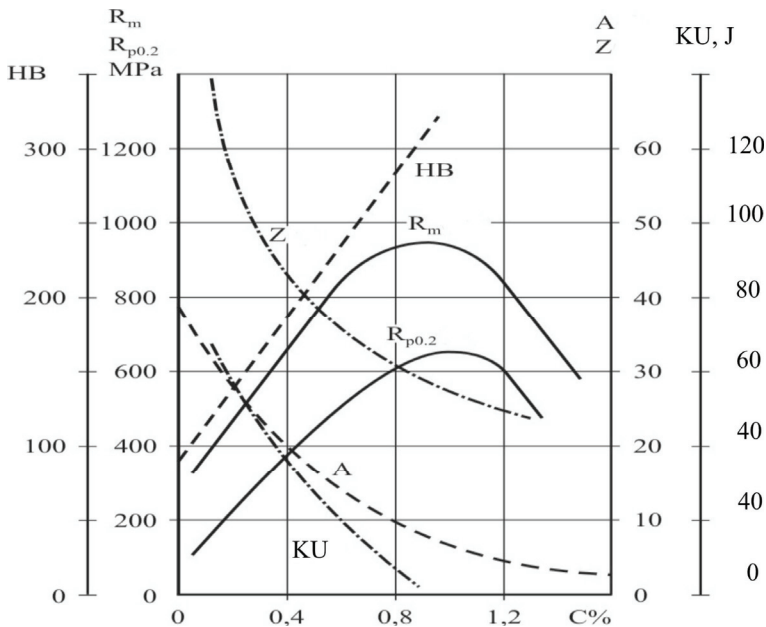
Hinnates ferriidi ja perliidi pinnalist suhet, saab ligikaudu määrata alaeutektoidterase süsinikusisalduse.

Selleks lähtume eeldusest, et sulami keemilise koostise määramiseks peame teadma tema struktuuriosade massisuhet. Mikroskoobi all on võimalik hinnata nende pinnalist suhet.

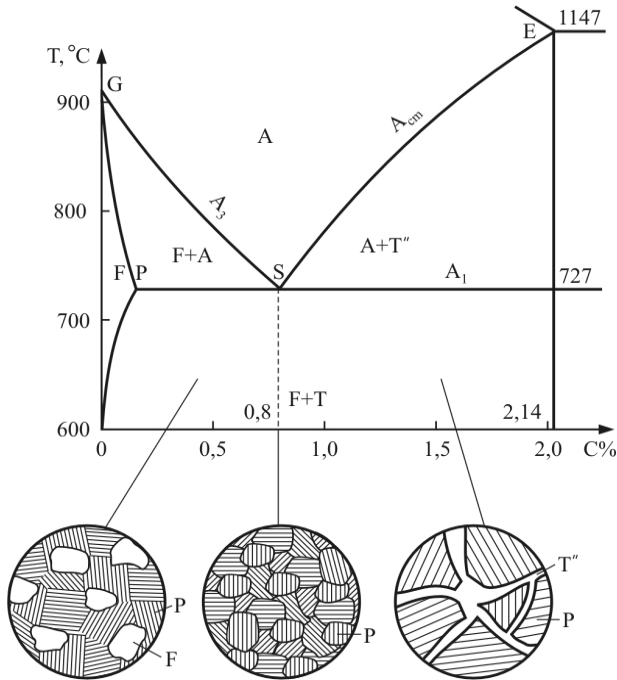
Silmaga määratakse ligilähedaselt perliidi (P) ja ferriidi pinnaline suhe protsentides ning see suhe loetakse kehtivaks ka mahu ja massi suhtena, eeldades, et nende tihedused on võrdsed. Lähtudes sellest, et praktiliselt on kogu süsinik alaeutektoidises terases perliidis (nimelt 0,8%), on lihtne arvutada terase süsinikusisaldust valemiga

$$C\% = \frac{P}{100} \cdot 0,8. \quad (4.3)$$

Teras, mis sisaldab 0,8% C, on **eutektoidne** ja tema struktuur koosneb ainult perliidist. Perliit on tavaliselt kihiline (ferriidi ja tsementiidi kihid vaheldumisi), kuid kihilisus ei ole mikroskoobi all väiksel suurendusel märgatav, kui perliit on väga peene struktuuriga. Sel juhul paistab ta ühtlase tumeda struktuuriosana.



Joonis 4.2. Süsiniku mõju terase mehaanilistele omadustele



Joonis 4.3. Fe-Fe₃C faasidiagrammi teraste osa (alumine vasak nurk) ja teraste struktuuriskeemid

Terased süsinikusaldusega üle 0,8% on **üleutektoidsed** ja nende struktuur koosneb perliidist (tume) ja sekundaarsest tsementiidist (hele) (joonis 4.3).

Sekundaarset tsementiiti leidub üleutektoidses terases tavaliselt heleda võrguna või terakeste ahelana perliiditerade vahel või nõeltena nende sees.

Eeldades perliidi (P) ja tsementiidi (T'') tiheduse võrdsust, saab nende pinnalise protsentuaalse suhte järgi siingi arvutada terase süsinikusalduse valemiga

$$C\% = \frac{P \cdot 0,8}{100} + \frac{T'' \cdot 6,67}{100}. \quad (4.4)$$

Kuna sekundaarset tsementiiti on üleutektoidse terase struktuuris väga vähe, on tema pinnalise koguse hindamine silma järgi seetõttu raske. Sellest tingituna kasutatakse eespool kirjeldatud meetodit alautektoidse terase süsinikusalduse leidmiseks, üleutektoidsete teraste puhul aga harva.

Olles määranud mikrostruktuuri järgi terase süsinikusalduse, on võimalik kindlaks teha ka terase marki, sest süsinikterased markeeritakse reeglina süsinikusalduse järgi. Näiteks kui terases on 0,3% süsinikku, siis on terase mark "C30", kus arv näitab süsinikusaldust sajandikes protsentides. Tabelis 4.2 on toodud osa süsinikkonstruktsiooniteraste margid ja mehaanilised omadused. Mõningate süsiniktööriistateraste margid ja keemiline koostis on esitatud tabelis 4.3.

Tabel 4.2

Mõningate kvaliteetsüsinikkonstruktsiooniteraste margid, koostis ja omadused

Terase mark	C-sisaldus %	Tõmbe-tugevus R_m N/mm ²	Voolavus-piir $R_{p0,2}$ N/mm ²	Katkeve-nivus A %	Katkeah-nemine Z %
EN 10084 Tsementiitidavad terased, tsementiiditult ja karastatult					
C10E	0,07...0,13	490...780	295...390	13...16	40...50
C15E	0,12...0,18	590...880	355...440	12...14	35...45
EN 10083 Parendatavad terased, karastatult ja kõrgnoolutatud					
C22E	0,17...0,24	470...650	290...340	20...22	50
C25E	0,22...0,29	500...700	320...370	19...21	45...50
C30E	0,27...0,34	500...750	300...400	18...21	40...50
C35E	0,32...0,39	550...780	320...430	17...20	40...50
C40E	0,37...0,44	600...800	350...460	16...19	35...45
C45E	0,42...0,50	630...850	370...490	14...17	35...45
C50E	0,47...0,55	650...900	400...520	13...16	30...40
C55E	0,52...0,60	700...950	420...550	12...15	30...40
C60E	0,57...0,65	750...1000	450...580	11...14	25...35

Tabel 4.3

Mõningate süsiniktööriistateraste margid ja süsinikusisaldus

Terase mark	Süsinikusisaldus %	HRC*
C70	0,64...0,72	57
C80	0,72...0,82	58
C90	0,84...0,92	60
C105	1,00...1,20	61
C110	1,00...1,20	65
C125	1,20...1,35	65

* Termotöötlus: poolkarastus + madalnoolutus

Malmid

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

1) Malmid, kus kogu süsinik on seotud olekus – tsementiidis (Fe_3C).

Need on seotud süsinikuga malmid ehk **valgemalmid** (nimetus tuleneb murdepinna tuhmvalgest värvusest).

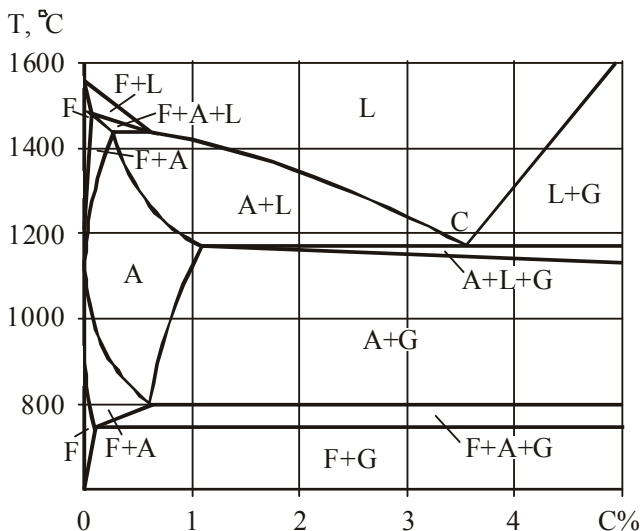
Nende malmide faasiline koostis peale kristalliseerumist määratakse ebastabiilse Fe- Fe_3C faasidiagrammi järgi (selline malm kirstalliseerub lisandite (räni) puudumisel ning kiirel jahtumisel).

2) Malmid, kus kogu süsinik või suurem osa sellest on vabas olekus – grafiidina. Need malmid on tuntud **grafiitmalmidena**.

Lisaks faasimuutustele avaldavad lisandid malmides mõju ka eutektpunktile C vastavale C-sisaldusele C_E . See nn C-ekvivalent on sõltuvuses nii Si- kui ka P-sisaldusest malmis järgnevalt:

$$C_E = \left(4,3 - \frac{\text{Si} + \text{P}}{3}\right)\% \quad (4.5)$$

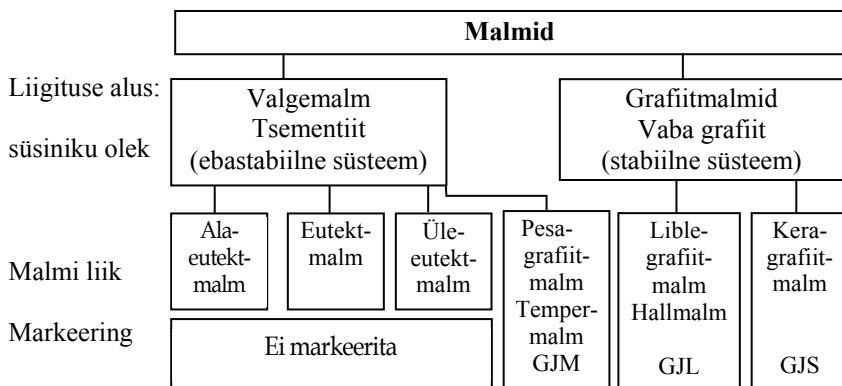
Ainult vabas olekus oleva süsinikuga malmide faasiline koostis määratakse Fe-C faasidiagrammi järgi (räni olemasolul ja aeglasel jahtumisel kristalliseerub grafiit vahetult vedelfaasist).



Joonis 4.4. Fe-C faasidiagramm 2% Si-sisaldusel

Suure süsinikusisalduse tõttu on malmi struktuuris kõva ja habras eutektikum – ledeburiit (valgemalmis) või süsinik grafiidina (libleja, keraja või pesajana). Nii ledeburiit kui ka grafiit teevad malmi hapraks ja seepärast ei saa ühtki malmiliiki survega töödelda – sepistada, valtsida jne. Seetõttu kasutatakse malmi valusulamina mitmesuguste detailide valmistamiseks. Kõige rohkem kasutatakse selleks otstarbeks alaeutektse koostisega hallmalmi. Sellisel malmil on suure süsinikusisalduse tõttu terasega võrreldes madalam sulamistemperatuur ja väiksem kristallisatsiooniintervall (seda väiksem, mida lähem on malmi koostis eutektsele), mis soodustavad valuomadusi: malmil on hea vedelvoolavus, väike kontsentreeritud kahanemistühik ja külgepõlemine.

Lähtudes süsiniku olekust ja grafiitmalmide grafiidiosakeste kujust, liigitatakse malmid järgnevalt:



Kasutatavamate malmiliikide (lible- ja keragrafiitmalmid ning tempermalm) struktuuris on grafiit. Grafiidi tekkimist soodustavad malmi aeglane jahtumine (valamine liivsavivormi) ja malmi suur ränisisaldus. Mida rohkem on malmis süsinikku ja räni, seda rohkem tekib ka struktuuri grafiiti. Nii malmvalandi jahtumiskiiruse suurenemine kui ka mangaan malmis takistab grafiidi eraldumist ja soodustab tsementiidi (Fe_3C) tekkimist.

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

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

Jahtumisel temperatuuril 727 °C laguneb malmi struktuuris olev austeniit. Kuna selles temperatuuripiirkonnas on süsinikuaatomite di-

fusioonikiirus küllaltki väike, siis austeniidi lagunemine kulgeb eba-stabiilse Fe-Fe₃C faasidiagrammi kohaselt ja tekib ferriidi-tsementiidi segu – perliit. Kui aga malmis on palju räni, võib tsementiit valandi edasisel aeglasel jahtumisel täielikult või osaliselt laguneda. Malmi metalne põhimass koosneb sel juhul vastavalt kas ferriidist või ferriidist ja perliidist.

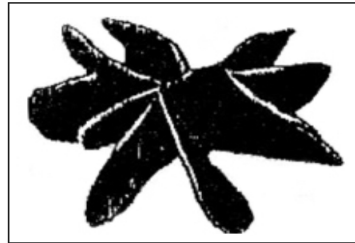
Malmi mehaanilised omadused olenevad suurel määral grafiidi-osakeste kujust ja mõõtmetest – mida väiksemad nad on, seda paremad on mehaanilised omadused.

Tavaliselt on kristalliseerumisel tekkinud grafiit liblejas – tekib **hallmalm** (nimetus tuleneb murdepinna hallist värvusest), mille grafiidiosakeste kaju vaadelduna mikroskoobi all on toodud joonisel 4.5. Liblejas grafiit vähendab malmi tõmbetugevust ning eriti plastsust (katkevenivus A ei ületa 0,5%, sõltumata metalise põhimassi struktuurist). See-eest sõltuvad survetugevus ja kõvadus peamiselt metalise põhimassi struktuurist.

(a)



(b)



Joonis 4.5. Liblegrafiitmalmi struktuur: a – mikrostruktuur, b – grafiidi-osakeste kaju

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

Hallmalmi metalise põhimassi struktuur võib olla ferriit, ferriit + perliit või perliit. Vastavalt sellele nimetatakse malmi ferriit-, ferriit-perliit- või perliithallmalmiks.

Suurima tugevusega on perliithallmalm (nimetatakse ka kvaliteetmalmiks). Tabelis 4.4 on toodud liblegrafiitmalmide (hallmalmide) margid ja omadused.

Tabel 4.4

Liblegrafiitmalmide (hallmalmide) tõmbetugevus ja kõvadus (EN1561)

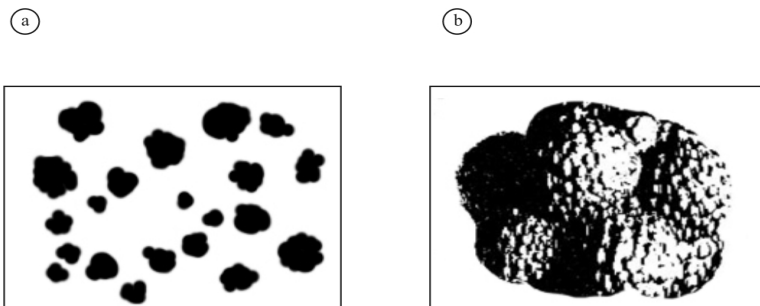
Malmi mark	R_m N/mm ²	Malmi mark	HB
GJL-100	100...200	GJL-HB155	155...210
GJL-150	150...250	GJL-HB175	175...260
GJL-200	200...300	GJL-HB195	195...275
GJL-250	250...350	GJL-HB215	215...275
GJL-300	300...400	GJL-HB235	235...275
GJL-350	350...450	GJL-HB255	255...275

Arv margitähises näitab minimaalset tõmbetugevust N/mm² eraldi valatud katsekehadel määratuna või Brinelli kõvadust seinapaksusest sõltuvalt.

Keragrafiitmalmid saadakse sulamalmi modifitseerimisel magneesiumi või tseeriumiga, mida lisatakse 0,1...0,2 massiprotsenti.

Magneesium ja tseerium mõjutavad grafiidi kristalliseerumise ise-loomu, mis on tingitud sellest, et need elemendid absorbeeruvad tekkinud grafiidiosakeste pinnale ja sellega takistavad osakeste kasvamist eelistatud suunas ning soodustavad peaaegu kerakujuliste grafiidiosakeste tekkimist. Joonisel 4.6 on näha grafiidiosakeste tüüpiline kuju keragrafiitmalmis. Metalse põhimassi struktuur võib olla keragrafiitmalmil analoogselt liblegrafiitmalmiga kas ferriit, ferriit + perliit või perliit. Kerajas grafiit nõrgestab metalset põhimassi tunduvalt vähem kui pesaline või libeline ja seetõttu on keragrafiitmalmid heade mehaaniliste omadustega.

Keragrafiitmalmide plastsus (katkevenivus A on 15...20% ferriitsetel, 2...3% perliitsetel malmidel) on tunduvalt suurem võrreldes liblegrafiitmalmiga. Tabelis 4.5 on toodud keragrafiitmalmide margid ja omadused.



Joonis 4.6. Keragrafiitmalmi struktuur: a – mikrostruktuur, b – grafiidi-osakeste kuju

Tabel 4.5

Mõningate keragrafiitmalvide mehaanilised omadused (EN1563)

Malmi mark	R_m N/mm ²	$R_{p0,2}$ N/mm ²	A %	HB
GJS-350-22	350	220	22	140...170
GJS-400-18	400	240	18	140...220
GJS-500-7	500	320	7	153...245
GJS-600-3	600	370	3	192...277
GJS-700-2	700	420	2	228...302
GJS-800-2	800	480	2	248...351
GJS-900-2	900	600	2	270...360

Esimene arv margitähises näitab tõmbetugevust N/mm², teine katkevenivust %.

Kui malmis on grafitiseerivaid lisandeid (nt Si) vähe või on jahtumiskiirus suur, siis kulgeb kristalliseerumine ebastabiilse Fe-Fe₃C faasidiagrammi järgi ja grafiiti ei eraldu üldse. Niisugust malmi nimetatakse tema heleda murdepinna pärast **valgemalmiks**. Valgemalmi struktuuris (eelkõige pinnakihis) on palju tsementiiti (peamiselt ledeburiidis) ja seetõttu on valgemalmist valandid suure kõvaduse tõttu raskesti lõiketöödeldavad. Valgemalmi struktuuriga valandeid kasutatakse tehnikas väga vähe (nt valtsirullid). Malmist valmistatud detailide puhul, mille mõned kohad peavad olema kulumiskindlad (kõvad), võidakse valamisel jahutada metallvormi neid kohti nii, et seal tekiks kiire jahtumise tulemusena valandi pinnakihis valgemalmi

struktuur. Sellist malmi nimetatakse **valgendatud malmiks**. Näiteks automootori nukkvõlli nukid võivad olla valgendatud malmist.

Struktuurilt (faasidiagrammi järgi) jagunevad valgemalmid kolme rühma:

- 1) eutektsed – struktuuris Le,
- 2) alaeutektsed – struktuuris Le, P ja T'' ,
- 3) üleutektsed – struktuuris Le ja T.

Valgemalmide struktuuri kujunemine on täielikult jälgitav Fe-Fe₃C faasidiagrammil. Valgemalmi süsinikusisaldusega 2,2...3,0% ja räni- sisaldusega 0,7...1,5% kasutatakse **tempermalmist** valandite tootmiseks. Vastav tehnoloogiline protsess seisneb selles, et valgemalmi struktuuriga valandeid lõõmutatakse pikka aega temperatuuridel 950...1050 °C. Nendel temperatuuridel koosneb malmi struktuur austeniidist ja tsementiidist, kusjuures viimane laguneb järgneva reaktsiooni alusel:



(a)



(b)



Joonis 4.7. Tempermalmi struktuur: a – mikrostruktuur, b – grafiidiosakeste kuju

Kuna siin on iseärasuseks grafiidi tekkimine tardolekus, siis on tal ka iseloomulik kuju – pesaline (vt joonis 4.7). Sellist pesagrafiiti nimetatakse ka lõõmutussüsinikuks ja ta on tempermalmi struktuuri iseloomulikumaks tunnuseks.

Temperalmi lõplik struktuur kujuneb aga välja tema jahutamisel pärast kõrgetemperatuurilist lõõmutamist. Temperatuuri langemisel kuni 727 °C-ni eraldub austeniidist veelgi grafiiti, mis liitub varem tekkinud lõõmutussüsiniku pesadega.

