

Tallinna Tehnikaülikool
Materjalitehnika instituut

Daniil Arensburger

KOMPOSIITMATERJALID

Vastutav toimetaja Priit Kulu

Kaane kujundanud Ann Gornischeff

Autoriõigus Daniil Arensburger, 2005

Sisukord

Sissejuhatus.....	5
1. KOMPOSIITMATERJALIDE TÄHENDUS TÄNAPÄEVAL.....	6
2. KOMPOSIITMATERJALIDE LIIGITUS JA KOOSTISOSAD.....	9
2.1. Komposiitmaterjali maatriks.....	10
2.1.1. Metallmaatriks.....	10
2.1.2. Polümeermaatriks.....	11
2.1.3. Keraamiline ja süsinikmaatriks	13
2.2. Komposiitmaterjali armatuur	14
2.2.1. Niitkristallid	18
2.2.2. Metalltraadid	26
2.2.3. Keraamilised pidevkiud.....	30
2.2.4. Boor-, ränikarbiid- ja süsinikkiud	33
2.2.5. Orgaanilised kiud	36
2.3. Armeerivate elementide saamine	38
3. KOMPOSIITMATERJALIDE OMADUSTE PROGNOOSIMINE	40
3.1. Komposiitmaterjalide jäikus	40
3.2. Komposiitmaterjalide tõmbetugevus	41
3.3. Armatuuri ja maatriksi optimeerimine.....	43
3.4. Armatuuri orientatsiooni mõju ühesuunalisel tõmbel.....	45
3.5. Komposiitmaterjali tugevus diskreetsete kiududega armeerimisel.....	46
3.6. Komposiitmaterjali survetugevus	48
3.7. Komposiitmaterjali purunemissitkus	49
3.8. Komposiitmaterjalide mehaaniliste omaduste määramise meetodid.....	53
3.8.1. Tõmbeteim	53
3.8.2. Surveteim	55
3.8.3. Nihketeim.....	55
3.8.4. Paindeteim.....	57
3.8.5. Kõvadusteim	58
4. METALLMAATRIKSKOMPOSIITMATERJALID (MMKM).....	59
4.1. Metallmaatrikskomposiitmaterjalide valmistamise viisid	59
4.1.1. Niitkristallidega armeeritud MMKM saamine.....	59
4.1.2. Kiududega armeeritud MMKM valmistamine.....	61
4.1.3. Kiudude ja maatriksi omavaheline side	71
4.1.4. Dispersioontugevdatud sulamid	72

4.2. Metallmaatrikskomposiitmaterjalide omadused	76
4.2.1. Kiudarmeeritud metallkomposiidid	76
4.2.2. Dispersioontugevdatud metallkomposiidid.....	78
4.2.3. Pseudosulamid.....	79
5. KERAAMIKAMAATRIKSKOMPOSIITMATERJALID (KMKM)	80
5.1. KMKM tehnoloogia	80
5.2. KMKM armeerimise põhimõtted.....	84
5.3. Keraamiliste komposiitide koostis ja omadused.....	86
6. PLAST-(PMKM) JA SÜSINIKMAATRIKSKOMPOSIITMATERJALID(SMKM)....	89
6.1. PMKM toodete valmistamisprotsessid	89
6.2. Ohutustehnika PMKM valmistamisel ja töötlemisel	97
6.3. Polümeerkomposiitide koostis ja omadused	98
7. KOMPOSIITMATERJALIDE KASUTUS	103
8. Kasutatud kirjandus lühikokkuvõtetega.....	108

Sissejuhatus

Käesolev õppevahend on 1996. aastal välja antud loengukonspekti “Komposiitmaterjalid” ümbertöötlus ja käsitleb põhiliste komposiitide ning nende komponentide omadusi, saamist ja töötlemist.

Komposiitmaterjalide (KM) omadused sõltuvad palju suuremal määral saamisviisist kui traditsiooniliste metallide omad. Komposiitmaterjalist detailid projekteeritakse, arvestades üheaegselt komposiitmaterjali koostist, struktuuri ja saamisviisi, mis erineb metallist detailide valmistamisest, kus toimib protsesside täpne jagunemine: metallide saamise tehnoloogia – metallurgia, ja metallide töötlemise tehnoloogia – surve, valu, keevitamine jne. Eelmise loengukonspekti mahuline piiratus ei võimaldanud valgustada komposiitide valmistamise tehnoloogiat, põhitähelepanu oli pööratud tänapäevaste komposiitmaterjalide omadustele.

See õppevahend püüab täita lünka eestikeelse materjali osas. Head võõrkeelsed väljaanded on [1, 2, 3, 4, 5, 6], mis mahult ületavad õppeprogrammides nõutu. KM omadusi ja tehnoloogiat on valgustatud mitmetes monograafiates, nt [7, 8, 10, 13, 14, 15, 20, 23]. Kuid nad sisaldavad liiga üksikasjalikke tehnoloogilisi detaile, mis raskendavad protsesside põhimõttest arusaamist, ja seetõttu on sobimatud õppeotstarbeks üliõpilastele, kelle erialaks ei ole komposiitmaterjalide tehnoloogia. On ilmunud ka mitu KM käsiraamatut [9, 17, 18, 21], millest mõned on juba vananenud [8, 24]. Tuleb märkida, et kuni 1996. aastani ei ole TTÜ-s ilmunud õppematerjale selles valdkonnas (välja arvatud pulbermetallurgia tehnoloogia).

Käesolev õpik puudutab KM omadusi vaid lähtudes valmistamistehnoloogia protsesside iseärasustest. Tähelepanu on pööratud põhiliste KM (metall-, polümeer-, süsinik- ja keraamilise matriitsiga) saamise tehnoloogiale. Vajaduse korral vaadeldakse ka matriksi saamist ja omadusi. Teatud raskusi tekitab selle teema puhul vajadus käsitleda polümeeride keemiat ja tehnoloogiat, milleks mehaanikaerialade üliõpilased ei ole küllaldaselt ette valmistatud. Seepärast käsitletakse seda materjali väikeses mahus, kuid vajaduse korral võib kirjanduse loetelust leida vajalikke allikaid.

Lisaks võib pöörduda TTÜ raamatukogus oleva teadusliku kirjanduse poole, mille lühike nimekiri on toodud käesoleva konspekti lõpus. Teaduskirjanduse kasutamise hõlbustamiseks on samas ka nende raamatute lühiannotatsioonid.

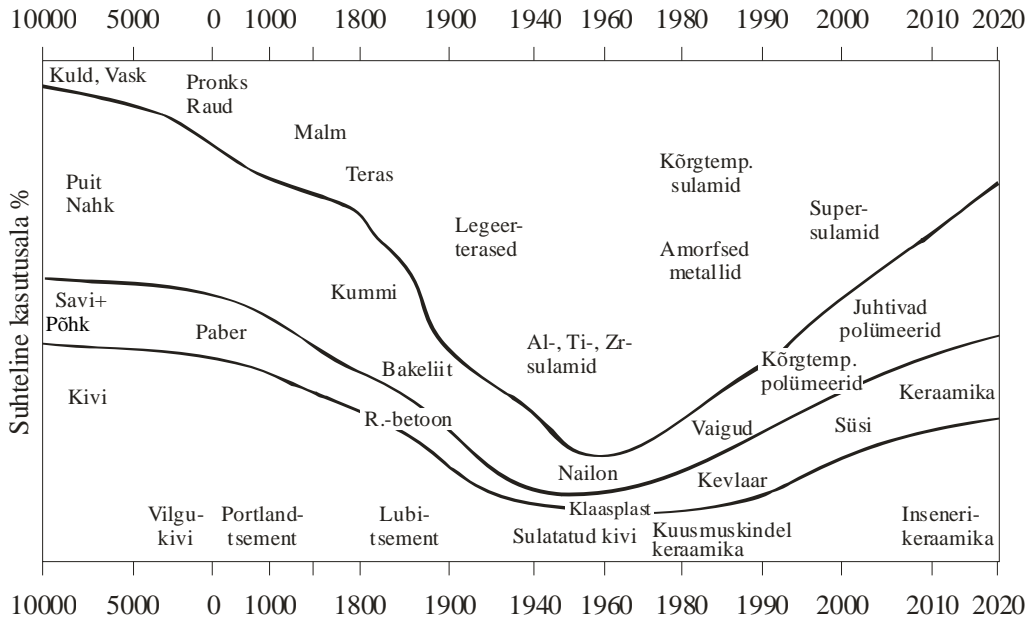
See õpik on mõeldud eelkõige mehaanikateaduskonna erialade bakalaureuseõppe üliõpilastele õppeaine “Tehnomaterjalid” vastava materjaliliigi käsitlemisel ja materjalitehnikale spetsialiseerunud magistriõppe üliõpilastele õppeaines “Komposiitmaterjalid”.

1. KOMPOSIITMATERJALIDE TÄHENDUS TÄNAPÄEVAL

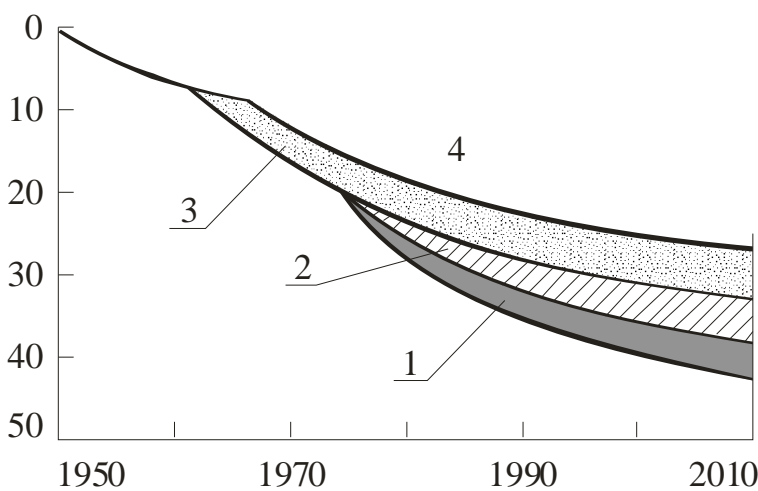
USA ajakiri *Aviation Week* avaldas mõned aastad tagasi artikli “Aerokosmilised materjalid XXI sajandil”, kus oli kaks huvitavat graafikut (joonis 1.1 ja 1.2).

Esimesel joonisel on näidatud põhilised materjaligrupid ja nende kasutusalaad kogu inimajaloos vältel, teisel – lennuki kaalu vähendamise põhilised võimalused, milleks on:

- pingete täpsem arvutus konstruktsioonelementides,
- uued konstruktiivsed lahendused,
- kuju ja mõõtmete optimeerimine automaatprojekteerimist kasutades,
- uute materjalide kasutamine.



Joonis 1.1. Materjalide (metallid, polümeerid, komposiidid, keraamika) kasutamine ajalooliselt (ajaskaala pole lineaarne)



Joonis 1.2. Sõjalennuki kaalu vähendamise teed:
 1 – pingete kontroll, 2 – automaatprojekteerimine,
 3 – konstruktiivsed lahendused, 4 – uued materjalid

Kuni Teise maailmasõjani pöörati põhitähelepanu metallidele (joonis 1.1), kuigi esimene patenteeritud komposiitmaterjal (KM) – bakeliit ilmus juba 20. sajandi algul. Savi ja põhu baasil ehitusmaterjali – tüüpilist komposiiti – tunti juba eelajaloolisel ajal (ja kasutatakse praeguseni). Pärast Teist maailmasõda suureneb mitmesuguste mittemetalsete ja komposiitmaterjalide kasutamine. Prognoositakse, et järgmine milleenium saab jälle olema kiviajastu s.o keraamiliste materjalide ajastu.

Teine graafik näitab, et lennuparaatide kaalu (ja mitte ainult nende) vähendamine puhtalt konstruktiivsete ja arvutuslike meetoditega on ammendatud ja edaspidi on otsustava tähtsusega uute materjalide kasutamine. Sellest annavad tunnistust andmed, mis on toodud joonisel 1.3, kus nüüdisaegsete (*advanced*) aerokosmilistes seadmetes kasutatavate KM osakaal moodustab kuni 80%. Samuti äratub tähelepanu KM tootmise kasv, mis alates 1995. aastast on suurenenud 20 korda, s.o palju kiiremini metallide ja armeerimata plastide tootmisest.

Huvi KM vastu on seotud nende omadustega, mis pole saavutatavad traditsioonilistel monoliitsetel materjalidel: metallidel, klaasil, keraamikal jt, kuna komposiidid kujutavad ühes materjalis kahe või enama tugevasti erinevate omadustega liitmaterjali – tavaliselt tugevat ja jäika armatuuri ning plastset maatriksi, mis täidab armatuurivahelise ruumi.

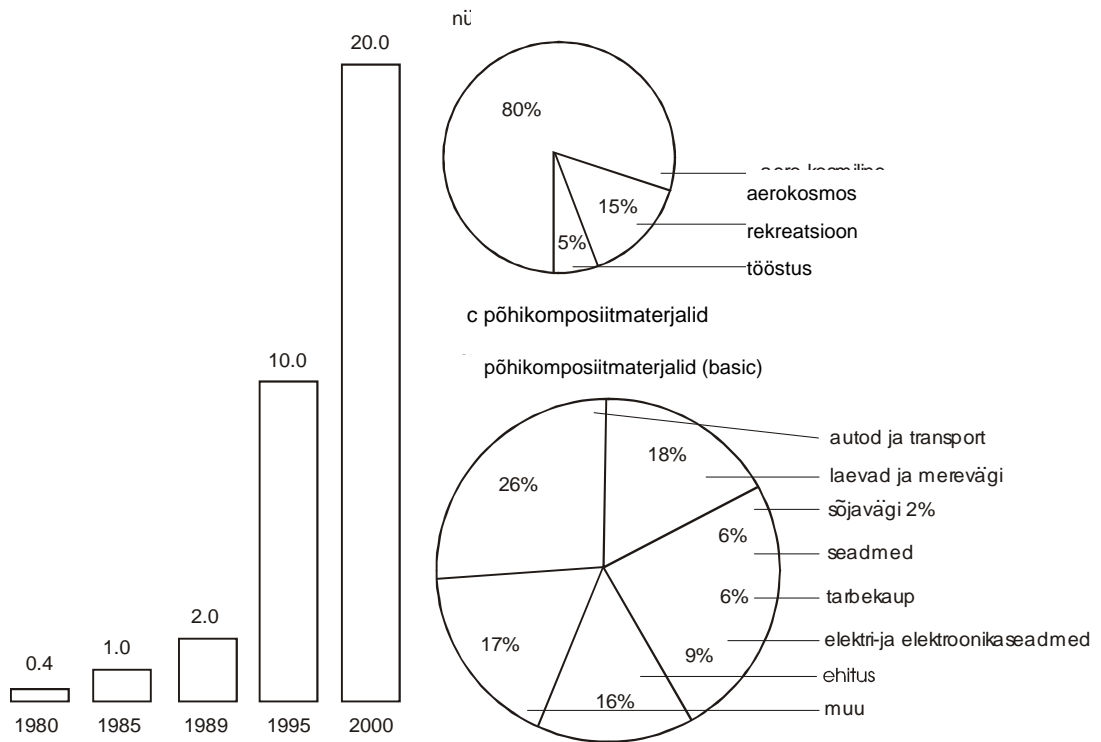
Kiulistest komposiitides võtab *armatuur* vastu põhipinge, mis tekib materjalis välisjõudude mõjul, tagab kiudude pikisuunas toodetele vajaliku tugevuse ja jäikuse, ning *maatriks* jagab koormuse kiudude vahel ühtlaselt tänu elastsele deformatsioonile. Seega KM mehaanilised omadused määratakse kolme faktoriga: armatuuri kiudude tugevusega, maatriksi jäikusega ja sideme kiud-maatriks tugevusega. Nende parameetrite suhe iseloomustab kogu KM mehaaniliste omaduste kompleksi ja purunemise mehhanismi. KM kiudude põhilised tööomadused on nende tugevus, jäikus ja sitkus mõõdukatel töötemperatuuridel.

Hoopis teistsugused nõuded esitatakse materjalidele, mis töötavad kõrgetel temperatuuridel ja suurtel mehaanilistel koormustel. Sel juhul on määrav materjali *kuumuspiisvus* ja *roomavuspiir*, mistõttu kuumustugevates komposiitides kasutatakse dislokatsioonivaba armatuuri ja maatriksit, millele lisatakse dislokatsioonide liikumist takistavaid lisandeid. Esimene põhimõte realiseeritakse defektivabade monokristallide või kiudude kasutamisega, teine põhimõte – peene (dispersse) ja inertse tugevdava faasi (osakeste) sisseviimisega maatriksisse.

Kuna maatriksina kasutatakse traditsioonilisi metallisulameid, polümeere, keraamikat jne, siis põhilised saavutused uute KM materjalide ilmunisel on seotud eelkõige uut liiki armatuurmaterjalide saamisega, aga samuti eritehnoloogiate väljatöötamisega armatuuri ja maatriksi sidumiseks.

a komposiitmaterjalide tarne aastail 1980-2000

b nüüdisaegsete (advanced) komposiitmaterjalide kasutus



Joonis 1.3. Komposiitmaterjalide tarne ja kasutus ajavahemikul 1980–2000 a.

2. KOMPOSIITMATERJALIDE LIIGITUS JA KOOSTISOSAD

Komposiitmaterjalideks (KM) (*composite material*) nimetatakse kahest või enamast osast (faasist) koosnevaid materjale, kusjuures faaside omadused ja orientatsioon on järsult erinevad ja kontrollitavad. Komposiitmaterjal on *heterogeenne*, selle omadused (korrosiooni- ja kuumuskindlus, magnetilised omadused, jäikus, tugevus jm) on määratud tema koostisse kuuluvate faasidega. Tavaliselt on üks faasidest kõva ja tugev ning teine plastne ja elastne. Kõva faasi nimetatakse *armatuuriks* (*sarruseks*) ja plastset *maatriksiks*.

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

Maatriks (*matrix*) annab materjalile vormi, monoliitsuse ning tagab koormuse ümberjaotumise armatuuri elementide (kiudude) vahel.

Rauasulamid ei ole komposiitmaterjalid, kuna neis oleva ferriidi ja tsementiidi suhe ja orientatsioon sõltub termodünaamikast ning on raskesti kontrollitav. Looduslikud komposiidid on puit, mineraalid, luu jm. Puit koosneb torukujulistest tselluloosikiududest, mis on suhteliselt jäigad ja tugevad. Nende vahel asub sideainena plastne ligniin, mis tagab puidu rõhtsuunalise jäikuse. Luu pealiskiht – email, on kõva ja tugev, südamik – dentiin on pehme ja elastne. Mõlema faasi koostises on anorgaanilist ainet – hüdroksüülapatiiti, mida seob orgaaniline sideaine. Emailis on 10%, dentiinis – 30% sideaineid.

Tehnikas kasutatavaid komposiitmaterjale liigitatakse *valmistamisviisi, kasutusvaldkonna, maatriksi koostise ja armatuuri kuju alusel*.

Valmistamisviise (tehnoloogiline printsiip) on kolm: valamine, pressimine, mähkimine. Mõningaid komposiitmaterjale saab valmistada kõigil kolmel meetodil (nt polümeeride baasil), teisi aga kahel või isegi ainult ühel meetodil (grafiidi või keraamika baasil).

Kasutusvaldkonna järgi on eristatavad: üldkonstruktiivsed KM (masinaelemendid), kuumuskindlad KM (nt turbiinilabad), kuumuspüsivad KM (põlemiskambrid), erihõõrdeomadusega KM (liuglaagrid, piduriklotsid), löögikindlad KM (soomusvestid, sporditarbed, kaitseriided), soojuslike eriomadustega KM (tulekindlad, soojusisoleerivad).

Maatriksi koostise järgi eristatakse KM järgmiselt: metallmaatriksiga (MMKM), sh ka dispersioontugevdatud ja pseudosulamid, plastmaatriksiga (PMKM), keraamilise maatriksiga (KMKM) ja süsinikmaatriksiga (SMKM). Just selle liigitusprintsiibi järgi on vaadeldud komposiitmaterjale käesolevas loengukonspektis.

Armeerivate elementide kuju järgi liigitatakse komposiidid järgmiselt: pulbrilise armatuuriga, diskreetse või pideva kiudarmatuuriga ja kihtstruktuuriga KM. Vastav skeem on toodud tabelis 2.1 [28].

Komposiitmaterjalide liigitus armatuuri kuju järgi

Pulberarmeeritud (Particle reinforced)		Kiudarmeeritud (Fiber reinforced)		Kihtarmeeritud (Structural)	
Armatuuriks suured osakesed (Large Particle)	Dispersne armatuur (Dispersion strengthened)	Pidevarmatuur (Continuous)	Diskreetne armatuur (Short)	Plaatjas armatuur (Laminates)	Sändvitš-tüüpi armeeritud (Sandwich Panels)
		Orienteeritud armatuur (Aligned)	Mitteoriinteeritud armatuur (Randomly oriented)		

2.1. Komposiitmaterjali maatriks

Komposiitide maatriksid on tavalised isotroopsete omadustega materjalid, mida kasutatakse ka mitteammeeritud kujul: metallid ja nende sulamid, plastid, keraamika või grafiit.