Nagu teada, laguneb austeniit jahtumisel 727 °C juures perliidiks (vt Fe-Fe₃C faasidiagrammi) ja temperalmi metalse põhimassi struktuuri kujunemisel on jahtumiskiirusel selles temperatuuripiirkonnas oluline tähtsus. Kiirel jahtumisel muutub austeniit perliidiks ja see säilib. Lõplik struktuur koosneb endastmõistetavalt perliidist ning grafiidipesadest ja niisugust malmi nimetatakse perliittemperalmiks. Kui aga jahutada malmi aeglaselt temperatuuripiirkonnas 740...710 °C või hoida temperatuuril 700...710 °C, siis laguneb tekkinud perliidi koostises olev tsementiit. Vastavalt sellele tekib ferriitstruktuuriga metalne põhimass ja saadud malmi nimetatakse ferriittemperalmiks. Toodetakse ja kasutatakse nii perliit- kui ka ferriittemperalmi.

Lõõmutuskeskkonnast tulenevalt eristatakse musti ja valgeid temperalmi: esimesed saadakse süsinikku mitteärastava lõõmutamise teel ja nad on tumeda murdepinnaga; teised on saadud süsinikku ärastava lõõmutamise teel ja nad on heleda murdepinnaga.

Temperalmi tugevusomadused on võrreldavad keragrafiitmalmi omadustega. Nii temperalmil kui ka keragrafiitmalmil on teatav sitkus (vastupanu löökkoormustele), mistõttu neid kasutatakse selliste valandite valmistamiseks, mis töötavad märkimisväärsel dünaamilistel koormustel. Tänapäeval kasutatakse temperalmide asemel üha enam sulametalli otsemodifitseerimise teel saadud keragrafiitmalme.

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

Tabelis 4.6 on toodud temperalmide margid ja mehaanilised omadused.

Temperalmidel on head mehaanilised omadused, kuid vajadus valandeid pikka aega lõõmutada (30...40 tundi ja isegi rohkem) teeb tehnoloogilise protsessi keerukaks ja malmi kalliks – see on temper-

malmide suurim puudus. Tavaliselt valmistatakse tempermalmist väikseid valandeid seinapaksusega 30...40 mm.

Tabel 4.6

Mõningate tempermalmide mehaanilised omadused

Malmi mark	R _m N/mm ²	R _{p0,2} N/mm ²	A %	HB
Mustad tempermalmid				
GJMB-300-6	300	–	6	150
GJMB-350-10	350	200	10	150
GJMB-450-6	450	270	6	200
GJMB-550-4	550	340	4	230
GJMB-700-2	700	530	2	290
GJMB-800-1	800	600	1	330
Valged tempermalmid				
GJMW-350-4	350	–	4	230
GJMW-400-5	400	200...230	5	200
GJMW-450-7	450	230...280	7	220
GJMW-550-4	550	310...350	4	250

Esimene arv margitähises näitab malmi tõmbetugevust N/mm², teine katkevenivust %.

Töö käik

Töös kasutada metallimikroskoopi ja suurendusi piires 200...500 korda.

Enne töö alustamist tutvuda mikroskoobi ja mikrolihvide käsitlemise juhenditega (saab õppejõult).

Kõik vaadeldavad mikrostruktuurid joonistada musta pliiatsiga ringi (läbimõõt 40...50 mm) sisse ja märkida struktuuriosad.

Teraste mikrostruktuurid

Lihv nr 1 – puhas raud (umbes 99,85% Fe). Pöörake tähelepanu struktuuri ühtlusele. Mõned kristallid on küll tumedamad, kuid seda mitte keemilise koostise erinevuse (siis oleks tegemist teise faasiga),

vaid kristallide omaduste anisotroopsuse tõttu, seepärast peegeldavad erinevad kristallograafiatasandid valguskiiri erinevalt.

Lihv nr 2 – väikse süsinikusisaldusega teras. Tehke kindlaks struktuuriosad ja hinnake nende pinnaline suhe. Arvutage perliidi koguse järgi terase ligikaudne süsinikusisaldus ning määrake sellest lähtudes tabeli 4.2 põhjal terase mark ja mehaanilised omadused.

Lihv nr 3 – eelmisest mõnevõrra suurema süsinikusisaldusega (0,35%) teras. Määrake struktuuriosad, terase mark ja mehaanilised omadused. Arvutage perliidi hulga järgi struktuuris terase süsinikusisaldus ja võrreldes seda tegelikuga, määrake absoluutne ja suhteline viga, mis tekib süsinikusisalduse leidmisel struktuuri järgi.

Lihv nr 4 – määrake terase struktuur ja süsinikusisaldus. Milline on terase mark ja omadused?

Lihv nr 5 – üleeutektoidteras süsinikusisaldusega 1,1%. Määrake struktuuriosad, terase mark ja keemiline koostis. Arvutage valemi 4.4 abil terase süsinikusisaldus struktuuriosade järgi, võrrelge seda tegelikuga, määrake vea suurus ja otsustage, kas üleeutektoidse terase puhul on see meetod usaldusväärne.

Malmide mikrostruktuurid

Selles töö osas uuritakse kuue malmi mikrostruktuure.

Olles enne laboratoorse töö selle osa tegemist tutvunud valgemalmide struktuuri kujunemisega, arvestage, kuidas näeb välja perliit, ledeburiit ja tsementiit valgemalmide mikrostruktuuris. Grafiitmalmides, kus kogu süsinik või suurem osa sellest on vabas olekus – grafiidina, määrata grafiidi kuju järgi malmi liik ja täpsustada seda veel metalse põhimassi mikrostruktuuri järgi.

Esimene mikrolihv on söövitamata, mistõttu näeme mikrolihvil metallis olevaid mittemetalseid lisandeid (grafiit, räbupesad), mikropragused, defekte (poore), kuid ei näe metalse põhimassi mikrostruktuuri. Kui mikrolihv 5 ja 6 oleks söövitamata, näeksime ainult puhast valget pinda (antud lihvid on söövitatud).

Joonestada struktuur selle iseloomulike tunnuste järgi ja määrata kindlaks malmi liik ning struktuuriosad. Alles pärast seda võib asuda

järgmise mikrolihvi vaatlemisele ja struktuuri analüüsimisele. Alaeutektsest valgemalmist lihvi vaatlemisel määrata ka selle malmi süsinikusisaldus, hinnates silma järgi ledeburiidi (eutektikumi) protsentuaalselt pinnalist suhet (E) malmi struktuuris. Teades ledeburiidi süsinikusisaldust (4,3%), saab arvutada alaeutektse valgemalmi üldise süsinikusisalduse järgmise valemiga, eeldades, et erinevate faaside tihedused on võrdsed:

$$C\% = 2,14 + \frac{E}{100} \cdot 2,16. \quad (4.7)$$

Aruande sisu

1. Tiitelleht.
2. Töö eesmärk.
3. Fe-Fe₃C faasidiagramm, millel näidata uuritud teraste ja valgemalmide korral ka nende asukohad.
4. Rauasüsinikusulamites esinevate faaside ja mehaaniliste segude iseloomustus (lühidalt).
5. Vaadeldud teraste mikrostruktuuri pildid, millel on näidatud struktuuriosad, samuti nõutud arvutused süsinikusisalduse ja seejuures tekkiva vea kohta, terase margid ning mehaanilised omadused.
6. Vaadeldud malmide mikrostruktuuri pildid koos malmiliigi ja struktuuriosade näitamisega, samuti vajadusel süsinikusisalduse arvutus. Lühike kirjeldus iga malmiliigi saamisviisi, iseloomulike omaduste ja kasutusvalade kohta.

Kontrollküsimused

1. Lähtudes Fe-Fe₃C faasidiagrammist, teha kindlaks, millest koosneb 0,5%-lise C-sisaldusega terase struktuur ja mis temperatuuril tekivad vastavad struktuuriosad.
2. Lähtudes Fe-Fe₃C faasidiagrammist, määrake 2%-lise C-sisaldusega terase jahtumiskõvera kriitiliste temperatuuride arv.

3. Kui palju on orienteeruvalt süsinikku terases struktuuriga 25% P + 75% F?
4. Arvutage terase 50% P + 50% F süsinikusisaldus.
5. Määrake terase 1% C struktuuris oleva tsementiidi tekkimise orienteeruv temperatuur. Millisest faasist ta tekib (vt Fe-Fe₃C faasidiagrammi)?
6. Kui palju süsinikku võib maksimaalselt lahustuda austeniidis temperatuuril 800 °C (vt Fe-Fe₃C faasidiagrammi)?
7. Mis faasist tekib perliit alaeutektoidterases C-sisaldusega 0,5%?
8. Millised on üleutektoidterase struktuuriosad?
9. Kuidas muutub terase struktuuris tsementiidi hulk süsinikusisalduse muutudes 1%-lt 2%-le?
10. Teras sisaldab 0,4% C. Milline on perliidi suhteline kogus (%) selle terase struktuuris?
11. Millised faasid kuuluvad valgemalmi struktuuri?
12. Millised on hallmalmi struktuuriosad?
13. Mille järgi otsustatakse, kas tegemist on hall-, temper- või keragrafiitmalmiga?
14. Millise sulamiga on tegemist, kui struktuuris esineb grafiit pesadena?
15. Millised on perliitkeragrafiitmalmi struktuuriosad ja palju on selles seotud süsinikku?
16. Millised on alaeutektse valgemalmi struktuuriosad?
17. Millest koosneb üleutektne valgemalm?
18. Kuidas saadakse valgemalmi?
19. Kuidas saadakse tempermalmi?
20. Kuidas saadakse keragrafiitmalmi?

TÖÖ NR 5 TERASE TERMOTÖÖTLUS

Töö eesmärk

Tutvuda terase termotöötlemise tehnoloogiaga, selgitada välja terase süsinikusisalduse, jahutuskiiiruse ja karastamisele järgneva noolustus-temperatuuri mõju terase kõvadusele. Antud töös keskendutakse süsinikteraste termotöötlusele.

Töö selgitav osa

Termotöötluks nimetatakse terase kontrollitud kuumutamist ja jahutamist omandamiseks konkreetsetesse töötingimustesse sobivat struktuuri ja omadusi. Terase termotöötlus on laialt levinud meetod tema omaduste muutmiseks nii materjalil kui ka lõpptoodetel. Termotöötlus võimaldab ühe ja sama keemilise koostise korral saada terve rea erinevaid võimalikke mehaanilisi omadusi.

Lähtudes faasipiiridele A_1 ja A_3 (joonis 5.1) vastavatest temperatuuridest (joonte asendi tähistus kuumutamisel vastavalt A_{c1} või A_{c3}) ja jahutuskiiirusest, on terase termotöötluks põhimoodusteks

1. **lõõmutamine** – kuumutamine üle faasipiiri A_{c1} või A_{c3} (A_{cm}) (vastavalt poollõõmutus või täislõõmutus), aeglane jahutamine;
2. **normaliseerimine** – kuumutamine üle faasipiiri A_{c3} (A_{cm}) või nende lähedastel temperatuuridel, jahutus õhus;
3. **karastamine** – kuumutamine üle faasipiiri A_{c1} või A_{c3} (A_{cm}) (vastavalt poolkarastus ja täiskarastus), kiire jahutamine (soolalahuses, vees, õlis);
4. **noolutamine** – karastamisele järgnev kuumutus allpool faasipiiri A_{c1} ; temperatuuri valimisel lähtutakse soovitud kõvadusest/sitkusest.

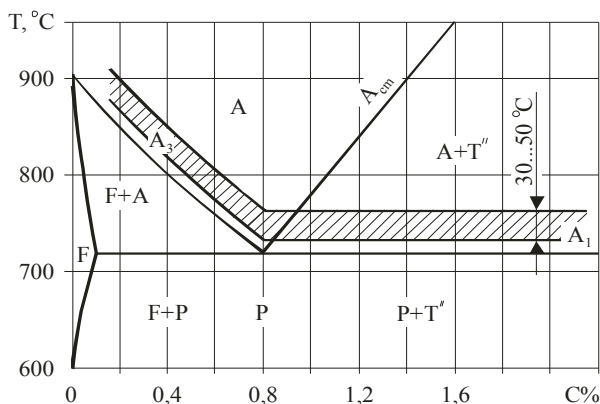
Terase kõvadus tasakaaluolekus (lõõmutatud või normaliseeritud olekus) sõltub otseselt terase süsinikusisaldusest, kuid ei ületa 330...350 HB.

Terase tugevuse ja kõvaduse (konstruktsiooniterased) või kõvaduse ja kulumiskindluse (tööriistaterased) tõstmise üheks viisiks on terase karastamine. Karastamiseks nimetatakse termotöötlusviisi, mille tulemusena saadakse ebastabiilne (mittetasakaaluline) struktuur. Enamasti soovitakse karastamise lõpptulemusena saada **martensiit**struktuuri (martensiidist on põhjalikumalt kirjutatud töö lõpuosas). Kriitilisest jahtumiskiirusest v_{kr} (joonis 5.3) veidi väiksema jahtumiskiiruse korral saadakse karastamisel beiniit, mis on väga peen ferriidi-tsementiidi segu ja ei nõua järgnevat noolust.

Karastamise tehnoloogiline protsess koosneb järgmistest etappidest:

- 1) austenisatsioon – terase kuumutamine üle faasimuutuse temperatuuri (üle A_{c1} või A_{c3});
- 2) seisutamine sellel temperatuuril, et tagada kogu detailis antud temperatuurile vastava struktuuri tekkimine;
- 3) jahutamine kiirusega, mis on karastatava terase kriitilisest jahtumiskiirusest (v_{kr} ; vaata joonis 5.3) suurem, et vältida austeeniidi lagunemisproduktide (F ja T) tekkimist.

Joonisel 5.1 on toodud süsinikteraste optimaalsed karastustemperatuurid (viirutatud ala), mis valitakse alaeutektoidteraste puhul $30...50\text{ }^{\circ}\text{C}$ üle A_{c3} (täiskarastus) ja üleutektoidteraste puhul $30...50\text{ }^{\circ}\text{C}$ üle A_{c1} (poolkarastus).



Joonis 5.1. Kuumutuspiirkonnad terase karastamisel

Terase austenisatsioonil muutub perliit austeniidiks. Liiga kõrge karastustemperatuur ja pikaajaline seisutamine sellel põhjustavad austeniidi terakasvu ja pinnakihist süsiniku välja põlemist. Jämedateraline austeniit annab karastamisel jämedastruktuurse martensiidi, mis on peenestruktuursest martensiidist hapram. Kuumutuskestus oleneb mitmest mõjurist ja üldised juhised süsinikteraste puhul saab tabelist 5.1.

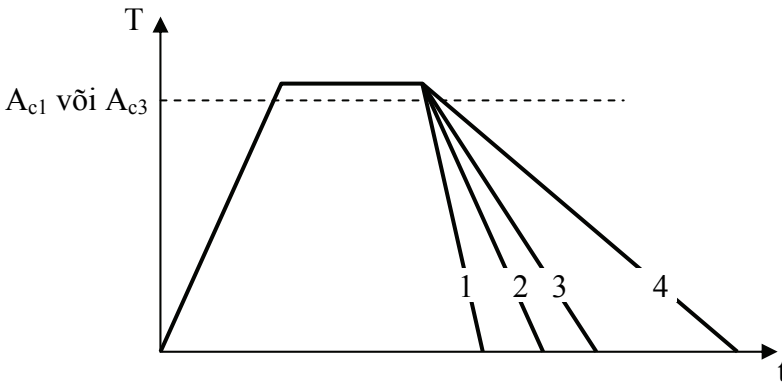
Tabel 5.1

Kuumutuskestus süsinikteraste karastamisel

Kuumutusviis	Temperatuur °C	Kestus minutites ristlõike mõõtmete (läbimõõt, paksus) iga mm kohta		
		ring	ruut	ristkülik
Elektriahjus	600	1,5	2,2	3
	800	1,0	1,5	2
	900	0,8	1,2	1,6
	1000	0,4	0,6	0,8
Soolavannis	800	0,25	0,37	0,5
Pliivannis	800	0,1	0,15	0,2

Jahutus valitakse niisugune, mis kindlustab terasele vajaliku struktuuri ja soovitud omadused.

Jahutuskiirust saab reguleerida erinevate jahutuskeskkondade valikuga ja nende temperatuuri muutmisega. Joonisel 5.2 on toodud lihtsustatult rida terase jahutuskiiruseid erinevates keskkondades.



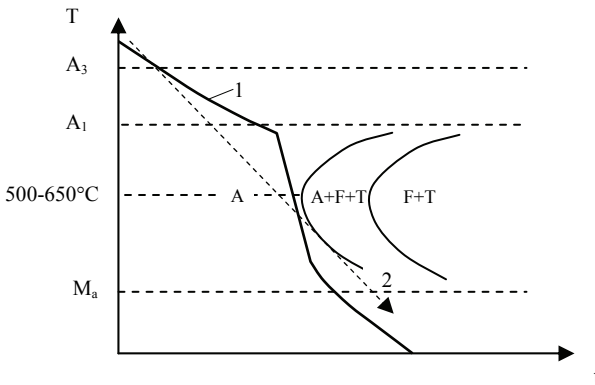
Joonis 5.2. Terase jahutusrežiimid: 1 – soolalahuses, 2 – vees, 3 – õlis, 4 – õhus

Jahutuskiiruse valikul tuleb lähtuda järgmistest põhilistest seisukohtadest: peab olema võimalikult väike (et tekkivad sisepinged oleksid minimaalsed), kuid seejuures küllaldane vajaliku struktuuri ja soovitud omaduste saamiseks.

Austeniit säilib kõige lühemat aega temperatuuripiirkonnas 500...600 °C ja hakkab lagunema juba mõne kümnendiku sekundi pärast. Sellest järeldub, et jahtumiskiirus peab karastamisel olema austeniidi lagunemist võimaldavast jahtumiskiirusest suurem.

Temperatuuridel alla 500 °C austeniidi säilivus suureneb ja siin võib jahtumiskiirust vähendada, eelkõige martensiidi tekkepiirkonnas (300...200 °C) karastamisel tekkivate sisepingete vähendamiseks. Sisepinged põhjustavad detailide kõverdumist, kaardumist ja pragunemist.

Karastamise ideaalne jahutuskõver on toodud joonisel 5.3. Seega on terase karastamise seisukohalt oluline karastuskeskkonna jahutusvõime kriitilistel temperatuuridel – 650...500 °C (austeniidi minimaalne säilivus) ja 300...200 °C (martensiidi tekkimise algus).



Joonis 5.3. Karastamine: 1 – ideaalne jahutuskõver, 2 – kriitiline jahtumiskiirus, millest väiksemal kiirusel hakkab austeniit lagunema

Süsinikteraseid karastatakse vees. Vesi jahutab 300...200 °C piirkonnas liiga intensiivselt, kuid vee kuumenemine (vt tabel 5.2) vähen-

dab jahtumiskiirust tunduvalt ainult piirkonnas 650...500 °C. Need on vee kui kasutatavama karastusvedeliku põhilised puudused.

Näiteks vees karastamine tagab martensiidi tekke, väiksema jahutusvõimega karastusvedelike (allajahtumisastmete) korral austeniit laguneb ja tekivad erinevad ferriidi ja tsementiidi segud (vt joonis 5.3). Süsinikteraseid aga karastatakse kõige sagedamini martensiidile, mis kindlustab maksimaalse kõvaduse.

Tabel 5.2

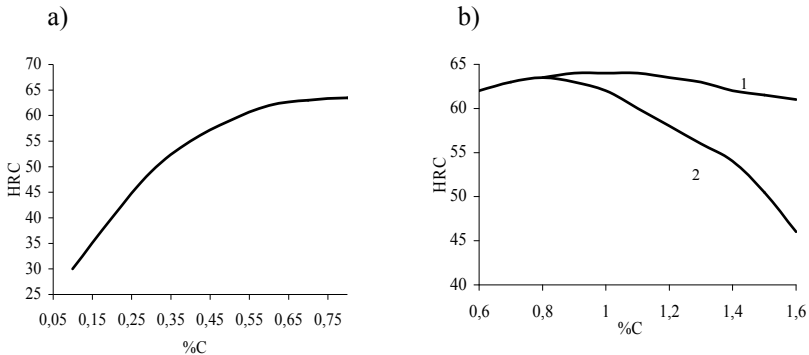
Enamkasutatavate karastamiskeskondade jahutusvõime

Karastamiskeskond	Jahtumiskiirus °C/s temperatuuripiikonas	
	650...500 °C	300...200 °C
Vesi 18 °C	600	270
Vesi 50 °C	100	270
NaCl 10%-line vesilahus 18 °C	1100	300
Mineraalõli 18 °C	150	30

Martensiidi tekkeprotsessil on järgmised iseloomulikud tunnused:

1. Martensiit tekib kriitilisest jahtumiskiirusest (v_{kr}) suurematel jahtumiskiirustel.
2. A_{c1} joonest kõrgematel temperatuuridel esinev austeniit sisaldab ligikaudu 10 korda rohkem süsinikku kui A_{c1} joonest madalamatel temperatuuridel esinev ferriit. Kriitilisest jahtumiskiirusest v_{kr} (joonis 5.3) väiksematel jahutamiskiirustel eraldub austeniidist ferriidi tekkimisel ehk polümorfisel muutusel liigne süsinik ja vabanenud süsiniku arvelt moodustuvad karbiidid. Kriitilisest jahtumiskiirusest v_{kr} suurematel jahutuskiirustel ei jõua süsinik polümorfisel muutusel eralduda ning tekibki martensiit ehk süsinikuga üleküllastunud tardlahus α – rauas. Seda protsessi nimetatakse ka difusioonita protsessiks, sest süsinikuaatomid ei välju γ – raua kristallivõrest ja jäävad α – raua kristallivõresse. Kuna α – raua kristallivõres on süsinikuaatomeid ülekülluses, siis kristallivõre deformeerub – kuupvõre muutub tetragonaalvõreks ja tetragonaalsuse aste ($c/a > 1$) on

seada suurem, mida rohkem on terases süsinikku. Deformeerunud kristallivõre tekitab sisepepingeid, mis omakorda teevad karastatud terase kõvemaks ja tugevamaks, kuid hapramaks. Mida suurem on karastatud alaeutektoidterase (martensiidi) süsinikuisaldus, seda kõvem ta on (joonis 5.4 a). Üleeutektoidterase korral martensiidi kõvaduse kõrval on määravaks tsementiidi ja jääkausteniidi kogus struktuuris (joonis 5.4 b).