2.1.1. Metallmaatriks

Metallkomposiitides kasutatakse laialdaselt puhtaid, plastseid ja kergesti deformeeritavaid alumiiniumi, niklit, koobaltit. Harvemini kasutatakse erisulameid, mis on välja töötatud armeerimiseks mõne konkreetse armatuuriga. Sõltuvalt töötingimustest ja esmajoonest töötemperatuuridest kasutatakse metallmaatrikskomposiitides järgmisi maatrikseid:

- kergmetallid (Al ja Mg) ja nende sulamid,
- titaan ja selle sulamid,
- vask, hõbe ja nende sulamid (elektrikontaktides),
- nikli ja koobalti kuumuspüsivad sulamid.

Kõik metallmaatriksid võib tehnoloogilise tunnuse järgi jaotada kolme rühma: deformeeritavad, valatavad ja pulbrilised.

Deformeeritavatest metallmaatriksitest kasutatakse **alumiiniumsulameid**: nii mittetermotöödeldavaid Al-Mg-, Al-Mn- kui ka termotöödeldavaid Al-Cu-sulameid (duralumiiniumeid). Esimeste eelis on hea plastsus, korrosioonikindlus ja keevitatus, kuid tugevuse poolest ($R_m = 200-250 \text{ N/mm}^2$) on nad umbes kaks korda nõrgemad, võrreldes termotöödeldutega (R_m kuni 550 N/mm^2), viimased aga on väiksema korrosioonikindlusega. Al-valusulamite (silumiinide) tunnuseks on head valuomadused, kuid väike plastsus (katkevenivus alla 6–7%) ja tugevus (R_m alla 300 N/mm^2). Väga perspektiivne kuumtugev MMKM on paagutatud alumiiniumipulber (SAP) (*sintered aluminium powder*), mis kujutab endast alumiiniummaatriksit, mida tugevdavad disperssed alumiiniumioksiidi Al_2O_3 osakesed. Nende tehnoloogiat ja omadusi käsitletakse edaspidi.

Magneesium ja selle sulamid on kerged ($\rho = 1740 \text{ kg/m}^3$), tugevad (R_m kuni 430 N/mm^2), sitked, hea vibratsioonitaluvusega. Deformeeritavad sulamid on plastid, hästi keevitavad argoonis. Valusulamid on hea vedeloolavusega ja väikese kahanemisega tardumisel (1,3–1,6%), kuid väikese plastsusega, ja ei sobi külmdeformeerimiseks. Kõik magneesiumisulamid on madala korrosioonikindlusega vees ja niiskes õhus, nendel on väike jäikus ($E = 43 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$, umbes 4 korda väiksem kui rauasulamitel). Lisaks sellele süttivad nad sulaolekus

kergesti õhus, mis nõuab kaitsegaaside ja -rübude kasutamist. Sellest lähtudes kasutatakse magneesiumisulameid peamiselt fooliumina pressimiseks ja valtsimiseks.

Titaan ja selle sulamid on kerged ($\rho = 4500 \text{ kg/m}^3$), korrosioonikindlad, tugevad (R_m kuni 1500 N/mm^2), kuid kergesti oksüdeeruvad temperatuuril üle $500 \text{ }^\circ\text{C}$ sulamid. Nende valamine, kuumsurvetöötlemine või keevitamine vajavad seetõttu kaitsekeskkonda või vaakumi kasutamist. Peamiselt kasutatakse titaanisulameid samamoodi nagu magneesiumisulameid, s.o külmtöötlemismeetodil.

Vaske ja hõbedat kasutatakse hea elektri- ja soojusjuhtivuse tõttu elektri- või soojusaparatuuris. Vask on väga tehnoloogiline metall, mis lubab kõikide töötlemismooduste kasutamist. Survetöötlemine toimub tavaliselt külmalt, valmistatakse fooliumi, traati, sepiiseid jne. On mugav kasutada pulbermetallurgia meetodit – pressimist ja paagutamist.

Nikkel, koobalt, raud ja nende sulamid leiavad kasutamist kõrgetemperatuursete maatriksite valmistamisel, mis töötavad oksüdeeruvates keskkondades temperatuuril üle $500 \text{ }^\circ\text{C}$. Analoogselt austeniitaterastele jaotatakse niklisulamid kahte rühma: *homogeensed (nikroomid)* ja *vanandatavad (nimonikid)*. Nikroomid on nikli ja kroomi sulamid (mõned sisaldavad ka rauda) – sulam koostisega 80% Ni ja 20% Cr on laialt kasutatav elekterküttespiraalidena. Nimonikite kuumustugevus saavutatakse nikli legerimisel titaani ja alumiiniumiga. Sulami karastamisel moodustub üleküllastatud nikli tardlahus, mis vanandamisel laguneb, moodustades peeneid intermetalliide Ni_3Ti ja Ni_3Al , mis blokeerivad dislokatsioonide liikuvust, suurendades sellega sulami roometugevust. Nimonikite tüüpiline kasutusala on reaktiivmootorite gaasiturbiini labad. Roometugevuse tõstmiseks legeritakse nimonikke rasksulavate elementidega (W, Mo, Nb), mis stabiliseerivad sulami terastruktuuri, takistades nende kasvu.

Rasksulavatest metallidest kasutatakse volframi, molübdeeni ja niobiumi dispersioonarmeeritud metallkomposiitides. Armatuuriks nendes on peened $0,01\text{--}0,1 \text{ mm}$ inertsed osakesed (oksüüdid, nitriidid jt). See suurendab maatriksi löögisitkust, termopüsivust ja teisi füüsikalisi omadusi. Üks rasksulavate metallide kasutusala on elektrikontaktid, millest tuleb juttu edaspidi.

2.1.2. Pastmaatriks

Polümeerplastkomposiitide peamine eelis, võrreldes teiste komposiitmaterjalidega, on valmistamise lihtsus, tehnoloogilisus, odavus ja madal tihedus. Puuduseks on piiratud töötemperatuur, suhteliselt madal nihketugevus ja jäikus. Nüüdisaegsed polümeerid töötavad temperatuurideni mitte üle $300\text{--}400 \text{ }^\circ\text{C}$. Suurest polümeeride nomenklatuurist leiab komposiitide valmistamiseks kasutamist eelkõige üks liik – termoreaktiivsed: epoksü-, polüester-, fenool- ja räniorgaaniline vaik, mille töötemperatuur ei ületa $200 \text{ }^\circ\text{C}$. Uurimisstaadiumis on mõned teised vaigud, mis töötavad temperatuuril kuni $230 \text{ }^\circ\text{C}$, eelkõige polüamiid- ja polüesterketoonvaik. Tähtsaim vaigu omadus on tardumisvõime säilivus pärast armatuuri immutamist.

Epoksüvaigud (epoxy resins) moodustavad üle 90% kõikidest plastkomposiitide sideaineks kasutatavatest vaikudest. Nende eelis on hea töödeldavus; neist saab valmistada eelimpregneeritud materjale – prepreg'e (*prepreg – preliminary impregnated*), millest hiljem valmistatakse plastkomposiittooteid.

Epoksüvaikude eelis on nende head tehnoloogilised omadused: hea adhesioon täiteainetega, kõvenemise temperatuuri ja kestuse reguleerimise võimalus, suur plastsus ja keemiline inertsus, nende kõvenemisel ei teki lenduvaid kõrvalprodukte jne. Vaigud töötavad hästi temperatuuridel -60 kuni $+120 \text{ }^\circ\text{C}$. Nende kõvenemisel ei ole vaja kasutada suuri surveid, mis võiks vigastada habrast armatuuri. Teatud puuduseks võib lugeda epoksüvaikude teistest vaikudest mõnevõrra väiksemat töötemperatuuri (kuni $120 \text{ }^\circ\text{C}$). Kuigi, võrreldes polüester- ja fenoolvaikudega, on

epoksüvaigud kallimad, neil on paremad tehnoloogilised ja talitusomadused. Seetõttu on plastkomposiitides epoksüvaikude kasutamine laialdaselt levinud.

Epoksüvaikude omadused on järgmised:

- tihedus – 1100...1200 kg/m³,
- tõmbetugevus – 30...100 N/mm²,
- survetugevus – 80...140 N/mm²,
- elastsusmoodul – 2400...4200 N/mm²,
- katkevenivus – 2...9%,
- kahanemine kõvenemisel – 2...9%.

Polüestervaigud (*polyester resins*) võeti kasutusele palju varem kui epoksüvaigud. Nendest valmistati esimesed konstruktsioonikomposiidid. Kuid epoksüvaikude kasutuselevõtuga hakkas polüestervaikude tarbimine vähenema, ja praegu kasutatakse neid peamiselt kergkoormatud detailide valmistamisel (mööbel, kerged vaheseinad laevaehituses). Polüestervaikudest valmistatud klaasplaste iseloomustab väga hea tehnoloogilisus ja odavus. Polüestervaikude puudus on haprus, suur kahanemine kõvenemisel, lühike tehnoloogiline kasutusaeg ning halb adhesioon täiteainetega (armatuuriga), mistõttu lisatakse sidusagente. Lisaks eraldub polüestervaikude kõvenemisel (mis toimub polükondensatsiooni teel) mürgiseid komponente.

Polüestervaikude omadused on järgmised:

- tihedus – 1100...1200 kg/m³,
- tõmbetugevus – 35...70 N/mm²,
- survetugevus – 70...250 N/mm²,
- elastsusmoodul – 2100...4600 N/mm²,
- katkevenivus – 1...5%,
- kahanemine kõvenemisel – 15...20%
- lagunemise temperatuur – 60...205 °C.

Fenool(aldehüüd)vaigud (*phenolic resins*) on fenoolide ja aldehüüdide polükondensatsiooni produktid. Need vaigud olid esimesed, millest valmistati konstruktsiooniplastidena nn fenoplaste (getinaks, tekstoliit, bakeliit, puitplast). Fenoolvaigu kõvenemine toimub kolmes järgus: esimeses tekib *resool*, milles puuduvad molekulide ristsidemed. Resool lahustub hästi piirituses või atsetoonis. Teises järgus tekib *resitool* – osaliselt kõvenenud vaik, mis ei lahustu nii hästi nagu resool, kuid pehmeneb kuumutamisel ja tahkub toatemperatuuril. Viimases järgus tekib *resiit* – täiesti kõvenenud ruumilise molekulaarehitusega termoreaktiivvaik, mis ei sula ega lahustu.

Teises järgus tekib resitoolist, kui vaigust on eraldunud kõik lenduvad fraktsioonid, valmistatakse prepreg'e.

Tänapäeval kasutatakse fenoolvaike peamiselt elektrotehniliste detailide ja kergkoormatud masinaosade valmistamiseks, sest materjal talub pikaajaliselt temperatuuri kuni 315 °C ja lühiajaliselt kuni 3000 °C.

Silikoonvaigud (*silicone resins*) sisaldavad peale traditsiooniliste süsivesinike orgaaniliste rühmade ka räni ja hapniku lüüsid, mistõttu silikoonvaikudel on head elektriisolatsiooni- ja hüdrofoobsed omadused, samuti korrosiooni-, elektrikaare- ja termopüsivus (250...550 °C) ning soojusjuhtivus. Silikoonvaikudest plastkomposiitide omadused toatemperatuuril on madalamad, võrreldes epoksü-, polüester- või fenoolvaikudega komposiitidega. Samuti on nad kallid. Seetõttu kasutatakse silikoonsideainega plastkomposiite näiteks konstruktsioonidetailide kaitsmiseks lühiajalise kõrge temperatuuri (kuni 2000...3000 °C) toime eest.

2.1.3. Keraamiline ja süsinikmaatriks

Keraamika, selle põhiomadused, liigid ja kasutus pole antud õppevahendi sisu [27]. Siinjuures toome ainult selle peamised positiivsed ja negatiivsed omadused.

Positiivsed: suur termopüsivus (keemilise koostise stabiilsus temperatuuri mõjul), korrosiooni- ja tulekindlus, suur kõvadus ja kulumiskindlus, väike tihedus metallidega võrreldes.

Negatiivsed: väike painde- ja tõmbetugevus, haprus, omaduste hajuvus, halb töödeldavus, kõrge hind.

Keraamika hapruse põhjuseks on põhimõtteliselt kolm asjaolu:

- a) jäigad, vähedeformeeruvad aatomsidemed keraamika kristallivõres (kovaalentside, kus kõrvalaatomid annavad enda väliselektronid üldkasutusse);
- b) hapra, amorfse klaasifaasi olemasolu keraamikas, mis on tihti keraamikaga sarnase keemilise koostisega, mistõttu on temast raske lahti saada;
- c) kuna keraamika peamine saamismeetod on paagutus, mille käigus komponendid ei sula, vaid jäävad tahkeiks, siis materjal sisaldab alati suuremal või vähemal määral *poore*, mis samuti vähendab keraamika tugevust.

Keraamiliste komposiitide loomise põhimõte seisneb selles, et koormus kantakse vähem-tugevast maatriksist üle tugevamale armatuurile. See aga õnnestub ainult tingimusel, kui vähedeformeeritav maatriks siiski niipalju deformeerub, et annab osa koormusest armatuurile. Ületada seda raskust võib kahte moodi: kasutades suurema elastsusmooduliga armatuuri, võrreldes maatriksi omaga, või eelneva armatuuri pingestamisega moodustada keraamilises maatriksis survepinged. Konkreetseid näited selle kohta on toodud edaspidi, siin aga nimetame peamised maatriksitüübid, mis leiavad kasutust tänapäevastes keraamilistes komposiitides.

- a) oksiidkeraamika: SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2 , MgO ;
- b) mitteoksiidkeraamika – SiC , Si_3N_4 ;
- c) segakeraamika – $\text{Ti}(\text{C}, \text{N})$, sialoon $\text{SiAl}(\text{ON})$.

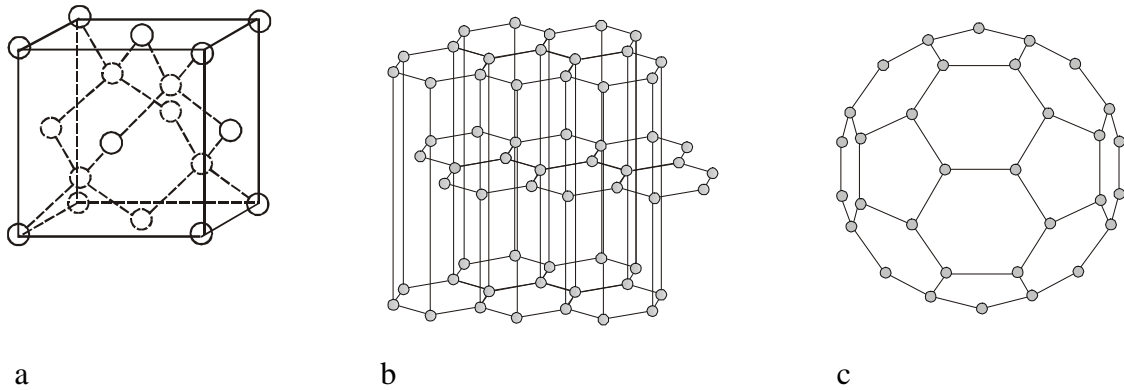
Erilist huvi pakub sialoon, mis on ühefaasiline keemiline ühend $\text{Si}_3\text{Al}_5\text{O}_3\text{N}_5$, väga stabiilne väikeses vahemikus. Sialoon avastati 1970. aastal üheaegselt Jaapanis ja Inglismaal. Sialooni valmistatakse traditsiooniliste pulbermetallurgia meetoditega. Struktuuri ja mehaaniliste omaduste poolest on sialoon lähedane räninitriidile Si_3N_4 , keemiliste omaduste poolest aga alumiiniumoksiidile Al_2O_3 . Tal on hea kuumustugevus ja -püsivus, väike joonpaisumistegur ja sellest tulenev kõrge termokindlus (vastupanu termolöögile), soojusjuhtivus ja kulumiskindlus.

Tänu headele mehaanilistele omadustele, odavusele ja tehnoloogilisele nimetatakse sialoone ka “superkeraamikaks”. Sialooni termokindlus ületab kõiki teisi keraamilisi materjale, mistõttu valmistatakse sellest gaasiturbiini töölabasid, raketimootorite düüse jne. Sialooni kasutatakse ka tööriistamaterjalina.

Oksiidkeraamika baasil KM kasutatakse peamiselt eriti kõrgetel temperatuuridel töötavates seadmetes (põlemiskambriid, vooderdus, tiigid), mitteoksiid- ja segakeraamikat kasutatakse aga madalamatel temperatuuridel, kuid suurte koormustel (masinaosad, lõikeriistad jne.)

Üha rohkem kasutatakse kõrgetemperatuursetes komposiitides grafiiti. Teatavasti esineb süsinik nii polümorfsetel kui ka amorfsetel kujul. See materjalirühm ei ühildu ühegi teise käsitletud rühmaga, kuid siin vaadeldakse seda polümeeride all. Süsinik võib moodustada kolm kristallilist kuju: *teemant*, *grafiit* ja *fullereenid*, mille kristallivõred on toodud joonisel 2.1.

Teemanti kristallivõres on iga süsinikuaatom seotud nelja teise süsinikuaatomiga kovaalentsidemete kaudu (joonis 2.1a), mis teeb ta väga kõvaks ja jäigaks materjaliks. Tööstuslikult kasutatakse teemanti eelkõige lõikeriistamaterjalina. Viimaste aastate jooksul on välja töötatud tehnoloogiad, mis lubavad saada õhukesi teemant- või teemandilaadseid pindeid, mis on laialt kasutatavad lõikeriistade tootmisel.



Joonis 2.1. Süsiniku kristallivõred; a – teemant, b – grafiit, c – fullereen

Grafiit on kihilise heksagonaalvõrega (joonis 2.1b). Erinevalt teemandist on grafiidis iga süsinikuaatom seotud kovalentsidemetega ainult kolme aatomiga põhitasandis (horisontaaltasand joonisel). Erinevate põhitasandite aatomid on seotud omavahel nõrkade van der Waalsi sidemetega, mistõttu grafiidi vastupanu nihkedeformatsioonidele on nõrk, ta kihistub kergesti, ja seega on tal head antifriksiooniomadused.

1985. a avastati veel üks süsiniku polümorfne kuju – fullereenid (joonis 2.1c). Fullereenid eksisteerivad diskreetsetes molekulaarvormides ja koosnevad õõnsatest sfäärilistest väga suurtest (60 ja enam) süsinikuaatomite kogumest, molekul on kujul, mis moodustab jalgpallitaolise geomeetria.

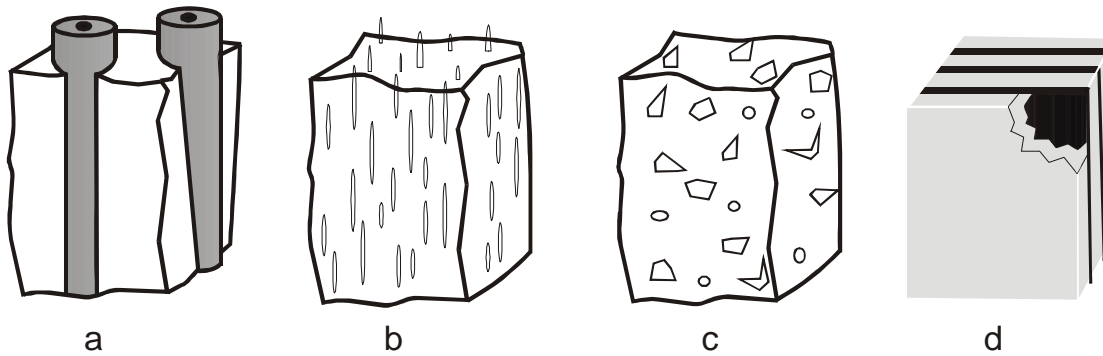
Komposiitmaterjali maatriksina leiab kasutust ainult grafiit, mille omadused suuresti sõltuvad selle tihedusest.

2.2. Komposiitmaterjali armatuur

Kuna komposiitmaterjalides kasutatakse maatriksina tavalisi isotroopsete omadustega materjale nagu metallid, plastid või keraamika, siis võib kinnitada, et komposiitide tootmine ja kasutus on peamiselt seotud uute armeerivate materjalide väljatöötamisega ja nende kontrollitava jaotusega maatriksis. Nimelt selle asjaolu tõttu nimetatakse KM projekteeritavate või ettearvutatavate omadustega materjalideks.

Komposiitmaterjalis kannab armatuur mehaanilist koormust või annab materjalile mingi eriomaduse – termokindluse, roomekindluse, vastupanu ioniseerivale kiirgusele jne, mida on võimatu saada tavaliste isotroopsete materjalide kasutamisel. Kuju poolest võib armatuur olla kiuline või pulbriline.