Joonis 5.4. Karastatud terase kõvadus olenevalt C-sisaldusest: a – alaeutektoidterase, b – üleeutektoidterase (1 – täiskarastus (üle A_{cm}), 2 – poolkarastus (üle A_{c1}))

3. Martensiitmuutus leiab aset temperatuurivahemikus $M_a \dots M_1$ (martensiitmuutuse alg- ja lõpptemperatuurid M_a ja M_1 , mis olenevad terase süsinikuisaldusest ja langevad selle suurenemisel). Martensiitmuutus kulgeb täielikult ainult sel juhul, kui jahutada terast karastamisel pidevalt ja lõplikult allapoole temperatuuri M_1 . Alates terase süsinikuisaldusest 0,5% on martensiitmuutuse lõpptemperatuur M_1 allpool toatemperatuuri ja seetõttu jääb sellise süsinikuisaldusega teraste struktuuri karastamisel vette martensiidi kõrval ka jääkausteniiti, mis vähendab karastatud terase kõvadust (joonis 5.4 kõver 2). Nende teraste kõvaduse suurendamiseks tuleb neid tavalise karastamise järel jahutada miinustemperatuurideni (külmaga töötlus) või kuumutada 150...200 °C (madalnoolutus).

Karastatud alaeutektoidterase struktuur, koosnedes tavaliselt martensiidist ja jääkausteniidist ($C > 0,5\% C$), on ebapüsiv, sest tasakaaluolekus oleva terase struktuuriosadeks on ferriit ja tsementiit. Normaaltemperatuuril on aga aatomite liikuvus sedavõrd väike, et olulisi muutusi karastatud terase struktuuris ei saa toimuda.

Karastamisel tekkinud martensiitstruktuur on suure kõvaduse ja karastamisel tekkinud sisepingete tõttu nii habras, et seda ei saaks kasutada enamikus rakendustes.

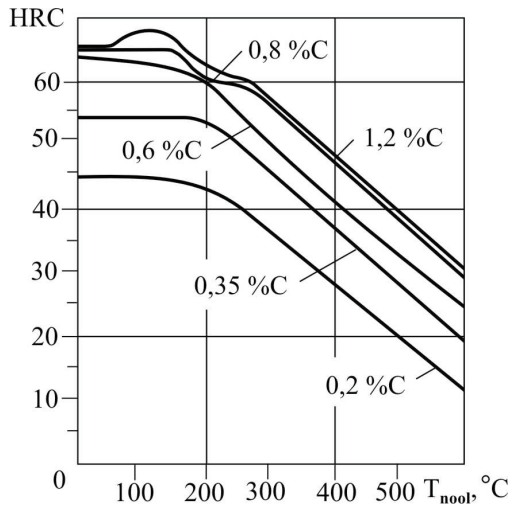
Kuumutamisel suureneb aatomite liikuvus ja toimuvad difusiooni-protsessid – seda intensiivsemalt, mida kõrgem on temperatuur. Karastatud terase kuumutamist temperatuurini, mis ei ületa A_{c1} , nimetatakse **noolutamiseks**. Noolutamisel martensiit laguneb ferriidi ja tsementiidi seguks, suureneb terase sitkus, kuid vähenevad kõvadus ja tugevus. Muutused on seotud faasimuutustega kuumutamisel: jääkausteniidi kadumise ja martensiidi lagunemisega.

Karastatud terase kuumutamisel toimub ka karastamisel tekkinud sisepingete vähenemine ja karbiidiosakeste kasv.

Noolutamisel toimuvad järgmised muutused:

- 1) terase kuumutamine kuni 100 °C -ni ei tekita olulisi muutusi struktuuris ja mehaanilistes omadustes;
- 2) kuumutamisel temperatuuriintervallis $100\text{...}200\text{ °C}$ leiab aset süsiniku osaline eraldumine martensiidist ja väga väikeste karbiidiosakeste teke. Niisugust martensiiti nimetatakse **noolutusmartensiidiks** ja tema kõvadus üldiselt säilib, vähenevad ja ühtlustuvad karastamisel tekkinud sisepinged ja kasvab sitkus;
- 3) noolustemperatuuril $200\text{...}300\text{ °C}$ võib suureneda mõnevõrra suure süsinikusisaldusega terasest detaili kõvadus tänu jääkausteniidi muutumisele martensiidiks (joonis 5.5 a – $1,2\% C$ -sisaldusega teras). On selge, et keskmise süsinikusisaldusega terastel, milles pärast karastamist ei ole jääkausteniiti, kõvadus nende noolustemperatuuride korral ei suurene. Süsiniku aatomite difusioonist tulenevalt algab karbiidide teke;
- 4) noolustemperatuuri tõusuga eraldub martensiidist järjest rohkem süsinikku ning umbes 400 °C juures on praktiliselt kogu

süsinik martensiidist eraldunud ja terase struktuur koosneb ferriidist ning väga väikestest ümaratest tsementiiditeradest. Niisugust struktuuri nimetatakse **noolutustroostiidiks**. Nüüd on ka täielikult kõrvaldatud sisepinged, terase kõvadus on vähenenud ning sitkus suurenenud ja teras on väga elastne;



Joonis 5.5. Erineva süsiniksisaldusega süsinikteraste kõvaduse olenevus noolustemperatuurist

- 5) noolustemperatuuridel üle 400 °C hakkavad tsementiiditerad koaguleeruma. Teras struktuur koosneb ferriidist ja suuremate tsementiiditeradest. Seda struktuuri nimetatakse **noolutussorbiidiks**. Termotöötlemiste režiimi, mis seisneb karastamises martensiidile ja sellele järgnevas kõrges noolutamises sorbiidile, nimetatakse **parendamiseks**, sest kõik mehaanilised omadused (R_m , $R_{p0,2}$, KU, HB) on suuremad lõõmutatud (tasakaaluoleku struktuur) terase omadustest. Enamasti on parendatud teras parima sitkusega ja seetõttu kasutatakse seda löökkoomusi taluvates konstruktsioonides.

Nagu eelnevast nähtub, on noolustus temperatuuri valikuga võimalik ulatuslikult muuta karastatud terase mehaanilisi omadusi.

Praktikas kasutatakse põhiliselt kolme noolustusviisi: madal-, kesk- ja kõrgnoolustust (tabel 5.3).

Tabel 5.3

Noolustusliigid, saavutatavad omadused ja kasutusala

Noolustusliik	Temp °C	Struktuur	Kõvadus HRC	Kasutusala
Madal	170...250	Noolutusmartensiit (terastes C-sisaldusega üle 0,8%, ka tsementiit) on väga kõva ja võrreldes karastatuga, sitkem	45...65	Metallilõikeriistad, stantsid, lõiketerad, viilid. Pindkarastatud või tsementiitud detailid
Kesk	300...400	Nooluststroostiit (ferriit + teraline tsementiit)	30..50	Puidulõikeriistad, vedrud, mutrivõtmed, meislid
Kõrg	500...650	Noolutussorbiit (ferriit + teraline tsementiit) omab head kombinatsiooni sitkusest ja tugevusest.	15...35	Vastutusrikkad masinaosad ja konstruktsioonid nt võllid, teljed, hammasrattad

Töö käik

Praktikumi käigus saab üliõpilane kuni kaheksa katsekeha (terase margi(d) ning arvu teatab õppejõud). Seejärel:

- 1) määrata katsekehade keemiline koostis (tabel 4.2) ning mõõta ühel katsekehal (iga terase korral) HRC kõvadus lähteolekus kolmes punktis. Kontrollida kõvadusmõõtuuri näite etalonplaadiga;
- 2) määrata terase keemilise koostise järgi karastustemperatuur (joonis. 5.1) ja katsekeha kuju ning mõõtmete järgi kuumutuskestus (tabel 5.1);

- 3) jaotada katsekehad vastavalt karastuskeskkonnale, tulemused tuua tabeli 5.4 kujul:

Tabel 5.4

Katsekehade C-sisaldus ning karastamistingimused

Terase mark, C-sisaldus	Kõvadus lähteolekus HRC	Karastustemp °C	Kuumutuskestus min	Katsekehade arv karastuskeskkonna kohta	Nõutav kõvadus HRC	Saavutatud kõvadus HRC
1)				Õhk: Õli: Vesi:		
2)				Õhk: Õli: Vesi:		
3)				Õhk: Õli: Vesi:		

- 4) karastuseks asetada üht marki terasest katsekehad metallist alusplaadil kuumutusahju, pärast seisutusaja möödumist jahutada katsekehad vastavalt tabelile 5.3 vees, õlis ja õhus (normaliseerimine), asetades need selleks keraamilisele plaadile;
- 5) mõõta vees karastatud katsekehadel ühel kõvadus kolme jäljega ja teistel ühe jäljega. Kui olulist erinevust katsekehade kõvaduses ei ole, võib eeldada, et kõik mõõtmistulemused kirjeldavad homogeenset materjali, ja võib leida kõigi vees karastatud katsekehade mõõtmiste aritmeetilise keskmise. Enne kõvaduse mõõtmist puhastada katsekehade mõlemad baaspinnad lihv-paberi abil tagist;
- 6) joonestada graafik $HRC = f(v_{\text{jaht}})$, võttes jahtumiskiirusteks õhus 30 °C/s, õlis 150 °C/s ja vees 600 °C/s, selgitada tulemust (joonis 5.3) ning hinnata jahtumiskiiruse mõju kõvadusele;
- 7) joonestada graafik $HRC = f(C\%)$, karastatud vees – lähtuvalt töös kasutatud kolmest erineva C-sisaldusega teraste tulemus-

- test, anda hinnang C-sisalduse mõju kohta terase karastatavusele;
- 8) valida kasutusotstarbest (teatab õppejõud) nõutavad kõvadused (tabel 5.3) ning nendele vastavad noolustus-temperatuurid ning noolutada katsekehad (joonis 5.5);
 - 9) peale noolutamist mõõta kõigi katsekehade kõvadus kolme jäljega (eelnevalt puhastada baaspinnad) ning joonestada graafik $HRC = f(T_{\text{nool}} \text{ } ^\circ\text{C})$. Hinnata noolustus-temperatuuri mõju terase kõvadusele. Kõik kõvadusarvud kanda tabelisse 5.5.

Tabel 5.5

Katsekehade C-sisaldus ning noolutamistingimused

Terase süsiniku-sisaldus	Nõutav kõvadus	Noolustus-temperatuur	Kuumutus-kestus min	Saavutatud kõvadus HRC

Aruande sisu

1. Tiitelleht.
2. Töö eesmärk.
3. Karastamise ja noolutamise olemus ning tähtsuse lühike kirjeldus.
4. Töö meetoodika kirjeldus.
5. Katsetulemused tabeli ja graafikute kujul.
6. Terase karastamisel tekkiva(te) struktuuri(de) kirjeldus (erinevate jahtumiskiiruste korral) ja noolutamisel tekkivate struktuuride kirjeldus (vastavalt valitud noolustus-temperatuurile).

Kontrollküsimused

1. Millised on termotöötlemise režiimi iseloomustavad näitajad?
2. Mis on lõõmutamine?
3. Mis on normaliseerimine?
4. Milles seisneb karastamine?
5. Miks kasutatakse alaeutektoidteraste korral poolkarastust?

6. Milline on 0,5%-lise C-sisaldusega terase struktuur pärast optimaalset karastamist?
7. Milline on 1,2%-lise C-sisaldusega terase struktuur pärast täiskarastust? Milline on selle terase optimaalne karastustemperatuur (vt Fe-Fe₃C diagrammi)?
8. Milles seisnevad üleeutektoidterase täiskarastuse puudused?
9. Millisest süsinikusisaldusest alates jääb karastunud struktuuri jääkausteniit?
10. Milline on ja millest sõltub karastatud terase kõvadus (HRC)?
11. Miks noolutatakse karastatud terast?
12. Kuidas muutuvad terase tugevus-, kõvadus-, plastsus- ja sitkusnäitajad (HRC, KV) terase noolustemperatuuri tõusuga?
13. Millist termotöötlust kasutada löögiolukorras töötava terasest C 45 konstruktsioonidetaili korral?
14. Milliste süsinikusisaldusega teraste korral kasutatakse parendamist?
15. Mille poolest erinevad noolutamisel tekkivad troostiit ja sorbiit?

TÖÖ NR 6

MITTERAUASULAMITE MIKROSTRUKTUUR JA OMADUSED

Töö eesmärk

Tutvuda mitteraudmetallide ja mitterauasulamite struktuuri ja omadustega.

Töö selgitav osa

Mitteraudmetallide ehk värvilismetallide hulka kuuluvad kõik metallid peale raua. Mitteraudmetallid ja mitterauasulamid liigitatakse omadustest lähtuvalt

a) tiheduse järgi:

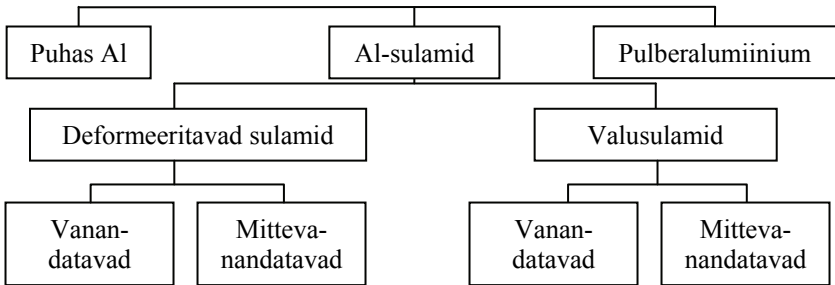
- kergmetallid ja -sulamid (tihedus kuni 5000 kg/m^3) – magneesium, alumiinium, titaan jt;
- keskmetailid ja -sulamid (tihedus $5000 \dots 10\,000 \text{ kg/m}^3$) – tina, tsink, vask, nikkel, antimon, kroom, mangaan jt;
- raskmetallid ja -sulamid (tihedus üle $10\,000 \text{ kg/m}^3$) – plii, hõbe, kuld, volfram, molübdeen jt.

b) sulamistemperatuuri järgi:

- kergsulavad metallid ja sulamid (sulamistemperatuur ei ületa plii sulamistemperatuuri, mis on $327 \text{ }^\circ\text{C}$) – liitium, tina, plii jt;
- kesksulavad metallid ja sulamid (sulamistemperatuur üle $327 \text{ }^\circ\text{C}$, kuid alla $1539 \text{ }^\circ\text{C}$) – mangaan, vask, nikkel, hõbe jt;
- rasksulavad metallid ja sulamid (sulamistemperatuur üle raua sulamistemperatuuri, mis on $1539 \text{ }^\circ\text{C}$) – titaan, kroom, vanaadium, molübdeen, volfram jt.

Alumiiniumisulamid

Alumiiniumisulameid liigitatakse töödeldavusest ja termotööstlusest lähtuvalt järgmiselt:



a) Alumiiniumi deformeeritavad sulamid

Deformeeritavad alumiiniumisulamid liigitatakse termotötluse põhjal järgmiselt:

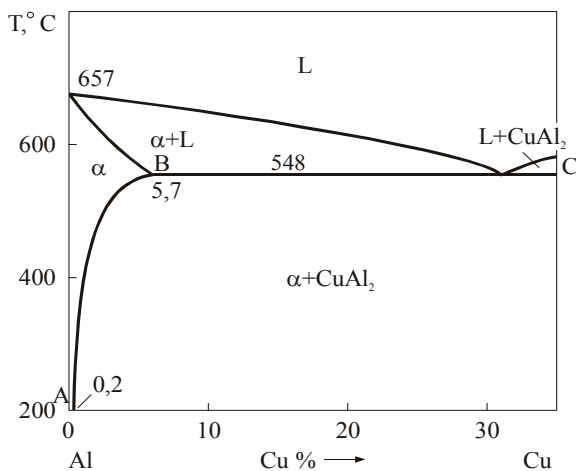
- sulamid, mida termotötlusega ei tugevdata (mittevanandavad);
- termotötlusega tugevdatavad sulamid (vanandavad).

Esimesse gruppi kuuluvad Al-Mn- ja Al-Mg-süsteemi sulamid, teise Al-Cu-, Al-Cu-Ni-, Al-Mg-Si-, Al-Zn-Cu- ja Al-Li-süsteemi sulamid.

Deformeeritavatest, kuid mittetermotöödeldavatest sulamitest tuntumad on 1...2% Mn-sisaldusega ja kuni 10% Mg-sisaldusega sulamid (viimased tuntud ka magnaaliumina).

Tüüpilisteks termotöödeldavateks sulamiteks on Al-Cu-sulamid (**duralumiiniumid**), mille faasidiagramm on toodud joonisel 6.1.

Vase lahustuvus alumiiniumis toatemperatuuril on maksimaalselt 0,2 massiprotsenti, kuid temperatuuril 548 °C võib see ulatuda 5,7 massiprotsendini. Näiteks kui jahutada aeglaselt 5%-lise vasesisaldusega sulamit, saame sulami struktuuri, kus ühendi CuAl_2 osakesed on sadestunud α -tardlahuse terapiiridele. Kui vastupidi, kõrgele temperatuurile kuumutatud sulamit jahutada kiirelt, saame üleküllastatud α -tardlahuse struktuuri (vt töö nr 7 – joonis 7.2). Tabelis 6.1 on toodud mõned duralumiiniumi margid ja koostis.



Joonis 6.1. Al-Cu faasidiagrammi Al-poolne osa

Tabel 6.1

Mõningate duralumiiniumite keemiline koostis ja omadused (EN573)

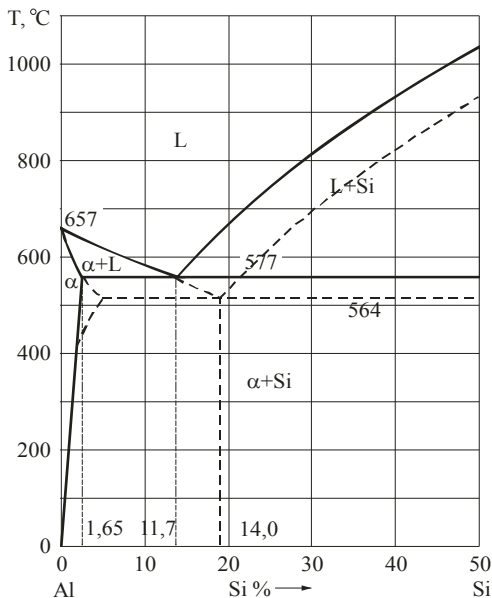
Mark	Koostis %	Olek	Tõmbetugevus Rm, N/mm ²	Katkevenivus A, %
AlCu4MgSi	3,5...4,5 Cu, 0,4...1,0 Mg, 0,2...0,8 Si	K + LV	380	13
		K + KV	450	6
AlCu4MgI	3,8...4,9 Cu, 1,2...1,8 Mg, 0,5 Si	K + LV	380	12
		K + KV	450	8

K + LV – karastatud ja loomulikult vanandatud,

K + KV – karastatud ja kunstlikult vanandatud.

b) Alumiiniumi valusulamid

Alumiiniumi valusulamite tüüpilisteks esindajateks on Al-Si-sulamid ehk **silumiinid**. Sulamites, alates ränisisaldusest 1,65%, esineb eutektmuutus temperatuuril 577 °C, mil moodustub eutektikum Si-sisaldusega 11,7% (joonis 6.2).



Joonis 6.2. Al-Si faasidiagrammi Al-poolne osa

Tardlahusest ja ränist moodustunud eutektikum ($\alpha + \text{Si}$) on plastne tardlahuse maatriksi tõttu, vaatamata selles paiknevale haprale ränile. Eutektikumi hea vedelvoolavuse tõttu kasutatakse sulameid valu-sulamitena valatuna liivsavi- või metallvormi. Kasutatavamad sulamid sisaldavad 10...13% Si. Üldjuhul kasutatakse jämedateralise eutekt-struktuuri peenendamiseks sulami modifitseerimist – vedelmetalli lisatakse väikeses koguses (ca 1...2%) NaCl ja NaF segu vahekorras 1 : 2. Selle tulemusena alaneb eutektmuutuse temperatuur ja muutub ka eutektikumi koostisele vastav Si-sisaldus (vt joonis 6.2 – punktiir-jooned), sulami struktuur muutub peeneteralisemaks ja suurenevad tugevus- ning plastsusnäitajad (vt tabel 6.2).

Tabel 6.2

Mõningate silumiinide keemiline koostis ja omadused (EN 1706)

Mark	Koostis %	Valuviis	Olek	Tõmbetugevus R_m , N/mm ²	Katke- venivus A %
AlSi12	10,5...13,5 Si	LiV, KoV	VO	180	5
AlSi7Mg	6,5...7,5 Si, 0,2...0,65 Mg	LiV, KoV	K + LV	200	8
			K + KV	250	4

LiV – liivsavivormivalu,

KoV – kokillivalu,

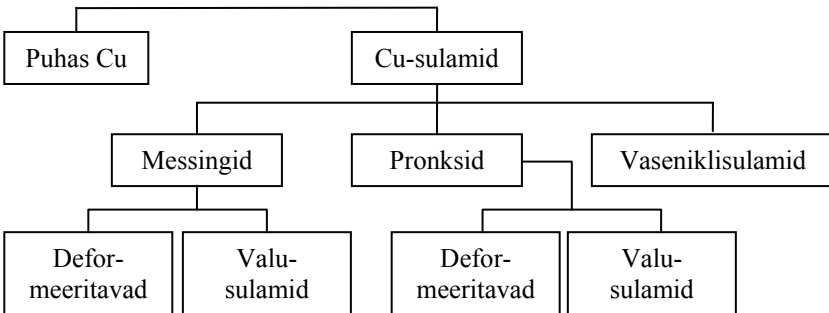
VO – valmistamisolekus,

K + LV – karastatud ja loomulikult vanandatud,

K + KV – karastatud ja kunstlikult vanandatud.

Vasesulamid

Kasutatavamad vasesulamid on messingid ehk valgevased (Cu-Zn-sulamid) ja pronksid (Cu-, Sn-, Cu-Al- jt sulamid), aga ka vaseniklisulamid. Vasesulamite jaotus on järgmine:

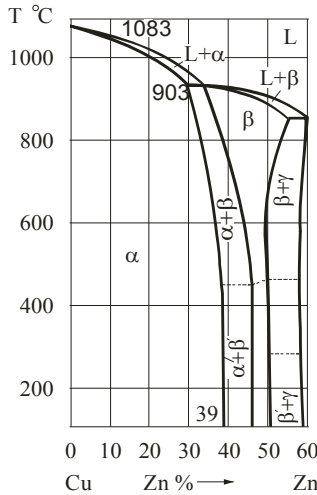


a) Messingid

Tehnikas kasutatavate messingite Zn-sisaldus ulatub kuni 45%-ni (Cu-Zn-sulami faasidiagrammi osa on toodud joonisel 6.3).

Zn-sisalduse suurenemisel kasvab sulami tugevus (kuni 45% Zn) ja plastsus (kuni 35% Zn). Kõige plastsemate messingsulamite plastsus

ületab puhaste elementide (Cu või Zn) oma, mis on ebaharilik (tavaliselt on igasuguste sulamite plastsus alati väiksem lähtekomponentide plastsusest). Zn-sisalduse edasisel suurenemisel väheneb järsult nii plastsus kui ka tugevus. Seetõttu ei ületa deformeeritavate messingite Zn-sisaldus tavaliselt 20...30%.



Joonis 6.3. Cu-Zn faasidiagrammi Cu-poolne osa

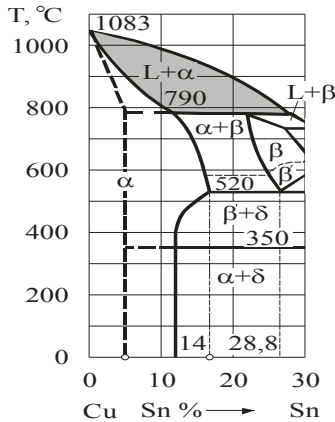
Nagu nähtub Cu-Zn faasidiagrammist, tardub messing kitsas temperatuuriintervallis (on hea vedelvoolavusega), mille tulemusena on valandid poordeta struktuuriga ja kontsentreeritud kahanemistühimikuga.

b) Pronksid

Levinumad pronksid on tinapronksid. Süsteemi Cu-Sn faasidiagrammi osa on toodud joonisel 6.4.

Tinapronksidele Sn-sisaldusega 5...10% on iseloomulik likvatsioon kristallisatsiooni alg- ja lõpptemperatuuride suure vahe (kristallisatsiooniintervalli) tõttu. Kasutatakse vähese Sn-sisaldusega tinapronkse, sest alates 10% Sn-sisaldusest langeb sulami plastsus järsult,

alates 20% Sn-sisaldusest langeb ka tugevus. Juba 5...6% Sn juures esineb pronksi struktuuris ($\alpha + \delta$)-eutektoid, kus δ -faasiks on kõva ja habras keemiline ühend $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$. Selliste valandite struktuuris moodustab plastne tardlahus maatriksi, milles on kõvem eutektoid (tüüpiline liugelaagri materjali struktuur).

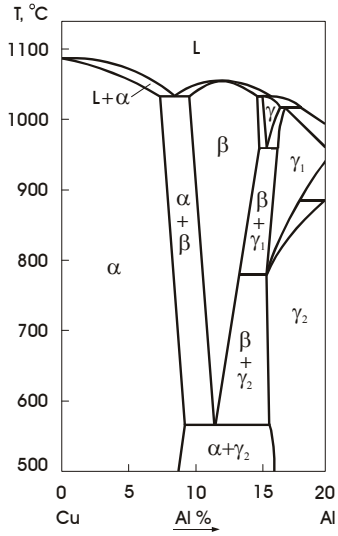


Joonis 6.4. Cu-Sn faasidiagrammi Cu-poolne osa

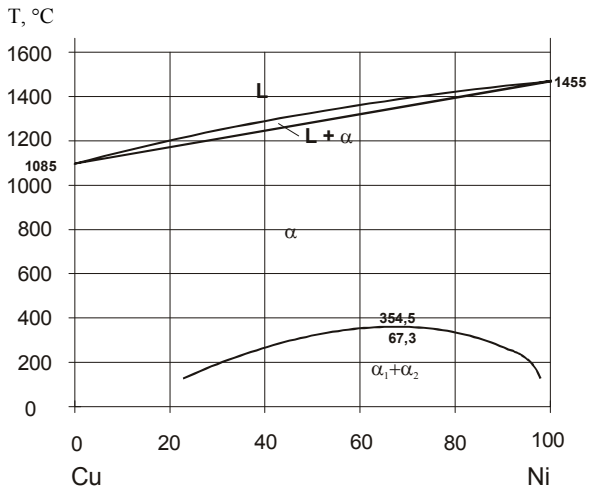
Alumiiniumpronksid on kõrgete mehaaniliste omadustega ($R_m = 650 \text{ N/mm}^2$) ja neid kasutatakse väiksemate vastutusrikaste detailide valmistamiseks. Alumiiniumpronkse (5...10% Al) kasutatakse ka mündimetallina. Süsteemi Cu-Al faasidiagrammi osa on toodud joonisel 6.5.

c) Vaseniklisulamid

Tuntumad vaseniklisulamid sisaldavad 10...25% niklit (mündimelior, uushõbe), nad on suurepärase korrosioonikindlusega ja hea elektrijuhtivusega. Cu-Ni-süsteemi faasidiagramm on toodud joonisel 6.6, põhiliste vasesulamite omadused aga tabelis 6.3.



Joonis 6.5. Cu-Al faasidiagrammi Cu-poolne osa



Joonis 6.6. Cu-Ni faasidiagramm

Tabel 6.3

Mõningate vasesulamite omadused ja kasutus

Sulamite margi- tähistuses (ISO 1190/1)	Termo- töötlus	Tõmbe- tugevus R_m N/mm ² (EN 1682)	Kasutus
Messingid CuZn20 (pooltombak)	L K	310 510	Juveelitooted
CuZn40Pb2	L K	380 590	Hea lõiketöödeldavusega automaadimessing
Pronksid Tinapronks CuSn10 Alumiiniumpronks CuAl10	VO VO	280 700	Liugelaagrimetall Kõrgtugev mündimetall
Vaseniklisulam Cu75Ni25	L K	360 600	Briti "mündihõbe"

L – lõõmutatud, K – karastatud, VO – väljastamisolek (valatud või kuumtöödeldud)

Niklisulamid

Parima korrosioonikindlusega on Ni-Cu-sulamitest **monelmetall**, milles nikli ja vase vahekord on 2 : 1. Lisaks korrosioonikindlusele iseloomustab monelmetalli ka hea tugevus ja sitkus. Ni-Cr-sulamid on tuntud eelkõige kuumuspüsivate materjalidena, mida suurest elektritakistusest tingituna kasutatakse kütteelementides. **Nikroomina** tuntud materjalid sisaldavad 80...60 % Ni ja vastavalt 20...40 % Cr.

Ni baasil kuumustugevad materjalid on tuntud ka supersulamitena.

Titaanisulamid

Puhta titaani tugevus ja kõvadus sõltuvad eelkõige selle puhtusest (olulist mõju avaldab lisandina N, O, C). Legeerivate elementidena kasutatakse titaanisulameis Sn, Al ja V, mis avaldavad olulist mõju sulamite tugevusele. Titaanisulamite tõmbetugevus ulatub kuni 1200 N/mm²-ni ja on võrreldav terase tugevusega. Samas on titaanisulamid

suurima eritugevusega tehnikas kasutatavates metallisulamites (eritugevus R_m/ρ kuni 35).

Plii- ja tinasulamid

Grafiitmalmide ja pronkside kõrval on olulisteks liugelaagrimaterjalideks Pb ja Sn baasil sulamid – **babiidid**.

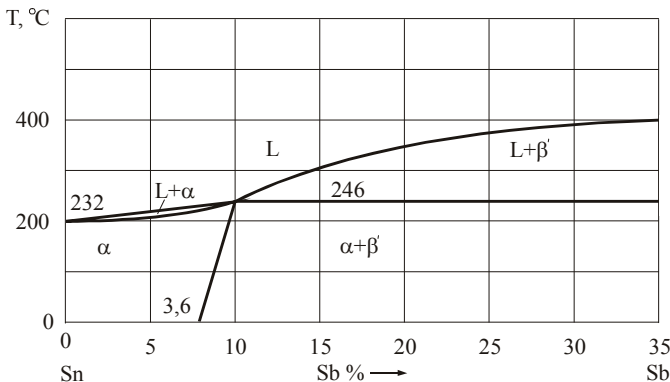
Laagrisulameid kasutatakse liugelaagrite valmistamiseks ja need peavad tagama

- 1) hea sissetöötavuse;
- 2) väikese hõõrdeteguri võlli ja laagri vahel;
- 3) mõlema hõõrduva pinna vähese kulumise;
- 4) laagri vastupidavuse suurtel survetel.

Nendele nõuetele vastavad laagrisulamid, mille struktuur koosneb pehmest metalsest põhimassist (maatriksist), mis tagab hea sissetöötamise, ja kõvadest osakestest, mis tagavad vajaliku kulumiskindluse.

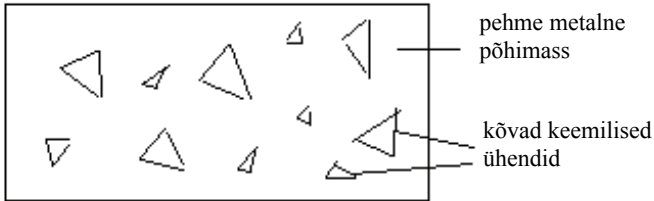
Babiidid on kergsulavad Sn-Sb-, Pb-Sb-, Pb-Sn-Sb-sulamid, millest valatakse laagreid. Nende struktuur vastab ülaltoodud nõuetele.

Sn-Sb süsteemi faasidiagramm on toodud joonisel 6.7.



Joonis 6.7. Sn-Sb faasidiagrammi Sn-poolne osa

Cu- ja Sb-sisaldusega tinababiidi pehme põhimass (maatriks) on tina alusel tardlahus α (joonis 6.7), milles on kõvad SnSb kuubilised kristallid ning väga peened Cu_3Sn kristallid (vt joonis 6.8).



Joonis 6.8. Liugelaagri materjali põhimõtteline struktuuriskeem

Töö käik

Mikrolihvide uurimiseks kasutatakse metalli mikroskoopi suurendusega vastavalt vajadusele 100 või 200 korda.

Joonistada sulamite mikrostruktuurid ja määrata struktuuriosad, samuti esitada sulamite margid ja keemiline koostis.

Lihv nr 1 ja 2. Duralumiinium karastatud ja vanandatud. Selgitage välja struktuuriosad, võrrelge struktuure ning tooge välja nende erinevused.

Lihv nr 3. Silumiin. Määrata struktuuriosad ja silumiini liik (alavõi üleeutektne). Määrata Al-Si faasidiagrammi abil eutektikumi koostis. Esitage eutektkoostisele lähedase silumiini mark. Selgitage, miks silumiinil on head valuomadused ja milles need seisnevad.

Lihv nr 4. Messing tsingisisaldusega 41%. Määrata struktuuriosad. Selgitage, millise messingiga (ühe- või kahefaasiline) on tegemist. Mida kujutab endast struktuuris olev tardlahus?

Lihv nr 5 ja 6. Lõõmutatud ja valatud tinapronks tinasisaldusega 10%. Määrata Cu-Sn faasidiagrammi järgi struktuuri koostisosad. Mis olekus kasutatakse tinapronksi laagrimaterjalina ja milliseid omadusi neilt nõutakse?

Lihv nr 7. Alumiiniumpronks alumiiniumisisaldusega 10%. Määrata Cu-Al faasidiagrammi alusel struktuuriosad. Selgitage alumiiniumpronksi kasutusala.

Aruande sisu

1. Tiitelleht.
2. Töö eesmärk.
3. Põhiliste vase- ja alumiiniumisulamite lühiiseloostus.
4. Mikrostruktuuride joonised struktuuriosade näitamiseks, lihvide materjali iseloostus, markeerimise, kasutusala ja omaduste kirjeldus.
5. Vastused juhendi küsimustele.

Kontrollküsimused

1. Kuidas liigitatakse vasetsingisulamid struktuuri järgi?
2. Mis faasid esinevad pronksi (koostisega 96% Cu, 4% Sn) struktuuris?
3. Kuidas nimetatakse pronksi, mis sisaldab 10% Sn, 1% P?
4. Millised on silumiini (koostisega 13% Si, 87% Al) struktuuriosad pärast valamist?
5. Nimetage laagrisulamitena kasutatavaid materjaligruppe.
6. Milline struktuur on 10%-lise Sn-sisaldusega pronksist valandil?
7. Millistest faasidest koosneb valgevase CuZn40 struktuur?
8. Kuidas liigitatakse alumiiniumisulameid?
9. Kuidas nimetatakse 20%-lise Zn-sisaldusega messingit?
10. Milline muutus leiab aset Al-Si-sulamites temperatuuril 577 °C?
11. Millises olekus kasutatakse tinapronkse laagrimaterjalina (valatud, lõõmutatud)?
12. Kuidas nimetatakse sulamit 89% Al + 11% Si?
13. Milline on pronksi CuSn6Zn6Pb3 koostis?
14. Mis on babiit?
15. Milline on babiitide põhimõtteline struktuur?

TÖÖ NR 7

DURALUMIINIUMI TERMOTÖÖTLUS

Sissejuhatus

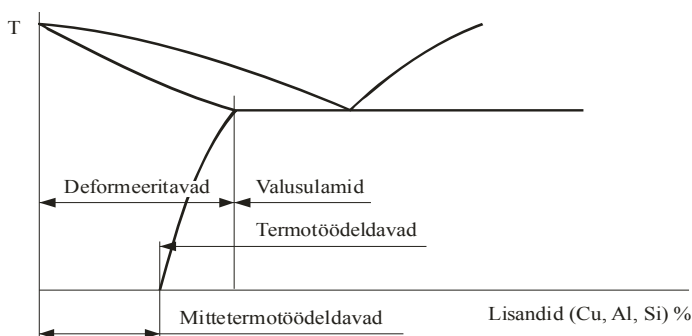
Duralumiiniumsulamid on deformeeritavaist alumiiniumsulamitest tuntud oma kerguse ja tugevuse poolest, mistõttu neid kasutatakse palju lennukitööstuses. Sulami tugevusomadused saavutatakse peamiselt termotöötamise teel. Samas on duralumiiniumsulamite termotöötlus oma põhimõtte poolest erinev terase termotöötlukest.

Töö eesmärk

Tutvuda alumiiniiumsulami – duralumiiniumi termilise töötlemisega ja uurida termilise töötlemise mõju duralumiiniumi omadustele.

Töö selgitav osa

Mitterauasulamid jaotatakse, lähtudes toodete valmistamisviisist, deformeeritavaks (survetöödeldavaks) ja valusulameiks, termotöötamise järgi aga termotöödeldavaks (vanandatavaks) ja mittetermotöödeldavaks (mittevanandatavaks). Alumiiniiumsulamite liigituse aluseks on Al ja nende põhilisandite faasidiagrammid (joonis 7.1).



Joonis 7.1. Mitterauasulamite liigitus töödeldavuse järgi (faasidiagrammi alusel)

Termotöötuse tulemusena tekib struktuuri dispersne kõvafaas – leiab aset tugevnemine/kõvenemine.

Dispersioonkõvendamine on protsess, mille käigus materjali tugevus suureneb termotöötuse tulemusena tekkinud üleküllastunud ühefaasilisest struktuurist väga peenikeste uue faasi osakeste tekkimisel. Kuna tekkivate osakeste hulk kasvab aja möödudes, nimetatakse ka protsessi vanandamiseks. Vanandamise eeltingimuseks on lahustava komponendi maksimaalne lahustumine lahustaja komponendis mitme protsendi ulatuses ning lahustuvuse järsk vähenemine temperatuuri alanedes (vt joonis 7.1 termotöödeldavad mitterauasulamid). Teise faasi moodustumisel struktuuris tekivad materjalisisepinged mis tõstavad tugevust ja kõvadust.

Dispersioonkõvenemine ja martensiidi moodustumine terastes on täiesti erinevad protsessid, kuigi termotöötus on mõlemal juhul sarnane.

Alumiiniumisulamid

a) Deformeeritavad ja termotöödeldavad sulamid

Paljude alumiiniumisulamite (Al-Cu, Al-Si, Al-Mg, Al-Mn) puhul on tähtsaks asjaoluks, et lisandid Cu, Si, Mg, Mn lahustuvad põhimetallis – alumiiniumis – piiratult, kusjuures nende lahustuvus väheneb tekkinud tardlahuses temperatuuri langemisel.

Joonisel 7.2 on toodud nende sulamite hulgast kõige tüüpilisema ja praktiliselt tähtsama komponentidepaari Al-Cu faasidiagramm. Al-Cu-sulamid Cu-sisaldusega kuni 5% on tuntud eelkõige duralumiiniumina.

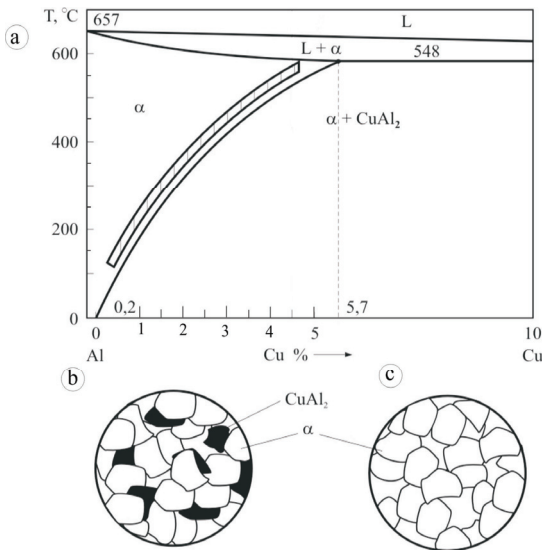
Kui kuumutada Al-Cu-sulamit, mille vasesisaldus on alla 5,7% (joonis 7.2), ühefaasilise tardlahuse α -alasse (üle lahustuvuse joone) ja seejärel kiirelt jahutada, säilib toatemperatuuril sama struktuur, sest CuAl_2 sekundaarsed osakesed ei jõua tekkida. See on karastamine, mille tulemuseks on vasega üleküllastunud ebapüsiv tardlahuse struktuur.