Pikkuselt võivad armeerivad kiud olla *pidevad*, mille pikkus on võrdne toote pikkusega (joonis 2.2a) või *diskreetsed* (joonis 2.2b). *Pulbrilise* armatuuri osakesi (joonis 2.2c) iseloomustatakse tavaliselt mitte nende mõõtmetega, vaid eripinnaga, mis positiivse efekti saamiseks peab olema väga suur (üle 10 m²/g). Komposiite omakorda liigitatakse vastavalt armatuurile: *pidev-*, *diskreetselt* ja *dispersioonarmeeritud*. Joonisel 2.2d on toodud veel üks armeerimise skeem, milles armatuurina kasutatakse lehekujulist materjali (paber, papp, lehtmets), nn laminaate või vastupidiselt plaatjat maatriksit, armatuurina aga kiudu või pulbrit (nn sändvits-tüüpi materjalid) (tabel. 2.1).



Joonis 2.2. Komposiitmaterjalide armeerimise skeemid: a – pidevarmeerimine, b – diskreetne armeerimine, c - dispersioonarmeerimine, d – kihtarmeerimine

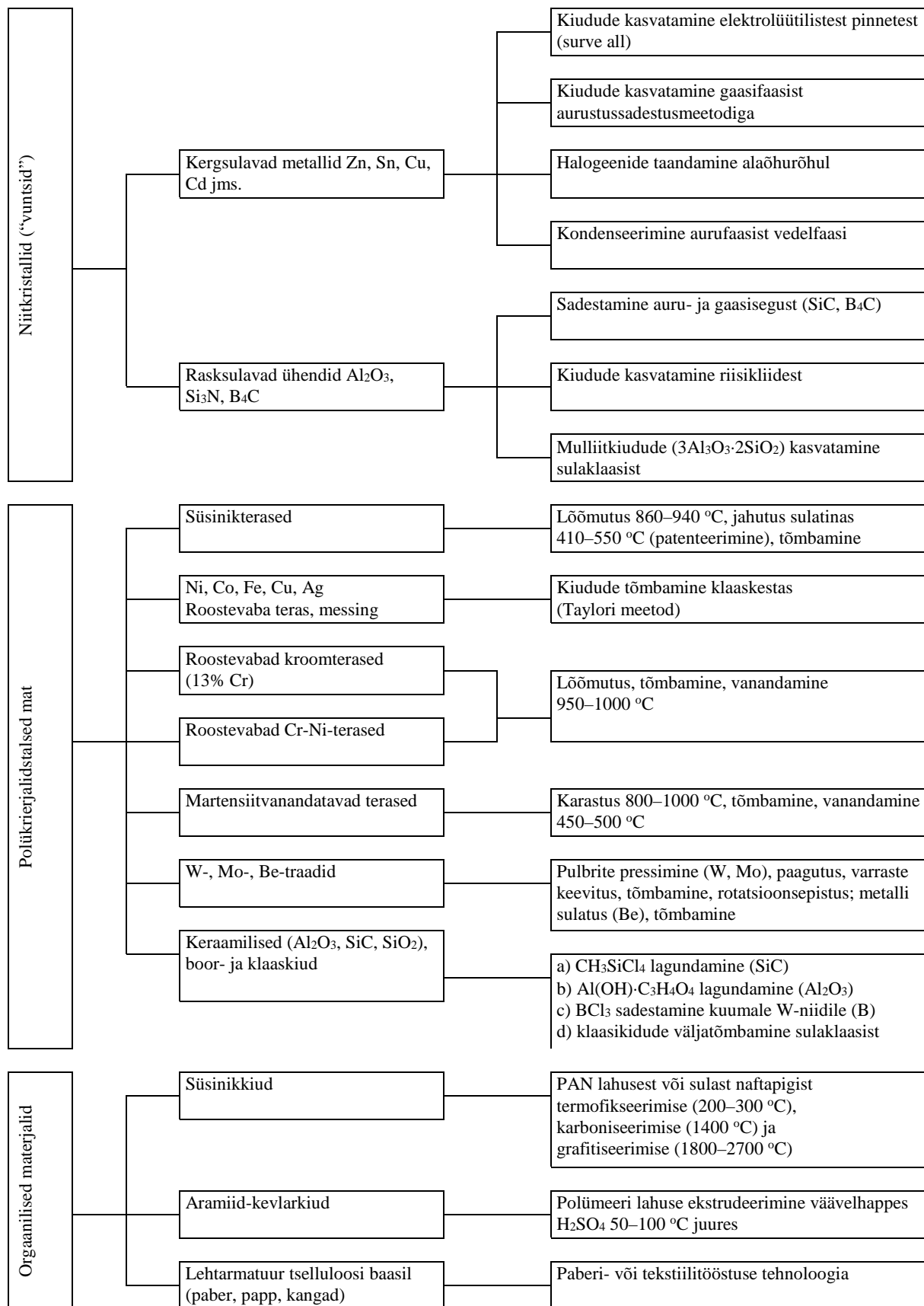
Armeerimist pikkade kiududega kasutatakse tavaliselt komposiidi tugevuse või jäikuse tagamiseks. Võrreldes pikkadega, tugevdavad diskreetsed kiud küll vähem, kuid annavad suure panuse materjali purunemistõesse, sest prao levikul kulub selle energia mitte ainult maatriksi purunemiseks (uute sisepindade moodustamiseks), vaid ka lühikeste kiudude deformeerimiseks ja väljatõmbamiseks maatriksist. Armeerimine pulbriosakestega raskendab dislokatsioonide liikuvust maatriksis ja takistab sellega rekristallisatsiooniprotsessi metallmaatriksis; seda aga ainult juhul, kui osakeste suurus on vahemikus 0,01–0,1 μm ja vahekaugus 0,05–0,5 μm .

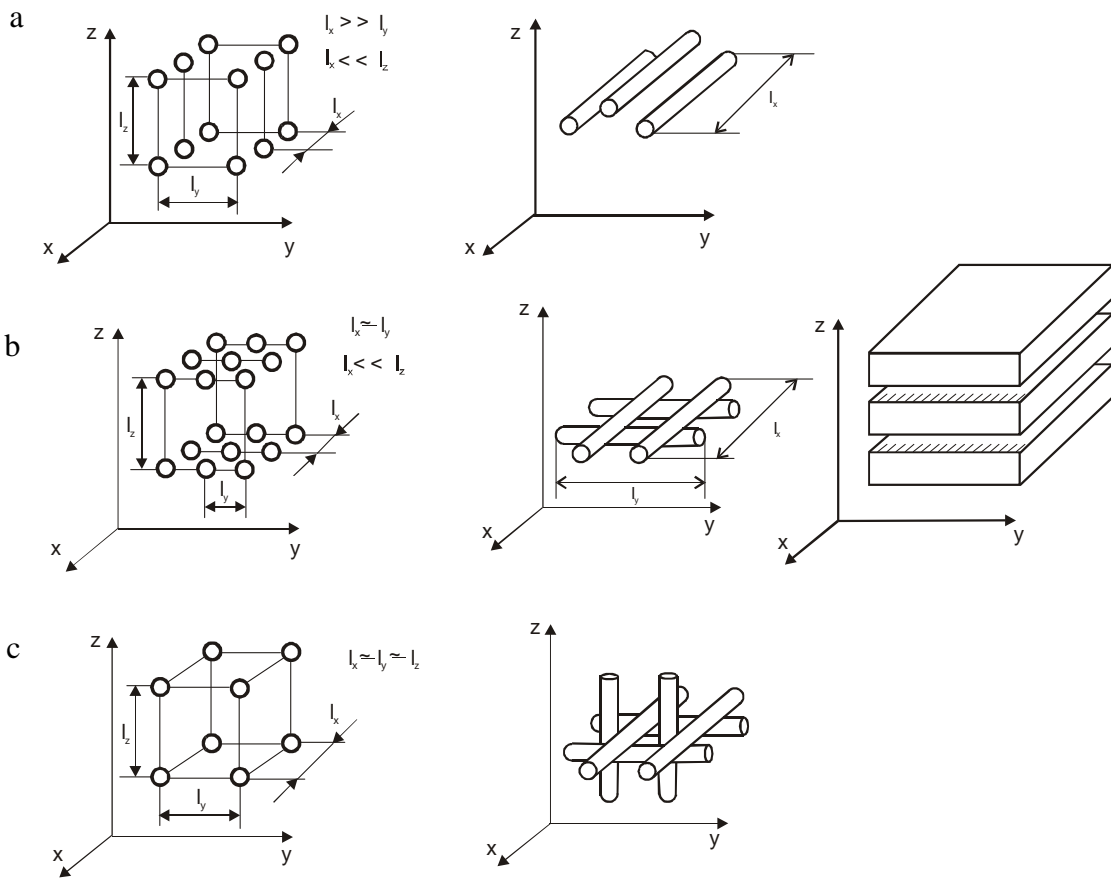
Tavaliselt kasutatakse pidevarmeerimist konstruktsioonimaterjalides, mis töötavad normaaltemperatuuril; diskreetset armeerimist hapra (keraamilise) maatriksi sitkuse tõstmiseks ja dispersioonarmeerimist roometugevates ning kõrgetemperatuursetes komposiitmaterjalides. Seega on kiudarmeeritud komposiitide mehaanilised omadused anisotroopsed, pulbrilistel aga isotroopsed.

Armeerimisel pidevkiududega sõltuvad komposiitide omadused suurel määral armatuuri suunast. See võib olla ühesuunaline (joonis 2.3a), kahesuunaline (joonis 2.3b) või kolmesuunaline e ruumiline (joonis 2.3c). Just see asjaolu teeb komposiitmaterjalide omadused anisotroopseteks e sõltuvateks koormuse suunast. Näitena tuuakse joonisel 2.4 vektori kujul kiulise komposiidi tugevuse σ ja elastsusmooduli (jäikuse) E sõltuvuse armeerimise suunast. Maksimaalse tugevuse ja jäikusega on KM pikikiudu ja minimaalsega – ristisuunas või 45 ° all.