Ebapüsiva struktuuriga sulamis toimuvad ajaliselt muutused, mille tulemusena eraldub üleküllastunud asendustardlahusest liigne vask ühendi CuAl_2 näol. Sellist protsessi nimetatakse vananemiseks ja operatsiooni loomulikuks vanandamiseks, kui see toimub normaaltemperatuuril, ja kunstlikuks vanandamiseks, kui see toimub kõrgematel temperatuuridel.

Karastamisel ja sellele järgneval vananemisel tekkivad struktuuri muutused on seotud duralumiiniumi omaduste muutumisega. Karastatud ühefaasiline tardlahuse struktuuriga sulam on suhteliselt väikese tugevuse (nii tugevus- kui ka voolavuspiir) ja kõvadusega ning suure plastsusega.

Vananemisel tugevus ja kõvadus tõusevad, plastsus aga väheneb.

Enamakomponentsete alumiiniumisulamite vanandamisel tekivad keerukad faasid ja ühendid, mille kirjeldamine nõuab kahekomponentsetest tunduvalt keerukamate faasidiagrammide tundmist.

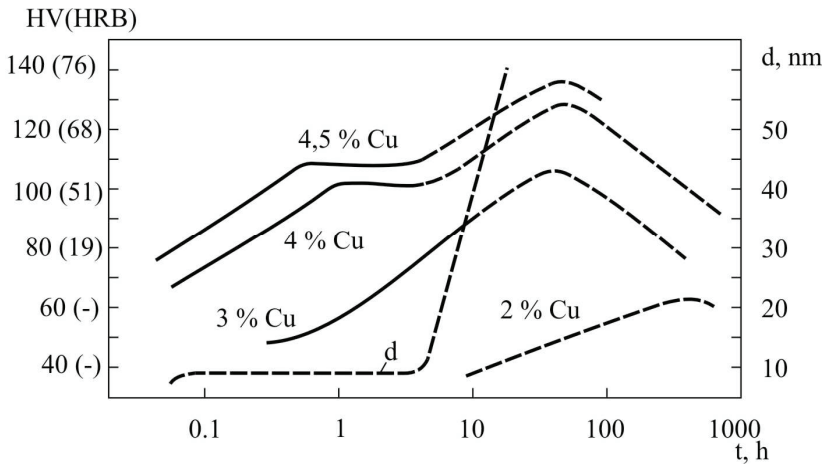


Joonis 7.2. Al-Cu faasidiagrammi Al-poolne osa (a) ja sulami (5% Cu) struktuur aeglaselt (b) ja kiirelt jahutatult (c)

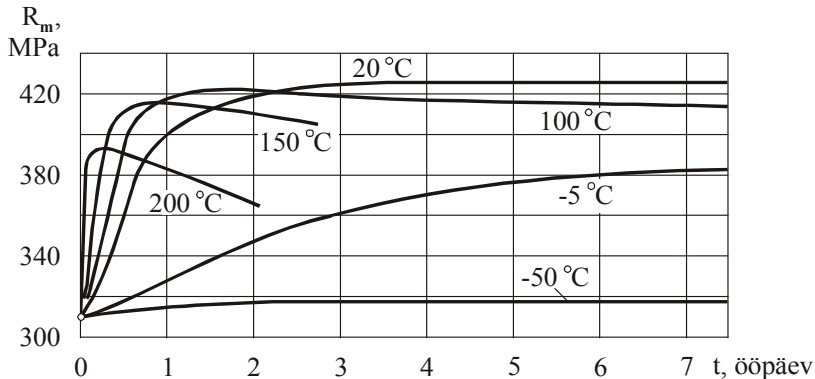
Duralumiiniumil on konstruktsioonimaterjalina olulisemad tugevusomadused, plastse deformeerimise (survetöötlemise) seisukohalt aga plastsusnäitajad. Kuna duralumiiniumi kõvadus ja tugevus muutuvad ühes suunas, plastsus aga vastupidises suunas, saame tugevuse ja plastse muutuse üle otsustada tema kõvaduse muutuse järgi. Käesolevas töös mõõdame duralumiiniumi kõvadust ja selle kaudu otsustame teiste mehaaniliste omaduste (tugevus, plastsus) üle.

Joonistel 7.3 ja 7.4 on toodud duralumiiniumi omaduste muutumise kõverad vananemisel. Pärast karastamist esimese 2...3 tunni jooksul omadused muutuvad vähe – see on nn inkubatsiooniperiood, millel on suur tehnoloogiline tähtsus, sest duralumiinium on sel ajal hästi deformeeritav.

Loomulikul vananemisel saab karastatud duralumiiniumi maksimaalse tugevuse (ja kõvaduse) 4...5 ööpäeva pärast. Kunstlikul vananemisel ($T = 100...200\text{ °C}$) saavutatakse märgatav tugevuse ja kõvaduse kasv juba mõnekümne minuti jooksul.



Joonis 7.3. Kõvaduse muutus duralumiiniumi kunstlikul vananemisel 130 °C juures; d – CuAl_2 osakeste läbimõõdu ruut



Joonis 7.4. Tugevuse muutus duralumiiniumi vananemisel erinevatel temperatuuridel

Vananemisnähtuse mehhanism tundub esialgu olevat küllaltki lihtne: üleküllastunud tardlahusest eraldub CuAl_2 väga väikesi ja seejuures kõvu osakesi, mis takistavad plastsel deformeerimisel terasiseid nihkumisi; sellega suureneb materjali tugevus ja kõvadus. Nagu uurimised näitavad, on vananemisprotsessi kulg aga tunduvalt keerukam, koosnedes mitmest staadiumist ning olenedes eelkõige vanandamise temperatuurist.

Karastatud duralumiiniumi loomulikul vananemisel esineb karastatud struktuuris ainult vananemist ettevalmistav staadium, mis seisneb selles, et lahustunud komponendi (nt vase) aatomid, mis esialgu paiknevad hajutatult tardlahuse kristallivõres, hakkavad koonduma. Tekivad suure vasesisaldusega tsoonid, nn Guinier'-Prestoni tsoonid.

Asjaolu, et alumiiniumi ja vase aatomiraadiused erinevad tunduvalt, tekitab neis tsoonides suuri kristallivõre moonutusi. See muudabki tugevust ja kõvadust.

Loomulikul vananemisel protsess esimesest staadiumist edasi ei lähe. Kõrgematel temperatuuridel läheneb vase kontsentratsioon Guinier'-Prestoni tsoonides vastava keemilise ühendi (nt CuAl_2) kontsentratsioonile ja tekib uus faas, nn Wassermanni faas, millel on juba tardlahuse kristallivõrest erinev, kuid sellega koherentselt seotud

kristallivõre. See vastab vananemise teisele staadiumile ja esineb lühiajalisel seisutamisel 150...200 °C juures. Pikem seisutamine või kõrgem temperatuur tekitab juba puhta keemilise ühendi osakesi, mis vastab vananemise kolmandale ja viimasele staadiumile. Edasine kuumutamine põhjustab vaid nende osakeste suurenemist (koaguleerumist). Toimub ülevananemine.

Vananemise maksimaalne efekt saavutatakse esimeses staadiumis. Teisel ja eriti kolmandal staadiumil kasvab tugevus vähe (võib esineda isegi tugevuse langus).

Duralumiiniumid on keeruka koostisega alumiiniumisulamid, mille markide mõned näited ja omadused EN-i järgi on toodud tabelis 7.1, keemiline koostis tabelis 7.2.

Tabel 7.1

Mõningate duralumiiniumist külmtõmmatud varraste mehaanilised omadused

Mark (EN-AW)	Termotöötlus	Voolavuspiir $R_{p0,2}$ N/mm ²	Tõmbe- tugevus R_m N/mm ²	Katke- venivus A %
AlCu4MgSi	L	135	250	12
	K + LV	230	380	13
	K + KV	380	450	6
AlCu4Mg1	L	125	240	12
	K + LV	230	380	12
	K + KV	380	450	8

L – lõõmutamine; K – karastamine; LV – loomulik vanandamine;
KV – kunstlik vanandamine.

Tabel 7.2

Mõningate duralumiiniumsulamite keemiline koostis, % (EN 573)

Mark (EN-AW)	Cu	Mn	Mg	Si	Fe
AlCu4MgSi	3,5...4,5	0,4...1,0	0,4...1,0	0,2...0,8	0,7
AlCu4MgI	3,8...4,9	0,3...0,9	1,2...1,8	0,5	0,5
AlMnI Mgl	0,25	1,0...1,5	0,8...1,3	0,3	0,7

Töö käik

Töö raames duralumiiniumi termotöötuse läbiviimiseks saab üliõpilane duralumiiniumplekist riba (duralumiiniumi margi teatab õppejõud), mis pärast karastamist tükeldatakse vanandamiseks ettenähtud kuueks tükiks – katsekehaks.

1. Määrata duralumiiniumi HRB kõvadus lähteolekus. Selleks tuleb indikaatori suur osuti viia kokku C-skaala (must) nulliga, vastav kõvadusarv HRB aga lugeda B-skaalalt (punane).
2. Määrata kuumutustemperatuur antud sulamile joonis 7.2 alusel.
3. Seadistada ahi ning asetada riba ahju ja seisutada seal 20 minutit. Seejuures tuleb väga hoolikalt jälgida, et temperatuuri kõikumised kogu seisutusaja vältel ei ületaks ± 5 °C, sest liiga madala temperatuuri puhul ei lahustu duralumiiniumi lisandid täielikult, ülekuumutamise korral aga võib tekkida terade vahepiiride osaline sulamine.
4. Pärast 20-minutilist seisutamist võtta riba kiiresti ahjust välja ja karastada vees. Sel juhul ei jõua eralduda sekundaarne faas (CuAl_2) ning karastamisel säilib ühefaasiline α tardlahuse struktuur. Seejärel mõõta kõvadus ja lõigata riba vastava tükeldus-seadme abil kuueks katsekehaks. Järgneb katsekehade kunstlik vanandamine keevas vees temperatuuril 100 °C. Selleks asetada kõik kuus katsekeha korraga vette ja võtta sealt ükshaaval välja järgmiste ajavahemike järel: 1. – 0,5 min, 2. – 1 min, 3. – 3 min,

4. – 5 min, 5. – 10 min ja 6. – 20 min. Pärast väljavõtmist tähistada katsekehad numbritega.
5. Pärast vanandamist määrata kõigi katsekehade kõvadus, kanda saadud tulemused tabelisse 7.3 ja joonestada nende alusel (arvestades ka kõvadust karastatud olekus) graafik $HRB = f(t_{van})$.

Tabel 7.3

Katsetulemuste tabel

Termotöötlemise viis	Vanandamise kestus min	Kõvadus HRB		
		1.	2.	3. keskm
Enne karastamist	–			
Pärast karastamist	–			
Pärast vanandamist	0,5			
	1			
	2			
	jne			

Aruande sisu

1. Tiitelleht.
2. Töö eesmärk.
3. Duralumiiniumi keemilise koostise lühike iseloomustus ja Al-Cu faasidiagramm.
4. Duralumiiniumi termilise töötlemise ja toimuvate protsesside olemuse kirjeldus.
5. Töö käigu kirjeldus.
6. Katsetulemuste tabel ja graafik $HRB = f(t_{van})$.
7. Järeldused ja nende teoreetilised põhjendused.

Kontrollküsimused

1. Millised duralumiiniumi koostisse kuuluvad komponendid soodustavad sulami tugevnemist vanandamisel?
2. Kuidas muutub duralumiiniumi kõvadus karastamisel?
3. Miks kasvab kõvadus duralumiiniumi kunstlikul vanandamisel kiiremini kui loomulik vananemisel?

4. Mis toimub duralumiiniumi kunstlikul vanandamisel?
5. Mis olekus tuleks kasutada duralumiiniumist neete neetimisel?
6. Milline on Al-Cu-sulami struktuur pärast kuumutamist karastamisel?
7. Mis meetoditel valmistatakse duralumiiniumist detaile?
8. Milline on duralumiiniumi maksimaalne tugevus?
9. Milles seisneb duralumiiniumi ülevanemine?
10. Selgitage tähist AlCu4Mg1.

TÖÖ NR 8

PLASTIDE IDENTIFITSEERIMINE JA KÕVADUS

Töö eesmärk

1. Identifitseerida plasti väliste tunnuste ja füüsikalis-mehaaniliste omaduste põhjal.
2. Tutvuda mittemetalsete materjalide (plastide, komposiitide) kõvaduse määramise meetoditega (Rockwelli kõvadus).
3. Võrrelda tulemusi metalsete materjalide tulemustega.

Töö selgitav osa

Polümeeride olemus ja nende liigitus

Plastid on kõrgmolekulaarsete ühendite – polümeeride baasil valmistatud tehismaterjalid ning nad on tavaliselt kõrgendatud temperatuuri ja rõhu mõjul töötlemisfaasis plastsed. Plastkomposiidid on materjalid, mis koosnevad polümeersast maatriksist ning tugevdavast ehk armeerivast lisandist.

Rakendusomaduste järgi jaotatakse plastid tarbeplastideks, konstruktsiooniplastideks ja eriotstarbelisteks plastideks. Tarbeplastide levinuimad esindajad on polüeteen, polüpropeen, polüvinüülkloriid, polüstüreen ja fenoolformaldehüüdvaik. Konstruktsiooniplastideks on polükarbonaat, polüamiid, polüatsetaal, polüetüleentereftalaat, polümetüülmetakrülaat ja epoksüüdvaik. Eriotstarbelisteks plastideks on polüfenüüleensulfiid, polüeteereeterketoon, polüvinülideenfluoriid, polüimiid, polübensimidiasool. Päritolu järgi jagunevad polümeerid looduslikeks, modifitseeritud looduslikeks ja sünteetilisteks. Peaahela kuju järgi jagunevad lineaarse, hargnenud ja ristsillatud ahelaga polümeerideks.

Temperatuurile vastupanu järgi jaotatakse plastid termoplastideks ja termoreaktiivideks. **Termoplastid** on polümeerid, mis koosnevad lineaarsetest või hargnenud ahelatest, mille vahel ei ole keemilisi sidemeid, kuid esinevad füüsikalised sidemed. Termoplastid on toatingimustes tahked ja muutuvad kõrgematel temperatuuridel pehmemaks

ning deformeeritavamaks. Temperatuurist sõltuv pehmenemise-tahkumise protsess on täielikult pöörduv, s.t materjali võib korduvalt sulatada ja temperatuuri alandamisega taas tahkestada. Termoplastid on sageli **poolkristalsed** ehk **kristalliinsed** materjalid. Lineaarsed polümeeriahela segmendid võivad asetuda paralleelselt üksteise kõrvale ja moodustada kristalliite. Kristalliitide vahel paiknevad alati põimunud ahelate segmendid, mis moodustavad amorfse piirkonna. Seega sisaldavad kristalliinsed termoplastid nii korrastatud, kristalset osa kui ka korrastamata, amorfset osa. Termoplaste, mis ei ole suutelised kristalliite moodustama, nimetatakse **amorfseteks**.

Termoreaktiivid (ehk termosetid) tahkuvad pöördumatult keemilise reaktsiooni käigus, mis toimub erinevate monomeeride, nagu vaigu ja kõvendi vahel. Seetõttu on termosetid vormimisel palju voolavamad kui sulas olekus termoplastid. Kõvenemise järel moodustavad termosetid väga tihedalt ristsillatud võrgustikstruktuuri. Kuni iga kahekümnes peeahela aatom võib olla ristsillatud teise makromolekuli peeahela aatomiga. Termosetid on täielikult amorfssed materjalid, kristalliite nendes ei leidu. Ristsildade tõttu ei ole kõvendatud termosetid võimelised sulama ega voolama, toatemperatuuril on need materjalid tavaliselt haprad ja jäigad. Samas võivad termosetid kõrgematel temperatuuridel (pöörduvalt) pehmeneda, millega kaasneb jäikuse vähenemine kuni 100 korda.

Elastomeerid on sarnaselt termosettidega ristsillatud materjalid, ristsildamise tihedus on aga tunduvalt väiksem (ristsillatud on kuni iga 1000. peeahela aatom). Seetõttu moodustub hõredalt seotud võrgustikstruktuur. See tähendab, et väliste jõudude toimele võivad makromolekulid või nende osad üksteise suhtes teatavas ulatuses liikuda, kuid ristsillad takistavad püsivate deformatsioonide teket ja taastavad väliste mõjutuste lõppemise järel makromolekulide endise asetuse. Seetõttu võib elastomeere väga suures ulatuses deformeerida, ilma et tekiks jäävad deformatsioonid. Sarnaselt termosettidega ei saa elastomeerid ristsildade tõttu sulada ega muutu voolavaks. Enamik elastomeere on amorfssed.

Amorfset faasi polümeerides iseloomustab kaugkorrastatuse puudumine. See tähendab, et makromolekulide ruumilises paiknemises puudub regulaarsus, orientatsioon või ahelaosade konstantne vahekaugus. Korrastatuse puudumise tõttu ei hajuta ainult amorfset faasist koosnevad polümeerid nähtavat valgust (lainepikkus 0,4–0,7 μm) ja seetõttu on need materjalid tavaliselt läbipaistvad ja kirkad. Kuna tahkunud amorfsete makromolekulide struktuur on sarnane sulamaterjali makromolekulide omale, siis nimetatakse amorfset faasi ka alla-jahutatud või tahkunud sulamiks. Siiski, erinevalt tahkunud sulamist saavad sulaolekus liikuda terved makromolekulid või nende pikemad segmendid.

Mõnedes polümeerides võib tahkumisel tekkida osaline kaugkorrastatus. Materjalides esinevad piirkonnad, kus sirgestatud makromolekulid või nende osad paiknevad paralleelselt kindlatel vahekaugustel. Selliseid amorfse faasiga vahelduvaid korrastatud piirkondi nimetatakse kristalliitideks ja nii amorfset kui ka kristalset faasi sisaldavaid materjale **kristalliinseteks** ehk **poolkristalseteks**. Pikkade ahelate takerdumiste tõttu ei saa polümeer kunagi täielikult kristalluda, maksimaalselt võib kristallunud olla 80–90% materjalist.

See, kas polümeeris võib tekkida kaugkorrastatus ja kristallisatsioon, sõltub makromolekuli ehitusest. Kõige lihtsamini kristalluvad lineaarsed ja regulaarsed makromolekulid, millel puuduvad kõrvalrühmad ja hargnemised või need on väikesed ning korrapäraselt asetatud. Väga hästi kristalluvad HDPE¹ ja PTFE², millel kõrvalrühmad peaaegu puuduvad. PP³ kristallumine sõltub metüülgruppide asetusest: kui need paiknevad regulaarselt ühel pool peaaahelat (isotaktiline PP) või vaheldumisi mõlemal pool peaaahelat (sündiotaktiline PP), on kristalsusmäär tunduvalt suurem kui kõrvalrühmade juhusliku asetuse

¹ PE – polüeteen. Lühendid lühendi PE ees viitavad molekulahelate paigutusele ja tihedusele, ntVLDPE – *very low density PE* ehk eriti madala tihedusega PE, LLDPE – *linear low density PE*, MDPE – *medium density PE*, HDPE – *high density PE*.

² PTFE – polütetrafluoroetüleen, ehk teflon.

³ PP – polüpropüleen.

korral (atakiline PP). PE võime kristalluda kahaneb hargnemiste hulga kasvamisel, kuna viimased takistavad ebaregulaarsuse tõttu kristallisatsiooni: VLDPE < LLDPE, LDPE < MDPE < HDPE¹. Mitmed polümeerimaterjalid, nagu atakiline PVC, PMMA, PS⁴, ei kristallu aga üldse ebaregulaarselt asetuvate või suurte kõrvalrühmade tõttu.

Polümeeride füüsikalised omadused

Kaudselt võib kristalliinse materjali tiheduse arvutada kristalsusmäära kaudu, teades kristalse ja amorfse osa tihedusi. **Tihedus** ρ on defineeritud kui materjalikoguse massi m ja ruumala V suhe:

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (8.1)$$

Tiheduse ühikutena on tavaliselt kasutusel g/cm^3 või kg/m^3 . Tahkete polümeeride tiheduse määramise peamiseks meetoditeks on tiheduse gradiendiga kolonni meetod ja kaalumismeetod.

Kaalumismeetod (*immersion method*) on suhteliselt kiire ja lihtne ning omab ka piisavat täpsust. Meetod põhineb **Archimedese seadusel**, mis väidab, et „vedelikku asetatud kehale mõjuv üleslükkejõud võrdub selle keha poolt väljatõrjutud vedeliku kaaluga”. Tiheduse määramiseks kasutatakse analüütilist kaalu, mis on varustatud spetsiaalse rakisega proovi kaalumiseks nii õhus kui ka vedelikus (joonis 8.1). Kasutatava vedeliku tihedus peab olema proovi omast väiksem. Proov ise on tavaliselt 1–2 cm läbimõõduga ketas, mille mass on 1–2 g. Ketta kõik pinnad peavad olema tasased. Vastasel juhul võib pinnakonarustesse jääda õhumulle, mis muudavad vedelikus kaalumise tulemuse ebatäpseks. Kaalumisel kasutatava vedeliku ja tööruumi temperatuur peavad olema registreeritud ja pideva jälgimise all. Tööruumi temperatuur on tavaliselt 23 °C. Ka väikesed temperatuurikõikumised avaldavad tulemustele olulist mõju.