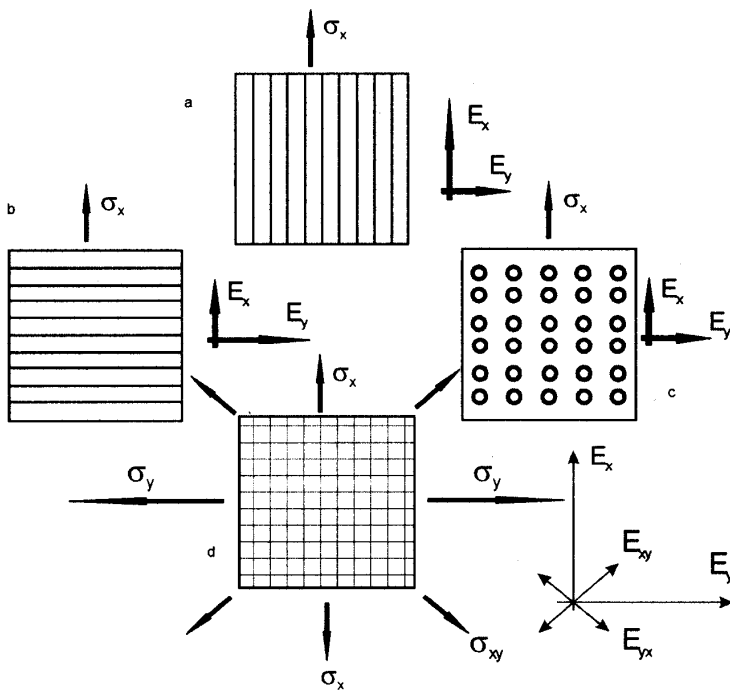
Struktuuri järgi jaotatakse armeerivad kiud *monokristalseteks*, *polükristalseteks* ja *amorfseteks*. Armeerivate materjalide liigitus on toodud tabelis 2.2, samuti nimetatud armatuuriliikide valmistamise tehnoloogia põhimõtted.

Armeerivate materjalide liigitus ja saamine





Joonis 2.3. Armatuuri orientatsioon komposiitmaterjalis:
a – ühesuunaline, b – kahesuunaline, c – ruumiline



Joonis 2.4. Materjali jäikuse sõltuvus armeerimise suunast

2.2.1. Niitkristallid

Niitmonokristallid ja -kiud kujutavad endast defektideta peeneid kiude läbimõõduga alates mõnest mikromeetrist ja pikkusega mõnest millimeetrist kuni mõne sentimeetrini. Paljud neist on juba ammu tuntud (nt asbestkiud), teised avastatud hiljem suurte valandite tühikutes. Suuremat huvi niitkristallide vastu hakati tundma pärast Teist maailmasõda, kui selgus, et nad on praktiliselt dislokatsioonivabad väga tugevad monokristallid. Seejärel hakati välja töötama meetodeid nende kunstlikuks valmistamiseks, mis praegu on realiseeritud mitmetes tööstuslikes tehnoloogiates.

Põhimõtteliselt võib monokristallide saamise meetodid jagada kahte rühma:

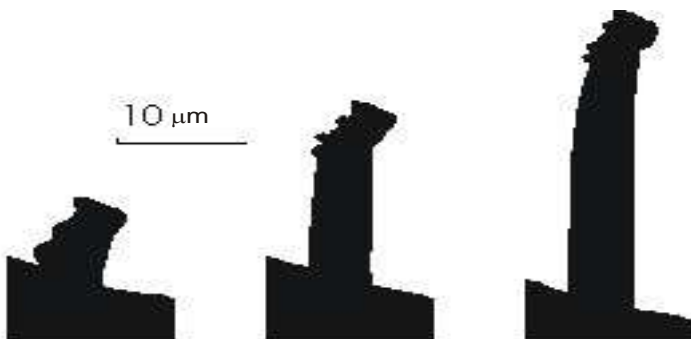
- materjali sadestamine kristalli tippu (*tip growth*),
- kristalli kasvatamine altpoolt (*basal growth*).

Esimese variandi puhul kasutatakse alusena pinnet, millele sadestuvad kõrgel temperatuuril ja suure rõhu all kiu tippu aatomid. Teise variandi puhul kasvab kristall välja alusest materjali sees.

Konkreetne valmistamisviis peab samuti arvestama tugevuse ja kristallide mõõtmete vahelist seost, homogeensust, omadusi ja keemilist koostist ning olema piisavalt tootlik.

Kristallide kasvatamine pindest

Kergsulavate metallide (Zn, Cd, Sn, In jt) niitkristallid võivad kasvada ka toatemperatuuril pindest, mis kantakse peale elektrolüütiliselt, aurufaasist või sulamist sadestamise teel. Kiudude läbimõõduga 0,1...0,2 μm pikkus ulatub mõne millimeetrini. Kiudude kasvu kiirus on 0,005...0,04 nm/s ja suureneb mitu tuhat korda, kui tõsta rõhku, temperatuuri ja luua oksüdeeriv keskkond. Kui terasplaati paksusega 0,3 mm katta 5 μm paksuse tinakihi, suruda see kahe jäiga terasplaadi vahele, saadud pakett lihvida ja otpinnast poleerida, siis lisatud koormuse mõjul tinapindes kasvavad kiiresti niitkristallid, mis kuumutamisel hapniku keskkonnas 215 °C juures saavutavad pikkuse kuni 5 mm. Pärast niitide eemaldamist pinnal hakkavad nad endistes kohtades uuesti kasvama. See näitab fikseeritud niitkristallide kasvu allikat, eeldatavasti on selleks dislokatsioonide tekkekohad (*Frank-Readi allikad*). Kiud ise on ristlõikelt prismakujulised, kasvavad pindmaterjali rekristallisatsiooni tulemusena, mistõttu nende kasv kiireneb temperatuuri ja lisatud koormuse mõjul (tina rekristallisatsioonitemperatuur on alla 0 °C). Tinakiu kasvu kineetika on näidatud joonisel 2.5.



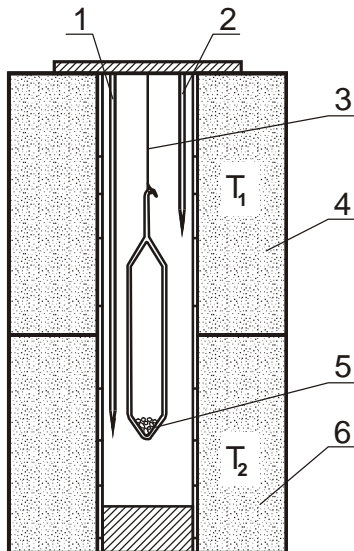
Joonis 2.5. Tinakiu kasvukineetika (intervall 2 nädalat)

Kiudude kasvatamine elektriväljas

Mõnede metallide niitkristalle (Fe, Ag, Cu jt) võib kasvatada ka elektrolüütilise sadestamisega. Selleks lisatakse elektrolüüdile orgaanilisi lisandeid, nagu oleinhape, želatiin või glükoos, kasutatakse väikese pinnaga katoode ja suuri voolutihedusi. Kiud saadakse suurema pikkusega kui eeltoodud viisil, kuid tänu lisandite “mustavale” toimele on nende tugevus väiksem kui teiste meetoditega saadutel.

Aurustussadestamine gaasifaasist (*vapor phase-evaporation and condensation*)

Meetod põhineb lähtematerjali kuumutamises ja aurustamises, järgnevas massiülekanDES läbi aurufaasi ja kondenseerumises jahutustsoonis. Kiudude kasvatamiseks on vaja kristallisatsioonikambrit (joonis 2.6) juhitava temperatuurigradiendiga aurustus- ja kondensatsioonitsooni vahel. Temperatuuril $T_2 > T_1$ aine, asetatuna vaakumkambri või inertsgaasiga täidetud kambri põhja, aurustub ja tõuseb üles ning sadestub niitkristallide kujul jahedamatele kambriseintele temperatuuriga T_1 . Kiudude kasvutingimustele mõjub temperatuurigradient, auru rõhk ja lähtematerjali puhtus. Kristallide parimad kasvutingimused tagatakse väikese üleküllastusastme juures, mis saadakse temperatuuride T_1 ja T_2 õige valikuga. Suurte ülekuumutusastmete korral sadestub materjal väikeste kristallide kujul. Paljude metallide kiud kasvatatakse puhta inertgaasi keskkonnas, kusjuures gaasi rõhu muutmisega juhitakse aine etteannet alusele, küllastusrõhku ja sellega kiudude kasvukiirust. Näiteks, tina- ja kaadmiumikiudude kuumutamiseks puhtas argoonis rõhul 780 Pa (600 mm elavhõbeda sammast) ja aluse temperatuuril 80...100 °C allpool metalli sulamistemperatuuri 100 tunni jooksul saavutatakse läbimõõduga 1...5 µm kiu pikkus mõni sentimeeter. Gaaside hoolikas puhastamine lisanditest võimaldab saada palju parema kvaliteediga niitkristalle.

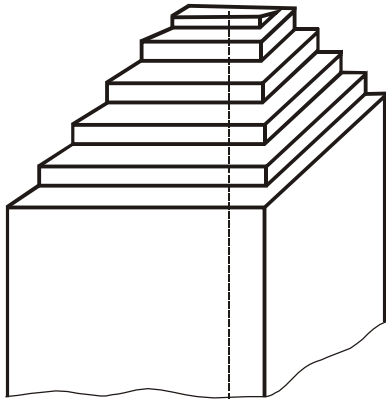


Joonis 2.6. Niitkristallide aurufaasist sadestamise teel valmistamise seade:

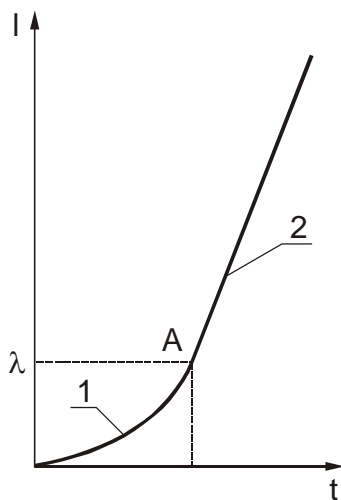
- 1, 2 – termopaar, 3 – vastukaal, 4 – ahi (temperatuuriga T_1), 5 – kristallidega ampull, 6 – ahi (temperatuuriga T_2)

Kiudude kasvu aurufaasis sadestamisega saab seletada dislokatsiooniteooria abil. Oletatakse, et kristallide kasv on seotud kruvidislokatsioonide väljumiskohtadega pinnale. Aine sadestatakse aatomite ümberasetsemise teel kruvidislokatsioonide väljumiskohal, kusjuures sedamööda, kuidas uued aatomid sadestuvad, tõuseb kristall aluselt telje suunas, mis langeb kokku Bürgersi dislokatsiooni vektori suunaga (joonis 2.7). Kasvu algstaadiumis

niitkristallid pikenevad eksponentsiaalselt, seejärel aeglustub kasvu kiirus ja muutub hiljem konstantseks (joonis 2.8). Aurufaasist sadestamisega saadakse eelkõige madala aurustus-temperatuuriga metalliühendid nagu ZnO_2 , CaS , WO_3 jt. Kuid rasksulavatest ühenditest kristallide kasvatamiseks see meetod praktiliselt ei kõlba saadavate kristallide väikeste mõõtmete, aeglase kasvu, aga samuti liiga kõrge temperatuuri tõttu.