⁴ PVC – polüvinüülkloriid, PMMA – polümetüülmetakrülaat, PS – polüstüreen.

Protseduuri käigus kaalutakse proov kõigepealt õhus ja seejärel kohe vedelikus. Tihedus arvutatakse:

$$\rho = \frac{m_{S\delta} \cdot \rho_v}{m_{S\delta} - m_{Sv}}, \quad (8.2)$$

kus $m_{S\delta}$ on proovi mass õhus, m_{Sv} on proovi mass vedelikus ja ρ_v on vedeliku tihedus.

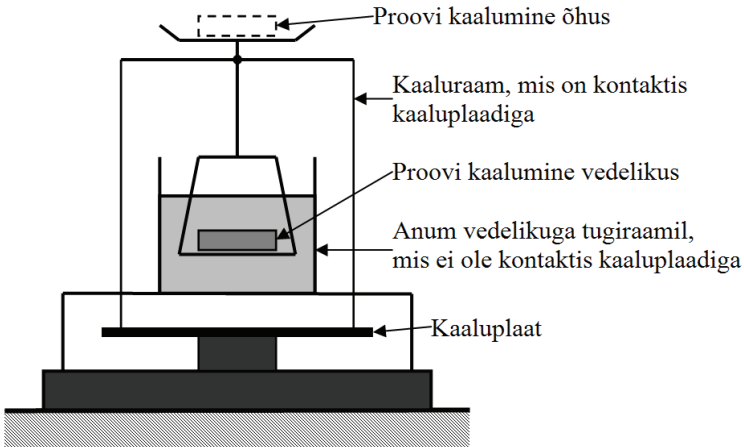
Tiheduse määramine mahu ja massi järgi

Alternatiivse, kuid suhteliselt ebatäpse meetodina võidakse kasutada lihtsamat mahu ja massi määramise meetodit:

- 1) kõigepealt määratakse proovi kaal, g;
- 2) määratakse proovi ruumala veega täidetud mensuuri abil, cm^3 .

$$\rho = \frac{m_{S\delta}}{V_v}, \quad (8.3)$$

kus V_v on proovi ruumala.



Joonis 8.1. Kaalumismeetod

Polümeeride mehaanilised omadused

Polümeermaterjalide mehaanilised omadused on metallidega võrreldes palju tundlikumad väliste mõjutuste suhtes, nagu temperatuur, jõu rakendamise ulatus ja kiirus, UV-kiirgus ja kemikaalid. Samuti on polümeeride elastsusmoodul keskmiselt kaks suurusjärku ja tugevus üks suurusjärg metallidest madalam. Samas iseloomustab polümeere võrdluses metallidega väga hea **tugevuse ja tiheduse suhe – eritugevus**, mis teeb need materjalid oluliseks kergekaaluliste rakenduste jaoks. Et polümeermaterjale õigesti kasutada, peab nende mehaanilist käitumist tundma ja rakendusi ka vastavalt kavandada oskama.

Termoplastsete polümeeridega (mille amorfne osa katsetingimustel kummiolekus on mittelineaarse viskoelastse käitumisega) on seotud järgmised deformatsiooniprotsessid:

- Amorfsetes polümeerides toimub ahelate orienteerumine ja viskoosne voolamine. Sellega kaasneb nihkepingetest mõjutatud **nihkevööde** tekkimine või mõranemine tõmbesuunaliste jõudude mõjul. Nihkevööd on mõradega sarnased piirkonnad materjalis, kus paksus väheneb ja orienteeritus kasvab. Erinevalt mõradest ei paikne need aga tõmbesuunaga risti, vaid teatava nurga all.
- Kristalliinsetes polümeerides algab viskoosne voolamine katsekehal **kaela** tekkimisega. See protsess kujutab endast pinge all oleva katsekeha ristlõike olulist kahanemist paralleelosa mingis lõigus. Kaela kasv jätkub, kuni kogu katsekeha paralleelosa materjal on ära kasutatud. Kaela tekke piirkonnas toimub polümeeri struktuuri intensiivne ümberkorraldamine. Superstruktuurid lagunevad, lamellid orienteeruvad tõmbesuunaliselt, volditud ahelate arv väheneb ning suureneb täielikult sirgestunud ahelate hulk. Kristalsusmäär kaela piirkonnas kasvab koos makromolekulide tõmbesuunalise orienteerumisega. Tõmbekatse lõpuks tekib pikk, õhuke ja tugev lint või kiud. Kõrge tõmbesuunalise korrastatuse tõttu on see lint esialgselt materjalist tugevam, mistõttu kasvab pinge tõmbekatse lõpus enne lindi purunemist.

Kõvadus

Enamlevinud mooduseks on kõvaduse mõõtmine indentori (otsaku) sissesurumise teel. Otsaku küllalt suure jõuga sissesurumise tagajärjel deformeeritakse materjali pinnakihti plastseltselt ning peale koormuse kõrvaldamist jääb materjali pinnale jälg. Elastsete materjalide korral ei pruugi mõõdetavat jälge jääda. Mida väiksem on kõvadus, seda sügavamale tungib otsak ja seda suurem on jälg. Polümeerimaterjalide puhul saadakse kõvadusarv otsaku sissetungimissügavuse järgi, s.t jälje suurust eraldi ei mõõdetata. Erinevalt metallidest on polümeeride puhul kõvadusarv väga suurel määral mõjutatud katsetustingimustest (katsekeha temperatuur ja niiskussisaldus) ja -metoodikast (koormamiskiirus, aeg, otsaku tüüp).

Analoogselt metalsete materjalidega kasutatakse plastide kõvaduse määramiseks otsaku (kuuli) sissesurumist materjali (kuulkõvaduse või Rockwelli meetod). Kasutatakse ka Barcoli meetodit, mille korral sissesurutavaks otsakuks on terasnõel.

Kuulkõvadus

Meetod seisneb kuuli surumises kindla jõuga F materjali pinda. Jälje sügavuse järgi leitakse jälje pindala S ning kuulkõvadus H :

$$H = \frac{F}{S} \quad (8.4)$$

Kasutatakse teraskuuli läbimõõduga 5 mm, eeljõudu 9,8 N (1 kgf), põhikoormusi 49, 132, 358 või 960 N (vastavalt 5, 15, 40 või 100 kgf); kõvadusarvu tähistatakse nt 170 H 358 (kõvadusarv 170 koormusel 358 N).

Kõvaduse määramine Rockwelli meetodil

On analoogne metallide kõvaduse määramisega Rockwelli meetodil (vt töö nr 2 metallide kõvaduse osa). Enamkasutatavamaks skaalaks on plastidel Rockwelli kõvaduse korral M-skaala: kuul läbimõõduga 6,35 mm, jõud 980 N (100 kgf). Kõvadusarvu tähistatakse nt 85 HRM. Kõvadusarv (HR) saadakse:

$$HR = N - \frac{h}{c}, \quad (8.5)$$

kus h – otsaku sissetungimise sügavus;

N – skaalale omane konstant (koonuse puhul $N = 100$; kuuli puhul $N = 130$);

c – skaalajaotis 0,002 mm; 0,001 HRN ja HRT puhul.

Kõvaduse tähistus Rockwelli meetodi korral, sõltuvalt kasutatavatest koormustest ja indentori mõõtmetest (kuuli läbimõõdust), on toodud tabelis 8.1.

Tabel 8.1

Plastide kõvaduse tähistus Rockwelli meetodi korral

HRE	Kuuli läbimõõt mm	Eelkoormus kgf	Põhikoormus kgf	Konstant N	Skaala
HRL	6,35	10	60	130	Punane*
HRM	6,35	10	100	130	Punane
HRR	12,7	10	60	130	Punane
HR15Y	12,7	3	15	130	Punane
HR15X	6,35	3	15	130	Punane

Lugemi võtmisel tuleb arvestada, et seadme skaala on 100 ühikut (kõvaduskaala ulatus 130 ühikut). Seega tuleb olla tähelepanelik näitude < 30 korral ja veenduda, et tegemist ei ole kõvadusarvuga **100 + näit**. Näiteks HRR skaala korral on PA tulemus umbes 20, tegelik on aga $100 + 20 = 120$.

Barcoli meetod kõvaduse määramiseks

Barcoli meetod seisneb vedru toimel terasest teraviku materjali sisseurumises. Kaasaskantavat katseseadet nimetatakse Barcoli kõvadusmõõturiks ehk duromeetriks, mille mõõteskaala on 0–100. Mõõtmiseks kasutatav standard ASTM D2583 võimaldab Barcoli kõvadusmõõturiga määrata nii plastide kui ka armeeritud komposiitplastide kõvadust. Lisaks kasutatakse seda ka vaigu lõpliku kõvenemise määramisel. Termoreaktiivne vaik on saavutanud oma lõpliku kõvaduse, kui selle kõvadus on saavutanud vähemalt 90% pinnakõvadusest.

Töö käik

Plastide identifitseerimine

- Hinnata plastide läbipaistvust.
- Lõigata plasti noaga ja/või proovida viilida ning hinnata materjali lõiketöödeldavust.
- Määrata katsekehade mass ja ruumala ning arvutada tihedus.

Plasti läbipaistvust hinnatakse visuaalselt ning võrreldakse hindamise tulemusi tabelis 8.5 antud andmetega ning tehakse selle põhjal esialgne otsus materjali tüübi kohta. Täidetakse tabel 8.2.

Plastide lõiketöödeldavus tehakse kindlaks noaga laastu lõikamise teel või viiliga viilides. Erinevate materjalide küljest laastu lõigatavuse raskusastet hinnatakse ning võrreldakse hinnangut tabelis 8.5. tooduga ning otsustatakse, milline materjalidest on tarbe-, konstruktsiooni- või eriplast. Täiendatakse tabelit 8.2.

Tiheduse määramiseks valemi (8.1) järgi kasutatakse kaalumis-meetodit, mis on suhteliselt kiire ja lihtne ning omab ka piisavat täpsust.

Tiheduse määramine mahu ja massi järgi:

- 1) kõigepealt määratakse katsekeha kaal, g;
- 2) seejärel katsekeha ruumala veega täidetud mensuuri abil, cm^3 .

Selleks fikseerida veega täidetud mensuuri algnäit. Asetatakse katsekeha traadist konksu otsa silindrisse, uputatakse katsekeha täielikult traadi abil. Määratakse mõõteskaalalt vee mahu muutus.

Valemi (8.2) järgi arvutatakse katsekeha tihedus.

Arvutatud tihedusi võrreldakse tabelis 8.5 toodud andmetega ning selle põhjal tehakse lõplik otsus, millistest polümeeridest on katsekehad valmistatud. Täidetakse tabel 8.3.

Plastide kõvadusteim

Mõõta antud plastide kõvadus Rockwelli meetodil.

Arvutuslik-analüüsivas osas

- Leida sobiv kõvadusskaala kõvade ja pehmetele plastidele.

- Järjestada materjalid kõvaduse alusel, võrrelda metallse materjaliga (määrab õppejõud).
- Tulemused esitada aruandes tabeli 8.4 kujul.

Tabel 8.2

Plastide läbipaistvus ja lõigatavus

ID nr	Värv ja läbipaistvus			Tulemus	Laastu lõikamine		Tulemus
	Kirgas, läbipaistev	Hägune, läbipaistev	Värvitu, läbipaistev		Kerge	Raske	

Tabel 8.3

Plastide tihedus

ID nr	Katseliselt määratud	Katseliselt määratud	Arvutatud tihedus	Tabelist 1	Tabelist 1
	Mass õhus g	Maht cm ³	g/cm ³	Võrreldav tihedus g/cm ³	Identifitseeritud materjal

Tabel 8.4

Plastide kõvaduse määramise tulemused

Plast	HRE (3,175/100)	HRL (6,35/60)	HRM (6,35/100)	HRR (12,7/60)	HR15X (6,35/15)	HR15Y (12,7/15)

Barcoli kõvaduse määramine

Kõvaduse määramiseks asetatakse katsekeha Barcoli kõvadusmõõduri otsaku alla ja seejärel rakendatakse ühtlast survejõudu kuni mõõteskaalal olev osuti on jõudnud maksimaalse väärtuseni. Mõõtejälje sügavus muudetakse Barcoli skaala absoluutväärtuseks.

Töö lõpetamine

Pärast laboritööd korjake kokku töövahendid ja korrastage töökohad.

Kontrollküsimused

1. Milline oli katsetud plastidest suurima kõvadusega? Selgitage omaduste ja molekulaarstruktuuri vahelisi seoseid.
2. Kas suurima kõvadusega materjal on ka suurima kraapekindlusega? Miks?

3. Mis põhjustab läbipaistvate plastide läbipaistvuse muutuse nende deformeerimisel?
4. Selgitage kristalliinsuse/amorfsuse mõistet.
5. Kuidas saab polümeeride kõvadust suurendada?
6. Kuidas mõjutab polümeeride kõvadust temperatuur ja deformeerimise kiirus?
7. Miks praguneb värvipigmentiga polüpropüleenist aiameebel peale pikaajalist tarvitamist tugevas päikesevalguses?
8. Millised on Barcoli meetodi eelised Rockwelli meetodi ees ja vastupidi?
9. Kas kaalumismeetodiga saab määrata materjalide tihedust, mille erikaal on väiksem kui 1000 kg/m^3 ? Tooge põhjendus.

Tabel 8.5

Plastide välised omadused

Ostarve	Materjali tähis	Polümeeri nimetus	Tihedus g/cm ³	Pinna kõvadus		Värvus ja läbipaistvus		
				küüs kriimustab	laastu lõikamine	läbipaistev nagu klaas	hägune, läbipaistev	värvitud, ei paista läbi
tarbeplast	PE-LD	Polüeteen madaltihe	0,91-0,93	jah	kergelt		X	X
tarbeplast	PE-MD	Polüeteen kesktihe	0,93-0,94	jah	kergelt		X	X
tarbeplast	PE-HD	Polüeteen kõrgtihe	0,94-0,97	jah	kergelt		X	X
tarbeplast	PP	Polüpropeen (polüpropüleen)	0,90-0,91	jah	kergelt		X	X
tarbeplast	PVC, suur kõvadus	Polüvinüülkloriid kõva	1,38-1,44	ei	halvasti, lõheneb	X		X
tarbeplast	PVC, madal kõvadus	Polüvinüülkloriid pehmendatud	1,20-1,35	jah	kergelt	X		X
tarbeplast	PVDC	Polüvinüülideenkloriid	1,60	ei	kergelt	X		X
tarbeplast	PS	Polüstüreen	1,04-1,05	ei	halvasti, lõheneb	X		X
tarbeplast	S/B	Stüreen-butadienkopolümeer	1,05	ei	raskesti, jõuga		X	X
konstruktsioonioplast	SAN	Stüreen-akrüülnitriilkopolümeer	1,08	ei	raskesti, jõuga			X
konstruktsioonioplast	ABS	Akrüülnitriil-butadien-stüreenkopolümeer	1,04-1,12	ei	raskesti, jõuga		X	X
konstruktsioonioplast	PMMA	Polümetüülmetakrülaat	1,17-1,20	ei	raskesti, jõuga	X		X

Tabeli 8.5 järg

konstruktsiooni	PA 6	Polüamiid 6	<i>1,19-1,21</i>	ei	raskesti, jõuga	X	X
konstruktsiooni	PA 66	Polüamiid 66	<i>1,14</i>	ei	raskesti, jõuga	X	X
konstruktsiooni	PA 11	Polüamiid 11	<i>1,04</i>	ei	raskesti, jõuga		X
konstruktsiooni	PA 12	Polüamiid 12	<i>1,02</i>	ei	raskesti, jõuga		X
konstruktsiooni	POM-C	Polüoksumetüleen	<i>1,41</i>	ei	raskesti, jõuga	X	X
konstruktsiooni	POM-H	Polüoksumetüleen	<i>1,43</i>	ei	raskesti, jõuga	X	X
konstruktsiooni	PC	Polükarbonaat	<i>1,19-1,20</i>	ei	raskesti, jõuga	X	X
konstruktsiooni	PET, PETP	Polüetüleentereftalaat	<i>1,37</i>	ei	kergelt	X	X
konstruktsiooni	PBT, PBTP	Polübutüleentereftalaat	<i>1,29</i>	ei	kergelt	X	X
eriplast	PSU	Polüsulfoon	<i>1,24</i>	ei	raskesti, jõuga	X	X
eriplast	PES	Polüeetersulfoon	<i>1,37</i>	ei	raskesti, jõuga		X
eriplast	PEEK	Polüeeterketoon	<i>1,31</i>	ei	raskesti, jõuga		X
eriplast	PTFE, PCTFE	Polütetrafluoretüleen (teflon)	<i>2,15-2,30</i>	ei	kergelt	X	

TÖÖ NR 9

TEHNOKERAAMIKA

TEHNOLOOGIA JA OMADUSED

Sissejuhatus

Tehnokeraamika all mõeldakse kaasaegseid rasksulavate ühendite baasil valmistatud tööriista- ja eriomadustega konstruktsioonimaterjale. Sellega eristatakse tehnokeeraamika ehituskeraamikast (tellised, seinaja- ja põrandaplaadid jt) ühelt poolt ja tarbekeraamikast (fajanss-, portselan-, savinõud jt) teiselt poolt.

Tehnokeraamika üldisteks positiivseteks omadusteks on suur kuumus- ja termopüsivus (keemilise koostise stabiilsus temperatuuri muutudes), korrosiooni- ja tulekindlus, suur kõvadus ja kulumiskindlus, väike tihedus.

Tehnokeraamika üldine puudus on väike painde- ja tõmbetugevus ($300\text{...}500 \text{ N/mm}^2$), suur haprus (kriitiline purunemissitkus K_{Ic} on vahemikus $4\text{...}6 \text{ MPa m}^{1/2}$), omaduste suur hajuvus (Weibulli moodul < 8), raske töödeldavus, kõrge hind.

Töö eesmärk

Tutvuda tehnokeeraamika valmistamistehnoloogia ja omadustega.

Töö selgitav osa

Tehnokeeraamika koosneb põhiliselt rasksulavaist ühendeist (oksiidid, karbiidid, boriidid, nitriidid jne), mille sulamistemperatuur on $>1500 \text{ }^\circ\text{C}$. Rasksulavate ühendite omadused sõltuvad aatomitevaheliste keemiliste sidemete tugevusest ja kristallivõre struktuurist.

Rasksulavad ühendid jagatakse oksiidideks ja hapnikku mittesisaldavateks.

Hapnikku mittesisaldavad rasksulavad ühendid, mida kasutatakse tehnokeeraamikas, on karbiidid, boriidid, nitriidid ja silitsiidid. Üleminekugrupi metallide (IV...VI grupp) baasil rasksulavail ühendeil –

karbiididel ja nitriididel on reeglina sisendustüüpi ruumkesendatud (K8) ja tahkkesendatud kuupvõre (K12) või kompaktned heksagonaalvõre H12 ($c/a \leq 1,633$). Mittemetalli aatomid asetsevad metalli aatomite vahelistes tühimikes. Metall ja mittemetalli aatomite vahel on tugevad kovalent- ja ioonsidemed, mis muudab oluliselt komponentide individuaalsust ja füüsikalisi omadusi. Ühendeil on märksa kõrgem sulamistemperatuur, elastsusmoodul, kõvadus ja väiksem joonpaisumistegur.

Boriidid ja silitsiidid on keerulise asendustüüpi kristallivõrega (heksagonaalne, tetragonaalne, rombiline jm).

Tehnokeraamika liigitus

Tehnokeraamilisi materjale liigitatakse mitmeti. Enam kasutamist on leidnud liigitamine keemilise koostise ja kasutusala järgi.

Keemilise koostise järgi jaotatakse kolme gruppi:

Oksiidkeraamika (Al_2O_3 , MgO , ZrO_2)

Oksiidkeraamika aluseks on oksiidid Al_2O_3 , MgO , ZrO_2 , SiO_2 , TiO_2 , BeO jt. Kui metall, mis oksiide moodustab, on mitmevalentne, siis moodustuvad mitu erineva hapnikusisaldusega oksiidi (näiteks TiO , TiO_2). Püsiva valentsusega oksiidid on reeglina dielektrikud. Oksiidid on kõrge sulamistemperatuuriga, suure kuumuspüsivusega, kuid väikese termokindlusega (vastupanuga termilistele löökidele).

Mitteoksiidkeraamika

- **Karbiidkeraamika** põhineb karbiididel, mis on struktuurilt ja füüsikalise-keemiliste omaduste poolest tüüpilised sisendustüüpi keemilised ühendid (välja arvatud SiC). Kõige stabiilsemad on IV ja V rühma karbiidid. Neil on $NaCl$ tüüpi tahkkesendatud kuupvõre. VI grupi karbiididel (Cr , Mo ja W) on rombiline (Cr_3C_2) või kompaktned heksagonaalvõre (Mo_2C , WC). Nendel karbiididel on tugevamad metallsed omadused.
- **Nitriidkeraamika** põhineb nitriididel, mis on struktuurilt ja füüsikalise-keemilistelt omadustelt sarnased karbiididega. Metal-se sideme osakaal nitriidides on suurem kui karbiidides, kus

määravaks on tugev iooniline side metalli ja süsiniku aatomite vahel. Metalse sideme suuremale osakaalule vihjab nitriidide madalam sulamistemperatuur ja parem elektrijuhtivus. Nitriidide mikrokõvadus on väiksem kui karbiididel ja langeb igas grupis elemendi aatomnumbri suurenedes, mis ka viitab ioonse sideme MeN nõrgenemisele. Tehnokeraamikas kasutatakse järgmisi nitriide: Si_3N_4 , AlN ja BN.

- **Boriidkeraamika** põhineb boriididel, mis on asendustüüpi kristallivõrega keemilised ühendid. Boori aatomid võivad olla valentselt seotud või üksteisest isoleeritud. Seepärast on boriidide kristallivõre keerulisema (heksagonaalne, rombiline, tetragonaalne) kujuga. Tehnokeraamikas kasutatakse TaB_2 , TiB_2 , ZrB_2 .
- **Silitsiidkeraamika** põhineb silitsiididel, mis on räni ja IV...VI rühma metallide keemilised ühendid. Silitsiidid on asendustüüpi keeruka kristallivõrega keemilised ühendid, kus valdav on kovalentne side räniaatomite vahel. Nad on füüsikalis-keemiliste omaduste poolest lähedased boriididele. Neil on hea soojus- ja elektrijuhtivus, happe- ja leelisekindlus. Näiteks, MoSi_2 ei oksüdeeru õhus kuumutamisel kuni 1700 °C-ni.
- **Segakeraamika** aluseks on kahe või enama rasksulava ühendi segu, näiteks
 - * karbiidnitriidkeraamika,
 - * oksiidkarbiidkeraamika ja
 - * oksiidnitriidkeraamika.

Keraamilised komposiidid

Keraamilisteks komposiitmaterjalideks nimetatakse liitmaterjale, mis koosnevad keraamilisest maatriksist ja tugevdavast faasist (armatuurist). Viimaseks võib olla rasksulav metall (W, Mo jt) või -ühend (WC, SiC, Al_2O_3 jt). Keraamilisi komposiite iseloomustab lisaks keraamikale omasele suurele kõvadusele ja survetugevusele ka rahuldav tõmbetugevus ja löögisiskus.

Tehnokeraamika tehnoloogia

Tehnokeraamika valmistamiseks kasutatakse enamasti traditsioonilise pulbermetallurgia meetodit, millest tehnokeeraamika tehnoloogia erineb eelkõige pulbrite valmistamise, paagutamise ja täiendava töötlemise poolest. Heade füüsikalise-mehaaniliste omadustega tehnokeeraamika saamiseks on vajalikud puhtad (kontrollitava koostisega) peened pulbrid.

Pulbrite saamine

Rasksulavad ühendid, mida kasutatakse lähtematerjalina tehnokeeraamikas, peale oksiidide (SiO_2 , MgO , CaO , TiO_2) looduses vabal kujul ei esine. Ka oksiide tuleb eelnevalt töödelda, enne kui neid saab kasutada tehnokeeraamikas.

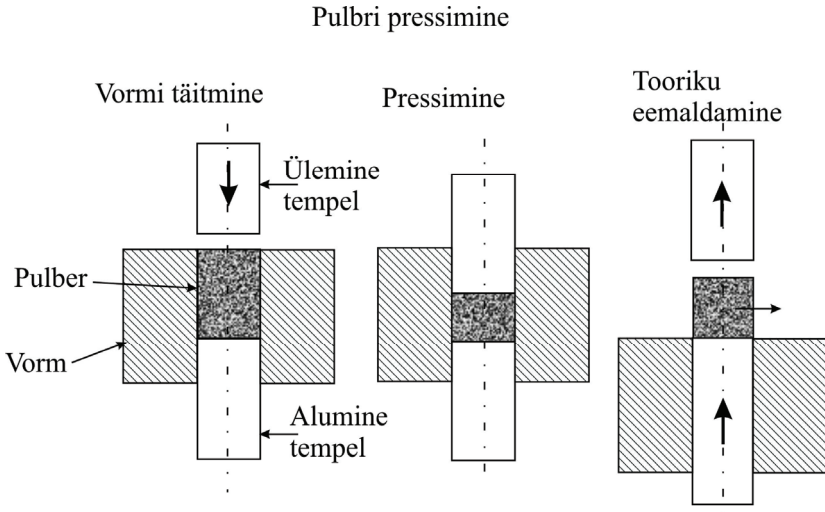
Pulbrite saamine seisneb rasksulava keemilise ühendi sünteesis ja vajaduse korral sünteesil saadud pulbri täiendavas mehaanilises peenestamises. Levinumad keeraamiliste pulbrite valmistamismeetodid on sadestamine soolalahustest, sool-geel protsess, aurufaasist kondenseerumine, laser- ja plasmakeemiline süntees, kõrgetemperatuuriline iselevi protsess. Kasutatakse ka jahvatamist kuul- ja vibroveskeis ning attriitoreis nii iseseisva valmistamisviisina kui ka mõne eelneva saamisviisi täiendusena. Igal saamisviisil on omad positiivsed ja negatiivsed küljed. Saamisviisi valikul lähtutakse keeraamikale esitatavatest nõuetest ja omahinnast.

Vormimine

Keeraamiliste pulbrite vormimiseks kasutatakse kõiki pulbertehnoloogias kasutatavaid vormimismeetodeid (pressvormi pressimine, loblivalamine, pulbersurvevalamine, ekstrudeerimine, kuumpressimine, isostaatiline kuumpressimine jt). Siin antakse ainult lühikävaade koos mõningate iseärasustega, mis kaasnevad keeraamika vormimisel.

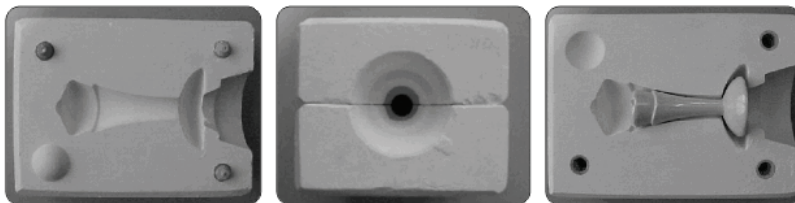
Pressvormi pressimine (vt joonis 9.1) on levinuim vormimisviis. Kuna keeraamilised pulbrid on kõvad ja haprad, siis pressimise hõlbus-

tamiseks ja pressise (tooriku) koospüsimiseks lisatakse enne pressimist plastifikaatoreid, mis kuumutamisel eemalduvad materjalist täielikult. Sellisteks plastifikaatoriteks on tavaliselt mitmesugused orgaanilised ained, nagu parafiin, polüetüleenglükool, polüvinüülpiiritus jt.



Joonis 9.1. Vormimine pressvormi pressimisel

Lobrivamine (vt joonis 9.2) on teine kasutatavaim vormimisviis. Selleks lisatakse pulbrisegule vajalikus koguses vedelikku, mis tagab pulbrimassi (lobri) voolavuse vormi. Pulbrimass valatakse poorsesse kipsi või keraamilisse vormi. Liigne vedelik imub vormi pooridesse ja peale kuivamist võetakse toorik vormist välja. Protsess võimaldab vormida väga keerulise kujuga detaile. Protsessi puuduseks on väike tootlikkus ja tooriku suur poorsus ning sellest tulenevalt suur kahanemine paagutamisel, kuju moonutused ja madalad mehaanilised omadused.



Joonis 9.2. Lobrivalu etapid vasakult paremale: vormi pool, koostatud vormipooled, paagutatud toode vormis. Fotod: *Dynamic-Ceramic Ltd*

Lobrivalu üheks eriliigiks on kuum lobrivalu, kus pulbrisegu muutub kuumutamisel vedelaks (lobriks), kuna lisatud parafiin, polüvinüülpüiritus või vaha sulavad. Peale valamist vorm jahtub ja tooriku saab vormist välja võtta.

Keraamiliste toodete saamiseks kasutatakse ka ekstrudeerimist ja pulbersurvevalamist.

Paagutamine ja põletamine

Paagutamine on tähtsaim tehnoloogiline operatsioon, kuna sellest sõltuvad keraamika füüsikalised-mehaanilised omadused. Kaitsegaasi keskkonnata termilist töötlemist nimetatakse põletamiseks.

Tehnokeraamika on raskesti paagutatav, kuna kovalentsete ja ioonsete keemiliste sidemete tõttu on materjalide tihendamiseks vajalikud difusiooniprotsessid raskendatud. Seepärast tehnokeraamikas kasutatakse vähem normaalrõhul ehk rõhuta paagutust, mis on enamlevinud metallipulbritest toodete paagutamisel. Rõhuta paagutus sobib vähem vastutusrikaste detailide valmistamiseks, eelkõige protsessi odavuse tõttu. Tehnokeraamika valmistamiseks on levinumad järgmised paagutusviisid:

- aktiveeritud paagutus,
- reaktsioonpaagutus,
- isostaatiline kuumpressimine,
- survepaagutamine,
- kuumpressimine,
- mikrolainepaagutamine,

– laserpaagutus.

Aktiveeritud paagutamine võimaldab saada suurema tihedusega keraamikat tänu paagutamist aktiveerivate lisandite sisseviimisele, ultradisperssete, nanopulbrite jne kasutamisele. Tehnokeraamikas kasutatakse lisandeid, mis kiirendavad paagutusprotsesse.

Reaktsioonpaagutamine on mitmekomponentse süsteemi tardfaasiline paagutamine, millega kaasneb keemilise ühendi teke paagutamise käigus. Näiteks, peene Si-pulbri kuumutamisel lämmastikku sisaldavas keskkonnas tekib paagutuse käigus Si_3N_4 . Reaktsioonpaagutuse teel on võimalik saada keeruka kujuga detaile (turbiinilabad, düüsid jne), mis ei vaja täiendavat mehaanilist töötlemist. Et reaktsioonpaagutus saaks toimuda, peab toorik olema poorne. Seejärel detailid vormitakse lobri- või pulbersurvevalu meetodil. Meetodi puuduseks on saadava keraamika suur poorsus (20...30%) ja sellest tulenevalt madalad mehaanilised omadused ja kulumiskindlus. Protsessi eeliseks on mõõtmete muutumatus paagutuse käigus.

Isostaatiline kuumpressimine on selline paagutusviis, kus samaaegselt kuumutamisele lisatakse poorsuse likvideerimiseks isostaatiline surve. Selleks keraamiline pulber tihendakse või pressitakse, suletakse hermeetiliselt õhukesest metallist (Mo või W) kapslisse, hermeetiseeritakse ja paagutatakse isostaadis temperatuuril kuni 1900 °C ja rõhuga kuni 400 MPa. Meetod võimaldab saada peaaegu poorideta keraamikat.

Survepaagutamine on eelnevast odavam poorideta keraamika saamise viis. Selle meetodi järgi pressised eelnevalt paagutatakse, nagu tavaliselt, kuni pooride sulgumiseni ja seejärel antakse ahju inertset gaasi (Ar , N_2) rõhuga 6...15 MPa. Survepaagutamist kasutatakse laialdaselt nitriidide (Si_3N_4 , AlN) valmistamiseks. Nende materjalide paagutamine N_2 rõhu all välistab ka nitriidide lagunemise kõrgel temperatuuril. Kõrgetemperatuurilise paagutuse eeliseks tavalisega võrreldes, on see, et kasutatakse vähem paagutuse stimulaatoreid, suurendades sellega keraamika kuumuskindlust.

Survepaagutamisel ei saa likvideerida pindmisi defekte.

Kuumpressimine on pulbrite pressimine temperatuuridel $0,5 \dots 0,9 T_s$ ja survetel kuni 50 N/mm^2 . Tänu välisjõu lisamisele toimub keraamilise materjali tihenemine palju intensiivsemalt kui tavalise pressimise ja sellele järgneva paagutamisega. Kuumpressimine võimaldab saada praktiliselt poorideta materjale ka kõige halvemini paagutatavatest keraamilistest pulbriest. Sageli on see ainus meetod mittepoorse keraamika saamiseks (B_4C , BN, SiC). Meetod võimaldab saada ainult lihtsa kujuga detaile ja vajab suurt hulka pressvorme, kuna pressvormi saab kasutada ainult üks kord.

Täiendav töötlemine

Sageli pole vormimisega ja sellele järgneva paagutamisega võimalik saada vajaliku kuju ja täpsusega ning siledusega tooteid. Seepärast tuleb tehnokeamikat mõnikord täiendavalt töödelda. Suure kõvaduse ja hapruse tõttu on tehnokeamika raskesti töödeldav ja seetõttu töömahukas ning kallis, moodustades keeruliste detailide puhul kuni 80% detaili maksumusest. Käesoleval ajal kasutatakse mitmeid meetodeid tehnokeamika töötlemiseks. Need on mehaanilised (abrasiivtöötlemine ja vee-abrasiivjoaga töötlemine), keemilised (söövitamine), elektrilised (elektroerosioontöötlemine), füüsikalised (laserkiirega töötlemine, elektronkiirega töötlemine, ionikiirega töötlemine).

Tehnokeamika omadused

Tehnokeamika tähtsamad omadused on tugevus, kõvadus, purunemissitkus ja kulumiskindlus.

Tehnokeamikal on unikaalsed omadused traditsiooniliste konstruktsioonimaterjalidega võrreldes. Tabelis 9.1 on toodud keraamiliste materjalide võrdlus metallide ja plastidega.

Tabel 9.1

Tehnokeraamika võrdlus muude konstruktsioonimaterjalidega

Omadus	Keraamika	Metall	Plast
Kõvadus	↑↑↑	↓↓	↓↓↓
Elastusmoodul	↑↑↑	↑↑	↓↓
Tugevus kõrgel temperatuuril	↑↑	↓	↓↓↓
Soojuspaisumistegur	↓↓	↑↑	↑↑
Sitkus	↓↓↓	↑↑	↑↑
Korrosioonikindlus	↑↑	↓↓	↓↕
Kulumiskindlus	↑↑	↓↓	↓↓
Elektrijuhtivus	↕	↑↑	↓↓
Tihedus	↓↓	↑↑	↓↓↓
Soojusjuhtivus	↕	↑↑	↓↓

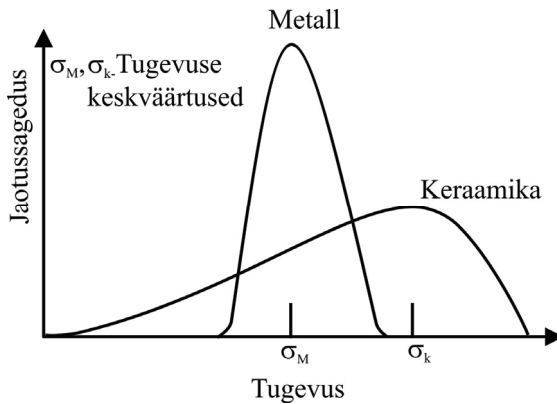
↑ suur ↓ väike ↕ varieerub laias vahemikus

Tugevus

Tugevus on tehnokeeraamika olulisim omadus. Suhteliselt väike tugevus ja suur haprus on peamised tegurid, mis takistavad keeraamika laialdasemat kasutamist.

Keraamika on habras, kuna tal puudub täielikult võime plastselt deformeeruda toatemperatuuril ja isegi kõrgetel temperatuuridel. Teoreetiliselt peaks keeraamika olema kõige suurema tugevusega materjal, kuna aatomite vahel on valdavalt kovalentsed ja ioonsed sidemed, mis on suurima tugevusega.

Erinevalt metalletest materjalidest jaotub katseliselt määratud keraamilise materjali surve- ja paindetugevus teatava statistilise seaduspärasuse kohaselt. Keraamiliste materjalide tugevuse kirjeldamiseks kasutatakse nn “nõrgima lüli mudelit”. Selle kohaselt on keraamilise materjali tugevus määratud defektide jaotusega ja defektide kriitilise suurusega. Mudel seletab keraamiliste materjalide omaduste suhteliselt suurt hajuvust. Tuleb tähele panna, et omadused võivad erinevate tooteseeriade vahel hajuda tunduvalt enam kui ühe tooteseeria sees. Materjali purunemise tõenäosuse ja sellele vastava mehaanilise koormuse kirjeldamiseks on kasutusele võetud suurus, mida nimetatakse Weibulli mooduliks (m) “nõrgima lüli” tugevus-teooria rajaja Weibulli järgi. Weibulli mooduli väärtus iseloomustab omaduste hajuvust, võttes arvesse materjali tugevuspiiri σ_0 , millele vastab purunemise tõenäosus 63,2%. Mida suurem on Weibulli mooduli väärtus, seda ühtlasemalt on “defektid” jaotunud materjalis ning seda kitsam on jaotust iseloomustav vahemik graafikul. Tänapäeval suudetakse tehnokeeraamika valmistamisel jõuda väärtuste vahemikku $10 < m < 20$.



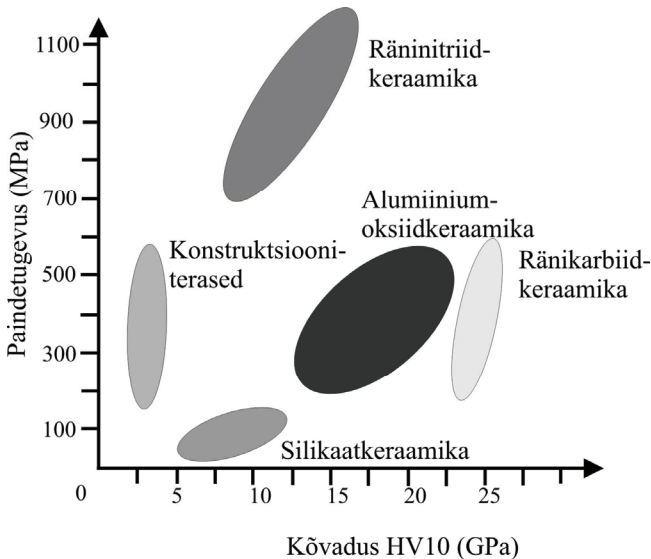
Joonis 9.3. Metallide ja keraamika tugevusomaduste hajumine

Kuna keraamiliste materjalide survetugevus on 5...10 korda suurem kui paindetugevus, võetakse seda toote projekteerimisel arvesse ja

välditakse võimalusel olukorda, kus keraamiline materjal peab taluma suuri tõmbepingeid.

Kõvadus

Tehnokeraamika kõvadus on üldiselt vahemikus 1200...3000 HV. Nad on tunduvalt kõvemad kui metallid, mille baasil nad on moodustunud. Joonisel 9.4 toodud graafikul on erinevate enamlevinud keraamiliste materjalide kõvadus ja paindetugevust võrreldud konstruktsiooniterase vastavate näitajatega.



Joonis 9.4. Keraamiliste materjalide paindetugevus kõvadus võrdluses metallidega

Keraamika kõvadus väheneb temperatuuri tõusuga, kuid vähem kui kermiste kõvadus. Kõvaduse langus temperatuuri tõusuga määrab kaudselt ära materjali maksimaalse kasutamistemperatuuri.

Kulumiskindlus

Kulumiskindlus on teine tehnokeeraamika tähtsamaid omadusi. Keraamika kulumiskindlus sõltub materjali kõvadusest ja löögisitkusest ning töötingimustest, kus keraamikat kasutatakse. Ühtedes tingimustes võib ta olla väga töökindel, kuid teistes väikese töökindlusega. Näiteks, hõõrdkulumisel on keraamika kulumiskindlus võrreldav WC-Co kermiste kulumiskindlusega, kuid erosioonkulumisel abrasiivosakeste joas jääb enamik keraamikat suure hapruse tõttu kermistele alla, kuigi nad on kõvemad kui kermised.

Ainult kuumpressitud B_4C ja Si_3N_4 ületavad erosioonikindluselt WC-Co kermiseid märgatavalt. Keraamika erosioonkulumise kiirus sõltub oluliselt abrasiivosakeste kiirusest (kineetilisest energiast) ja kohtumisnurgast.

Hõõrdepaarides toimuvad protsessid on seotud nii mehaanilise kulumise kui ka difusiooni- ja tribotehniliste protsessidega. Hõõrdepindade kulumine võib toimuda hapra purunemise, väsimuse või abrasiivi ja adhesiooniprotsesside tagajärjel. Seega, keraamika hõõrdekulumine on keeruline, mitmefaktoriline protsess. Tuleb eristada hõõrdepaari materjalide iseloomu: keraamika-keraamika või keraamika-teras. Keraamika-keraamika puhul sõltub keemiline vastasmõju ainult väliskeskkonnast.

Põhilised tehnokeeramised materjalid

Tänapäeval kõige sagedamini kasutatav tehnokeeraamika on valmistatud Al_2O_3 , ZrO_2 , MgO , Si_3N_4 , AlN ja SiC baasil. Nende omadused sõltuvad suuresti keemilisest koostisest ja valmistamistehnoloogiast (tabel 9.2).