Joonis 2.7. Niitkristallide kasv kruvidislokatsiooni mehhanismi järgi

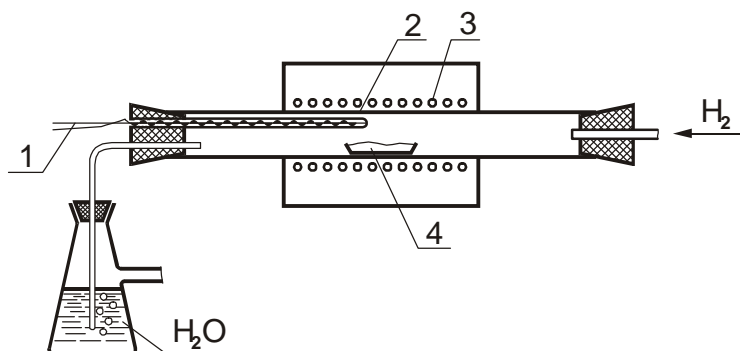


Joonis 2.8. Niitkristallide pikkus sõltuvalt kasvuajast:

A – üleminekupunkt eksponentsiaalsest sõltuvusest lineaarsele

Niitkristallide saamise keemilised meetodid (*vapor phase-chemical reaction*)

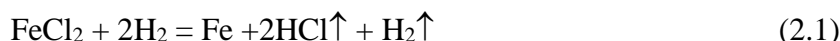
See on laboratooriumeis ja tööstuses kõige levinum niitkristallide saamise viis. Erinevalt kiudude saamisest gaasifaasist sadestamisega, saadakse sel meetodil niitkristallid keemilise reaktsiooni teel aurustatava materjali ja ümbritseva gaasilise keskkonna vahel, kus lenduvad komponendid suunatakse sadestus- ja kristallisatsioonitsooni. Põhiline keemiline meetod metallkiudude saamisel on mitmesuguste metalliühendite taandamine. Näiteks soolade taandamine, nagu näidatud joonisel 2.9. Keraamilisse konteinerisse (4) pannakse sool, konteiner viiakse ahjukuumutustsooni (3), millest läbi alund- (Al_2O_3) või kvartstoru (SiO_2) (2) lastakse inertgaasi ja vesiniku segu.



Joonis 2.9. Niitkristallide halogeenide taandamise meetodil kasvatamise seade:

1 – termopaar, 2 – toru, 3 – ahi, 4 – soolaga “laevuke”

Kloorraua taandamisreaktsioon väljendub valemiga



Raua niitkristallid moodustuvad konteineri seintel ja serval koheva sademena. Kiudude mõõtmed ja kuju sõltuvad taandamisreaktsiooni läbiviimise tingimustest, nagu temperatuur, vesiniku läbilaske kiirus ja inertgaasi kogus temas, lähteainete puhtus. Näiteks koobaltikiud, mis on saadud puhta broomkoobalti kuumutamisel 750...760 °C vaakumis 10^{-2} Pa (10^{-4} mmHg) vesiniku läbilaskmisel 0,4...0,8 cm/s, on tahkesendatud kuupvõrega. Tabelis 2.3 on toodud mõningate halogeenmetallide kiudude saamise režiimid.

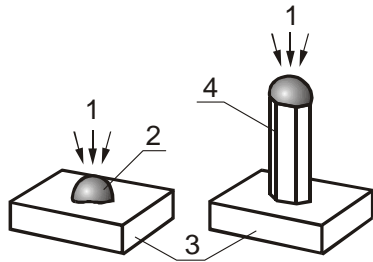
Tabel 2.3

Optimaalsed taandamisrežiimid halogeenidest kiudude saamiseks

Metall	Halogeen	Taandamis-temperatuur, °C	Kiudude maksimaalne pikkus, mm	Halogeeni auru rõhk, Pa (mm Hg)
Cu	CuCl, CuBr, CuJ	650	50	13,5 (10^{-1})
Ag	AgCl, AgJ	800	10	0,18 (10^{-2})
Ni	NiBr ₂	740	2	88 (0,7)
Co	CoBr ₂	730	3	10,5 (10^{-1})
Fe	FeCl ₂ , FeBr ₂	730...760	20	77 (0,6)

Aur-vedelik-tahke-meetod (*vapor-liquid-solid (VLS)-method*) kuulub keemiliste saamis-meetodite hulka. Selle meetodi puhul aine kontsentreeritakse läbi vedela vahefaasi, mis moodustub alusel tilgakujulisena. Tilga pind on eelistatavaim osa aine kristallumiseks. Üleküllastunud vedelfaasist kasvab niitkristall. See toimub vabade aatomite kogunemise teel tahke ja vedela faasi piirile. Kristalli kasv ühes suunas on faasidevahelise piiri vedelik-tahke anisotroopia põhjuseks.

Protsessi mehhanism on näidatud ränikristallil joonisel 2.10. Räniplaadi (3) pinnale kantakse vedela kulla tilk, mille kristallisatsioonitemperatuur on 1063 °C. Räni lahustub kullas ja moodustub kuld-räni tardlahuse tilk (2). Räniaurud (1) suunduvad alusele (3) ja kondenseeruvad tilgaks (2). Viimasest eraldub piiril vedelik-kristall niitkristall (4). Kristalli ristmõõtmed on määratud tilga läbimõõduga ja kiu kasvukiirus – kristallisatsioonikiirusega.



Joonis 2.10. Ränikristalli kasvatamise skeem “aur-vedelik-kristall” mehhanismi järgi:
1 – aur, 2 – vedel Au-Si-sulam, 3 – räniaur, 4 – ränikristall

Auru-gaasifaasist sadestamine

See on peamine meetod rasksulavaist ühendeist (nagu Al_2O_3 , SiC , Si_3N_4 , B_4C , MgO jt) niitkristallide saamiseks, milliseid kasutatakse metallmaatriksiga kuumustugevate komposiitide valmistamiseks. Meetodi põhiline erinevus varem vaadeldud gaasifaasist aurustussadestamisega seisneb selles, et rasksulavat ühendit ei aurustata vahetult, vaid ainult tema metalseid koostisosi, mis seejärel reageerivad omavahel ja töökeskkonna gaasidega. Moodustub rasksulav ühend, mis eraldub niitkristallide kujul. Neil on äärmiselt suur tugevus, jäikus ja kõrge sulamistemperatuur ning kõrge keemiline stabiilsus. Kui metallkiud kalduvad lahustuma maatriksis, siis rasksulavast ühendist kiud reageerivad märksa vähem maatriksiga.

Rasksulavate ühendite niitkristallide väike tihedus ($3000 \dots 5000 \text{ kg/m}^3$) võimaldab vähendada metallkonstruktsioonide massi, mis on oluline lennunduses, kosmosetehnikas ja ka teistes tänapäeva tehnikavaldkondades. Järgnevalt antakse lühike ülevaade nende saamise tehnoloogiast.

Ränikarbiidi (SiC) kiudude saamiseks kasutatakse gaasisegu metaanist CH_4 ja kloorisilaanist SiCl_4 , mis reageerides moodustavad ränikarbiidi ja soolhappe

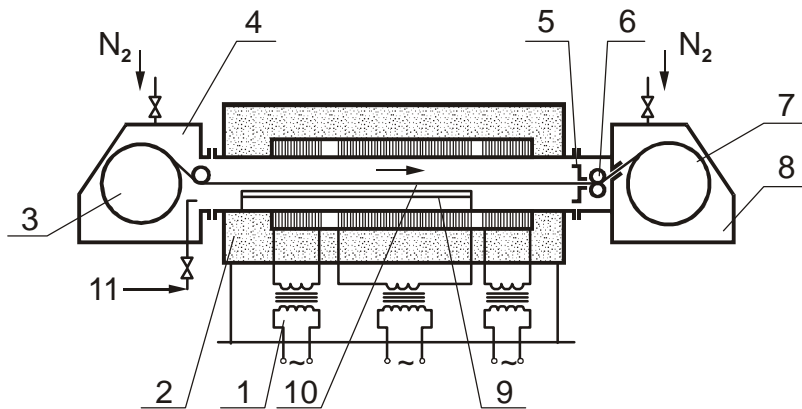


mis omakorda reageerides moodustavad metüülkloorisilaani järgmise reaktsiooni järgi



Termilisel lagunemisel tekkivad viimasest ränikarbiidi monokristallid.

Vastav ränikarbiidi saamise seade (joonis 2.11) kujutab ennast hermeetilist siliit- (SiC) või grafiitküttekehadega läbivat ahju (2). Ahju otsa on paigaldatud kambrid (4) ja (8), millest tõmmatakse läbi ahju grafiitlinti (10). Grafiitlint on mähitud trumlile (3) ja, läbides ahju töösooni, tõmmatakse see vedava trumli (6) abil trumlile (7). Niitkristallid kasvavad vahetult lindil $1250 \dots 1350 \text{ }^\circ\text{C}$ juures. Kasv toimub metüültrikloorisilaani CH_3SiCl_3 või süsinikku sisaldava gaasikeskkonna reageerimisel konteineris (9) oleva lähtematerjaliga. Protsessi kestus on $5 \dots 7$ ööpäeva. Pärast trumli (7) töötlemist kambris (8) eralduvad kiud kergesti grafiitlindist.

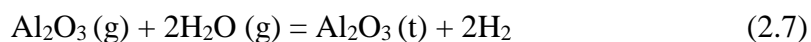
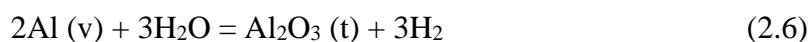
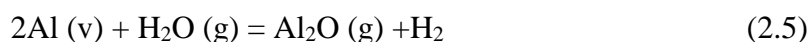
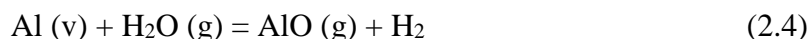


Joonis 2.11. Ränikarbiidist niitkristallide grafiitalusel kasvatamise seadme skeem:

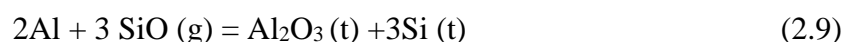
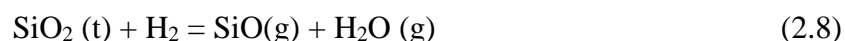
- 1 – transformator, 2 – ahi, 3 – trummel kangaga, 4 – sisselaadimiskamber,
- 5 – juhikud, 6 – pingutusrullid, 7 – vastuvõtutrummel, 8 – väljelaadimiskamber,
- 9 – konteiner seguga, 10 – lint

Teine SiC kiudude saamise meetod on kirjeldatud töös [7] ja põhineb riisivarte kasutamisel. Riisivarred sisaldavad 15...20% SiO₂. Esiteks kuumutatakse varsi õhus 700...900 °C juures selleks, et eraldada lenduvad lisandid. Jääk sisaldab peaaegu võrdsetes osades SiO₂ ja vaba süsinikku – tahma. SiC moodustub jäägi kuumutamisega N₂ või NH₃ keskkonnas 1500...1600 °C juures ühe tunni jooksul. Reaktsiooni vaheetapina moodustub SiO ja CO, mis eraldub läbivate gaasidega. Jääv mittepõlev vaba süsinik eraldub segu kuumutamisel õhus 800 °C juures. Saadava SiC kogus moodustab ligikaudu 10% esialgsest riisivarte kogusest ja sisaldab peale selle SiO₂ ja Si₃N₄ lisandeid. 10% saadavast toodangust moodustavad SiC kiud läbimõõduga 0,1...1,0 μm ja pikkusega kuni 50 μm, ülejäänud on polükristalsed SiC osakesed. Protsess on odav ja lihtne, kuid kiudude kvaliteet on madalam kui eelmise meetodi puhul.