Tabel 9.2

Tehnokeraamiliste materjalide omadused

Omadus	Al ₂ O ₃	ZrO ₂ ¹	ZrO ₂ ²	Si ₃ N ₄ ³	Si ₃ N ₄ ⁴	AlN	SiC ⁵	SiC ⁶	B ₄ C
Tihedus g/cm ³	3,8	5,7	6,05	6	3,2	3,3	3,1	3,2	2,5
Poorsus %	0	0	0	20	0	0	0	0	0
Kõvadus HV	2000	1300	1350	1300	1600	1200	2200	2500	3000
Surve- tugevus GPa	2,5	2	2	0,8	2,8	2,1	0,7	2,7	2,6
Painde- tugevus GPa	0,5	1	1,4	0,3	0,9	0,4	0,3	0,6	0,4
Elastsus- moodul GPa	320	205	250	120	320	310	410	450	450
Purunemis- sitkus MPa*m ^{1/2}	4	10	10	2,5	7	6	3,2	4	3
Maks. töö- temperatuur °C	1900	1200	2000	1400	1100	1000	1400	1600	1500
Joonpaisu- mistegur 10 ⁻⁶ 1/K	8	11	11	3,3	3,4	5,6	5,8	5,8	
Soojus- juhtivus W/ m K	29	2	2	10	35	180	110	180	45
Elektri- takistus Ω cm	10 ¹⁴	10 ⁹	10 ⁹	10 ¹⁵	10 ¹³	10 ¹⁴	0,2	100	0,2

ZrO₂¹ - Y₂O₃ stabiliseeritudZrO₂² – kuumpressitudSi₃N₄³ – reaktsioonpaagutusSi₃N₄⁴ – kuumpressimineSiC⁵ – immutatud Si-ga (Si-SiC)SiC⁶ – kuumpressitud

Tabelis 9.3 on toodud valik keraamiliste materjalide rakendustest valdkondade kaupa ning tüüpilisemad keraamiliste materjalide esin-dajad neis rakendustes.

Tabel 9.3

Tehnokeraamika kasutus

Rakendus-valdkond	Toode/detail	Põhiomadused	Tüüpilised materjalid
Üldised rakendused	Pinded, laagrid, düüsid, juhikud, kaitseekraanid, lõiketerad, veskite kiirkuluvad osad (labad, kruvid) konveierite osad	Suur kulumis-kindlus ja/või korrosioonikindlus ja kõrged mehaanilised omadused	Al ₂ O ₃ (alumiiniumoksiid), SiC (ränikarbiid), Si ₃ N ₄ (räninitriid), Zr ₂ O ₃ (tsirkooniumoksiid), kvartspartselan
	Jahvatusseadmete spindlid	Suur jäikus	
	Juhikrattad, kõrge pöörlemiskiirusega laagrid	Väike tihedus	
	Veerelaagrid, termoisolaatorid	Suur kuumustugevus	
Pumbad ja klapid	Klapid, juhikud, kuulid, rootorid, võllid, teljed, silindrid	Kõrge kulumis-kindlus ja korrosioonikindlus	Al ₂ O ₃ (alumiiniumoksiid), SiC (ränikarbiid), Si ₃ N ₄ (räninitriid), kvartspartselan
Tööstustarvikud	filtrikorpused, filtrid, torud, mikserid, veskid, transportööride juhikud	Korrosiooni-kindlus ning eriti kõrge kulumiskindlus	Al ₂ O ₃ (alumiiniumoksiid), SiC (ränikarbiid), Si ₃ N ₄ (räninitriid) Zr ₂ O ₃ (tsirkooniumoksiid)
Tekstiilitööstus-seadmed	Silmad, juhikud, juhtrattad, lõiketerad, düüsid, torud	Kulumiskindlus ja hea pinna-kvaliteet	Al ₂ O ₃ (alumiiniumoksiid), Zr ₂ O ₃ (tsirkooniumoksiid), kvartspartselan

Tabeli 9.3 järg

Metallitööstus	Tõmbesilmad, liivapritside düüsid, lõiketerad, kärnid	Suur kõvadus ja kulumiskindlus	Al_2O_3 (alumiiniumoksiid), Zr_2O_3 (tsirkooniumoksiid)
	Valuvormid, valukanalite süsteemide osad, jootmisalused, filtrite osad, tiiglid, keevitusahjude osad, keevitusseadmete osad, keevituselektroodide isolaatorid	Kõrge kuumustugevus ja -püsivus, termokindlus	$(\text{Mg,Fe})_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$ (kordieriit), $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ (mulliid), Al_2O_3 (alumiiniumoksiid), Si_3N_4 (räninitriid)
Mootorid, turbiinid	Põlemiskambri siseosad, kolvi- pead, laagrid, juhikud	Hea sooja- isolaator	Al_2TiO_5 või $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{TiO}_2$ (alumiiniumtitaanaat)
	Klapid, klapi- pesad,	Suur kulumis- kindlus, väike tihedus, suur kõvadus	SiC (ränikarbiid), Si_3N_4 (räninitriid)
	Kolvid, sõrmed, turborootorid	Väike tihedus, suur tugevus	SiC (ränikarbiid), Si_3N_4 (räninitriid)
	Süüteküünalde isolaatorid	Hea elektri- juhtivus ja soojaisolaator	Tehniline portselan
	Gaasiturbiini labad, rattad	Kuumustugevus	SiC (ränikarbiid), Si_3N_4 (räninitriid)
	Hapnikusensorid	Hea hapniku- ionide juhtivus	Zr_2O_3 (tsirkooniumoksiid)

Tabeli 9.3 järg

Elektrotehnika	Isolaatorite elemendid, distantselemendid, keermestatud vardad, torud, kontaktide vedruhoidjad, regulaatorite korpused, lülite osad jne	Hea elektriisolaator, hea mehaaniline tugevus	$(\text{Mg,Fe})_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$ (kordieriid), $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ (mulliit), Al_2O_3 , Al_2O_3 (alumiiniumoksiid), MgO (magneesiumoksiid), $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ (steatiit, magneesiumsilikaat)
Elektroonika, piesotehnoloogia	Signaaliandurid (elektromehaanilised, mehaanilis-elektrilised, akusto-elektrilised, elektroakustilised)	Piesoelektrilised omadused	$\text{Pb}[\text{ZrxTil-x}]\text{O}_3$ $0 < x < 1$ (pliitsirkooniumtitanaat, PZT, ka keraamiline perovskiit)
Meditsiin	Sisekõrva implantaadid, graanulid luukoe parandamiseks, liigesimplantaatide osad, hambakroonid	Head mehaanilised omadused ja pinnakvaliteet ning biosobivus	Al_2O_3 (alumiiniumoksiid), Zr_2O_3 (tsirkooniumoksiid) $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ (kaltsiumfosfaat), $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ (hüdrosüülapatiit)

Töö käik

Töö viiakse läbi ainult e-laborina.

Kordamisküsimused

1. Kuidas liigitatakse tehnokeeramikat koostise järgi?
2. Tooge näiteid oksiidkeeramikast.
3. Millistest keemilistest ühenditest on saadud segakeeramika?
4. Millised on peamised tehnokeeramikat iseloomustavad mehaanilised omadused?

5. Mis on paagutamine?
6. Millist tehnoloogiat kasutatakse valdavalt tehnokeeraamiliste toodete saamiseks?
7. Mida kujutab endast lobrivalu?
8. Millised on tehnokeeraamika täiendava töötlemise meetodid?
9. Miks hajuvad keeraamiliste materjalide mehaaniliste omaduste katselisel määramisel saadud tulemused võrreldes metallidega laiemas vahemikus?
10. Võrrelge keeraamiliste materjalide surve- ja tõmbetugevust terase vastavate omadustega. Milline on olulisim erinevus?
11. Milline mehaaniline omadus iseloomustab materjali sitkust? Millised on tüüpilised tehnokeeraamika näitajad.
12. Millised on Al_2O_3 tüüpilised kasutusvaldkonnad?
13. Mida iseloomustab Weibulli moodul?
14. Millised omadused ja tegurid piiravad tehnokeeraamika laialdasemat kasutuselevõttu?
15. Kus ja millises rakenduses olete ise kokku puutunud tehnokeeraamiliste materjalidega?

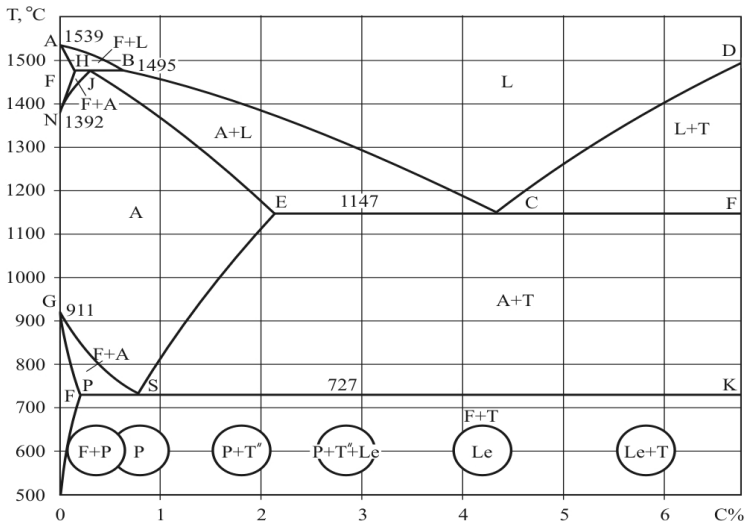
KODUTÖÖ NR 1 TERASED JA MALMID

Töö eesmärk

Tutvuda Fe-Fe₃C faasidiagrammiga, analüüsida rauasüsinikusulamite (teraste ja malmide) kristallisatsiooni ja tutvuda nende tasakaaluliste struktuuridega.

Teraste ja malmide tasakaalulised struktuurid

Sulam on tasakaaluolekus, kui kõik faasimuutused temas on toimunud täielikult faasidiagrammi kohaselt. Selline olek saavutatakse ainult väga aeglasel jahtumisel. Rauasüsinikusulamite (teraste ja valgemalmide) tasakaaluliste struktuuride leidmise aluseks Fe-Fe₃C faasidiagramm (joonis 1).



Joonis 1. Fe-Fe₃C süsteemi faasidiagrammi vasakpoolne osa

Tabel 1

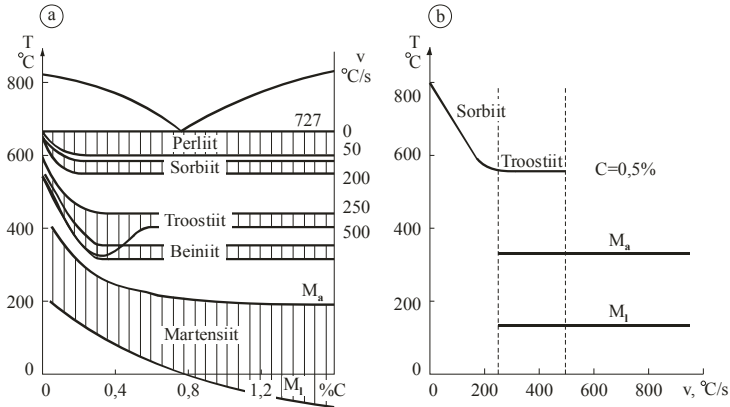
Terastes ja malmides toatemperatuuril esinevad järgmised faasid ja mehaanilised segud

Nimetus	Tähis	Kristallivõre	Määratlus
Faasid			
Ferriit	F	K8	C sisendustardlahus α -rauas ($\text{Fe}_\alpha(\text{C})$). Maksimaalne C-lahustuvus temperatuuril 727 °C on 0,02%, toatemperatuuril 0,01%.
Tsementiit	T	Keerukas rombiline	Fe ja C habras ja kõva keemiline ühend – raudkarbiid (Fe_3C). C-sisaldus 6,67%.
Mehaanilised segud			
Ledeburiit	Le		On 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		On F ja T eutektoidne segu C-sisaldusega 0,8%, mis tekib A lagunemisel selle aeglasel jahutamisel alla 727 °C.

Terase mittetasakaalulised struktuurid – termotöötlemisel tekkivad struktuurid

Terase aeglasel jahutamisel (lõõmutamisel) austeniidi lagunemise tulemusena on süsinikeraste struktuuri koostisosadeks ferriidi ja tsementiidi segu ehk perliit (joonis 2).

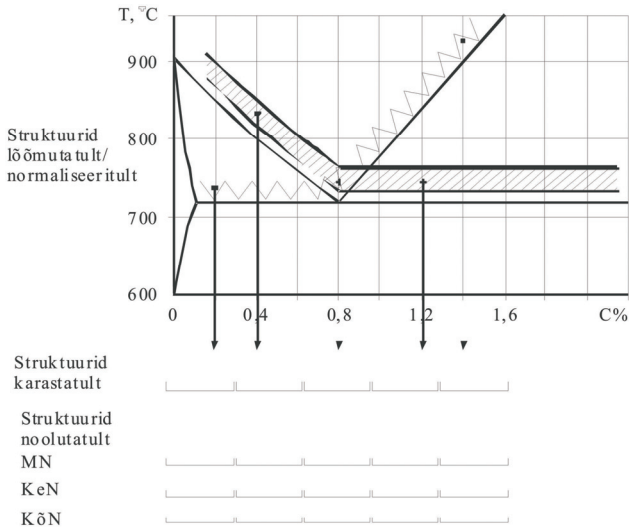
Terase kiiremal jahutamisel ja suurematel allajahutusastmetel tekivad austeniidi lagunemisel peeneteralisemad ferriidi-tsementiidi segud (troostiit, beiniit) või austeniit ei jõua laguneda ning muutub martensiidiks.



Joonis 2. Austeniidi jahutamisel tekkivad struktuurid (a) ja nende tekke-temperatuurid sõltuvalt jahutuskiirusest (terase 0,5% C puhul)

Harjutusülesanne

Määrata erinevate teraste erineval karastamisel ja noolutamisel tekki-
vad struktuurid.



Joonis 3. Terae võimalike karastus- ja noolutusviiside korral tekkivad struk-
tuurid

Kodutöö ülesanded

Terased

1. Joonistage Fe-Fe₃C faasidiagrammi (FD) teraste osa (Fe-Fe₃C FD alumine vasak nurk), märkige FD üksikute sulamigruppide (eutektoidsed, ala- ja üleeutektoidsed) struktuuriosad toatemperatuuril.
2. Joonistage terase struktuuriskeem ja näidake selle struktuuriosad. Variant (C-sisaldus) võtke tabelist 2 kooskõlas üliõpilaskoodi viimase numbriga. Mis temperatuuril ja millisest faasist tekivad terase struktuuri näidatud struktuuriosad? Millise terasegrupiga on tegemist lähtuvalt kasutusalaast?
3. Millised eeltermotötlusviisid on antud terase korral võimalikud ja millised on terase struktuuriosad peale neid?
4. Millise grupi terasega on tegemist lähtuvalt lõpptermotötlusest ja milline on tüüpiline termotötlus antud terasele?

Tabel 2

Üliõpilaskoodi viimane nr	Variant	C-sisaldus %
1	1	0,2
2	2	0,4
3	3	0,6
4	4	0,8
5	5	1,0
6	6	1,2
7	7	1,4
8	8	1,6
9	9	1,8
0	10	2,0

5. Milline on antud terase optimaalne karastustemperatuur (tooge ka põhjendus), terase struktuur peale karastamist (nimetage struktuuriosad) ja kõvadus HRC (jahtumiskiirus kogu ristlõikes $>v_{kr}$)?

6. Milline on antud terasest detaili kasutusotstarbest tulenev(ad) noolustemperatuur(id)? Kuidas nimetatakse sellist noolust? Milline on noolutatud terase struktuur (nimetage struktuuriosad) ja kõvadus HRC?
7. Iseloomustage antud noolutatud terase põhilisi omadusi (kõvadus ja tugevus; sitkus ja haprus) kolmeastmelises skaalas (hea/kõrge, keskmine, halb/madal).

Malmid

8. Joonistage Fe-Fe₃C FD malmide osa; märkige FD üksikute sulamisgruppide (eutektsed, ala- ja üleeutektsed) struktuuriosad toatemperatuuril.

Tabel 3

Üliõpilaskoodi viimane nr	Variant	C-sisaldus %
1	1	2,5
2	2	3,0
3	3	3,5
4	4	4,0
5	5	4,3
6	6	4,5
7	7	5,0
8	8	5,5
9	9	6,0
0	10	6,5

9. Joonistage antud malmi jahtumiskõver. Variant (C-sisaldus) võtke tabelist 3 kooskõlas üliõpilaskoodi numbriga viimase numbriga ja näidake sulami asukoht FD-l). Tooge faasimuutused sulami jahtumiskõvera üksikutes lõikudes.
10. Millise malmiga on tegemist lähtuvalt seotud C protsendist? Loetlege eeltingimused antud grupi malmi tekkeks. Millised on eeldused grafiitmalmi (vaba C-ga malmi) tekkeks (vt struktuuri-

diagramme joonisel 2.73 ja 2.74 – P. Kulu, *Metalliõpetus*, 2005).

11. Kirjeldage antud malmi tehnoloogilisi omadusi (valatavus, lõiketöödeldavus, survetöödeldavus) ning tooge põhjendused.

KODUTÖÖ NR 2

POLÜMEERKOMPOSIIDID

Eesmärk

Tutvuda plastkomposiitide valmistustehnoloogiatega, komposiitmaterjalide omaduste ja/või nendest tingitud piirangutega toote projekteerimisel.

Visuaalse esitlusmaterjali – posterite valmistamine etteantud toote ja valmistustehnoloogia kohta.

Lähteandmed

Kodutöö lähteandmed annab õppejõud harjutustunnis.

Posterite sisu ja struktuur

Üliõpilane peab lähtuvalt etteantud tootest kujundama **visuaalselt haarava ja sisult ülevaatliku posterite**. Poster peab sisaldama:

- 1) pealkirja;
- 2) posterite autori nime, üliõpilaskoodi nr, e-posti aadressi;
- 3) pilte, jooniseid ja teksti, mis aitavad vaatajal-lugejal kiiresti saada ülevaadet käsitletavast temast;
- 4) allkirju ja viiteid allikaile kõikide kasutatud jooniste korral, sh fotodele, diagrammidele ja tabelitele.

Kuigi mõningaid tooteid võidakse põhimõtteliselt valmistada erinevatest materjalidest, tuleb eeldada, et antud ülesande raames valmistatakse toode **plastmaatriks-komposiitmaterjalist** (alternatiivideks on metallid, metallisulamid, keraamika ja puit).

Poster peab sisaldama valmistustehnoloogia kirjeldust antud komposiitmaterjalist toote saamiseks ja selgitama valmistamise põhilisi tööetappe.

Poster tuleb kujundada, kasutades Microsoft Power Pointi plakati-malli, mille leiate e-õppe keskkonnast (TTU_plakatimall_1.ppt). Üliõpilane võib soovi korral kasutada ka mõnd muud plakati-malli posterite

kujundamisel eeldusel, et kasutatav formaat on etteantud plakatimalli formaadi lähedane (A3).

NB! Kui poster on valmistatud võõrkeeles (vene või inglise keeles), peab see sisaldama eestikeelset sisukokkuvõtet!

Posteri kujundamisel võivad abiks olla järgmised näpunäited ja küsimused.

1. Anda ülevaade toote kasutamisest maailmas ja Eestis.
2. Kus on antud tootele suurim turg?
3. Milliseid teisi materjale võiks kasutada või kasutatakse selle toote valmistamiseks?
4. Millised on komposiitmaterjalide eelised ja puudused antud rakenduses?
5. Kuidas töötab komposiitmaterjal antud rakenduses?
6. Milline on armatuuri ja milline maatriksi roll?
7. Kas ja milliseid piiranguid tingivad toote kuju, mass, esteetilised omadused, kasutus (mehaaniline koormus, UV-kiirgus, keemiliselt agressiivne keskkond)?
8. Millised on võimalikud valmistustehnoloogiad selle komposiitmaterjalist toote saamiseks?
9. Millised on põhilised tööetapid (ettevalmistus, protsessi osad, viimistlus, täiendav töötlemine)?
10. Võimalusel hinnake toote massi ja omahinda ja võrrelge neid alternatiivmaterjalidest või -tehnoloogiatega valmistatud toodetega.

Posteri valmistamisel on soovitatav tutvuda näidistöödega materjalitehnika instituudi stendil ja/või kodulehel.

Hindamine

1. Posteri korral hinnatakse nii sisu kui ka vormi.
2. Tähelepanu tuleks pöörata esitlusmaterjali struktuurile ja loogilisele ülesehitusele.
3. Kindlasti peaks poster sisaldama lisaks tekstile ka pilte ja jooniseid!

4. Oluline on jälgida, et poster sisaldaks viiteid (raamatud, ajakirjad, internetileheküljed jms).
5. **Igasugune plagiaat on keelatud ja mõistetakse hukka!!!**