Alumiiniumoksiidi (Al₂O₃) e *safiiri* niitkristallid saadakse alumiiniumi oksüdeerimisel niiskes vesinikus. Protsess toimub järgmise reaktsiooni järgi:

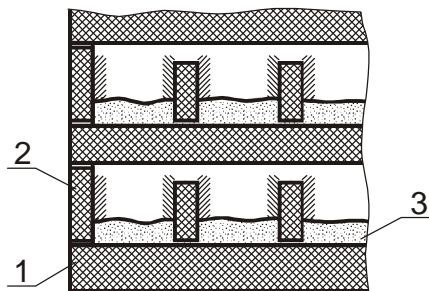


Toodud keemilised reaktsioonid näitavad, et Al₂O₃ niitkristallid kasvavad alumiiniumoksiidi oksüdeerimisel niiskes vesinikus, moodustades vahepealsed oksiidid AlO ja Al₂O. Kui protsess läbi viia mullitkeraamikast (3Al₂O₃·2SiO₂) reaktoris, siis alumiiniumi oksüdeerijaks võib olla ränioksiid, mis moodustub mulliidiis oleva ränioksiidi taandamisel vesinikuga:



Tööstuses saadakse Al₂O₃ kiude pakettis (joonis 2.12). Protsess viiakse läbi 1250...1300 °C juures vesinikus niiskustäpiga –30...–40 °C (küllastatud veeauru tektemperatuur) ja hapnikusisaldusega 0,05...0,1%. Alumiiniumi saadakse alumiiniumipulbrist (3), mis asetatakse tulekindlatele keraamilistele plaatidele. Plaadid, mille vahelt voolab läbi vesinik,

on üksteisest eraldatud vaheseintega (2). Ahjud on poolmetoodilised, kus paketid tõugatakse aeglaselt läbi töötsooni. Teisi rasksulavaid ühendeid (räninitriid, alumiiniumnitriid, boornitriid jt) saadakse samal viisil.



Joonis 2.12. Al_2O_3 niitkristallide kasvatamise skeem:
1 – Al_2O_3 plaat, 2 – pikivahesein, 3 – alumiiniumipulber

Kiudude kasvatamine sulamist

Üks kiudude saamise võimalus on nende kasvatamine vahetult sulameist (*growth directly from melts*), mida kasutatakse nt mulliidist ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) niitkristallide saamiseks. Mulliidil on kõrge sulamistemperatuur ($1910\text{ }^\circ\text{C}$), keemiliselt on ta väga inertne, suure tugevusega ja tal puuduvad polümorfsed muutused. Kõik see teeb mulliidi perspektiivseks armeerivaks materjaliks kuumustugevate KM loomisel. Lähtematerjalina kasutatakse fluori lisanditega boorsilikaatklaasi: $2\text{NaF} \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 15\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 18\text{SiO}_2$ või $2\text{LiF} \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 15\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 18\text{SiO}_2$. Fluoriühendid kiirendavad rekristallisatsiooniprotsessi, aga boorsilikaatklaasi juuresolek vähendab paagutustemperatuuri, seejuures sulami sitkust oluliselt vähendamata. Valmistatakse segu puhastest keemilistest reaktiividest, mida eelnevalt kuumutatakse $400 \dots 800\text{ }^\circ\text{C}$ juures. Pärast komponentide hoolikat segamist segu sulatatakse grafiittiiglis tunni aja jooksul ja jahutatakse õhus. Niitkristallid läbimõõduga $0,3 \dots 1\text{ }\mu\text{m}$ saadakse pikkusega $250 \dots 1000\text{ }\mu\text{m}$. Saadud tardunud sulam purustatakse pulbriks osisega $1 \dots 4\text{ mm}$, valatakse peale fluorhape (HF). Pärast $70\text{--}1000$ -tunnist hoidmist lahustub klaasifaas happes ja mulliidikristallid sadestuvad nõu põhja.

Tänapäeval valmistatakse niitkristalle Euroopas tööstuslikult alumiiniumoksiidist (Al_2O_3), ränikarbiidist (SiC) ja mulliidist ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$). Niitkristallide kasutamisel tuleb aga arvestada nende suurema maksumusega, võrreldes teiste armatuuriliikidega. USA-s lastakse välja kiude plastide ja metallide armeerimiseks firmamärgi “Alborex” all, mis kujutavad endast niitkristalle koostisega $9\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3$, pikkusega $10 \dots 30\text{ }\mu\text{m}$ ja läbimõõduga $0,5 \dots 1\text{ }\mu\text{m}$. Nende saamine põhineb alumiiniumsulfaadi ja boraadi sulatamises $1440\text{ }^\circ\text{C}$ juures. Saadud sulam sisaldab kuni $86\% \text{ Al}_2\text{O}_3$.

Põhjalikult on niitkristallide omadusi käsitletud monograafiates [7, 26].

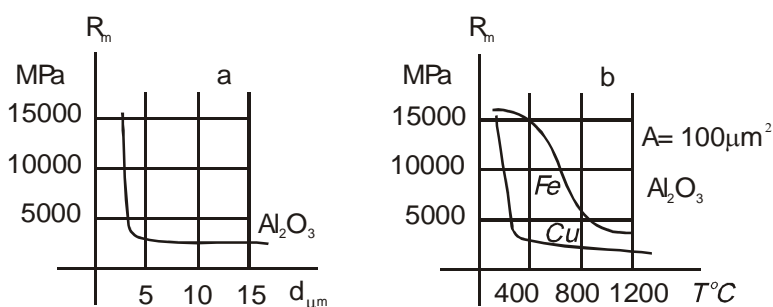
Mida väiksem on niitkristalli läbimõõt, seda väiksem on kristallivõre defektide arv ja seda tugevam on monokristall. See võib läheneda teoreetilisele tugevusele. Kuna teoreetiline nihketugevus on seotud ainult aatomitevaheliste jõududega ($\tau \cong G/2\pi$), siis nt raua korral peaks ta olema *ca* $14\,000\text{ N/mm}^2$. Tegelikult on aga raua nihketugevus *ca* 200 N/mm^2 , mis on 70 korda väiksem teoreetilisest. Selle erinevuse põhjustavad polükristalse raua kristallivõre defektid – vakantsid ja dislokatsioonid. Andmed niitkristallide tugevuse kohta on toodud tabelis 2.4.

Tabel 2.4

Niitkristallide omadused

Materjal	Sulamis-temperatuur, °C	Tihedus kg/m ³	Elastsus-moodul E, N/mm ² ·10 ³	Tõmbe-tugevus R _m , N/mm ²	Eri-tugevus, km	Erielastsus-moodul, km
Grafiit	3640	1660	710	20000	1200	42500
SiC	2665	3320	490	21000	630	14800
B ₄ C	2450	2490	450	14000	565	18000
Al ₂ O ₃	2040	3880	640	28000	725	16500
Fe	1540	7800	200	13300	170	2560
Cu	1080	8900	130	3000	35	1500

Niitkristallide tugevus sõltub oluliselt temperatuurist ja läbimõõdust (joonis 2.13). Nagu on näha toodud kõveratest, realiseerub niitkristallide suur tugevus kõige paremini minimaalsel läbimõõdul (1...3 µm) ja toatemperatuuril.



Joonis 2.13. Al₂O₃ niitkristallide tugevuse sõltuvus läbimõõdust (a) ja temperatuurist (b)

Kõige perspektiivsemad on keraamilised niitkristallid, sest need on väikese tihedusega, ning kuumutamisel säilib nende jäikus ja tugevus paremini. Metallsed niitkristallid kaotavad suurema osa oma tugevusest juba temperatuuril 500 °C. Samuti oksüdeeruvad nad kergesti. Kuna kristallid on ette nähtud peamiselt kuumuskindlate detailide tootmiseks, siis metallarmatuuri kasutada ei tohi: metallid lahustuvad enamasti maatriksis.

2.2.2. Metalltraadid

Mitmesuguse koostisega metalltraatide valmistamise tööstuslik tehnoloogia on juba ammu välja töötatud, mistõttu nende kasutamine KM armatuurina ei tekita mingeid raskusi. Metalltraadi valmistamise protsess koosneb tooriku kuumutamisest kaltsuse likvideerimiseks, seejärel toorik valtsitakse, pealispind söövitatakse keemiliselt ja tõmmatakse mitmesuguse konstruktsiooniga traaditõmbepinkidel. Mõningased iseärasused on seotud raskulavate metallide pulbritest valmistatud traadi kasutamisega. Metalltraatide põhilised liigid ja nende mehaanilised omadused on tabelis 2.5. Kasutatakse suure süsinikusisaldusega mittelegeerteraseid, roostevabu austeniitseid või austeniit-martensiitseid Cr-Ni-teraseid või martensiitferriitseid Cr-teraseid. Eraldi rühma moodustavad metalltraadid martensiitvanandatavaist terastest, raskulavatest metallidest ja berülliumist.

Metalltraadi omadused

Materjal	Sulamis-temperatuur, °C	Tihedus, kg/m ³	Tõmbetugevus R _m , N/mm ²	Elastsusmoodul E, N/mm ² ·10 ³	Läbimõõt, mm	Eritugevus, km	Erielasticusmoodul, km
Mittelegeerteras, C=0,8%	1400	7800	3000	200	0,1	38	25500
Kõrgtugev martensiitvanandav teras (8% Ni, 18% Mo, 14% Co)	1450	7900	3500	200	0,1	44	25500
Volfram	3400	19400	4000	20	0,1	21	21500
Molübdeen	2650	10200	2200	360	0,03	22	35000
Berüllium	1280	1800	1300	250	0,03	83	140000

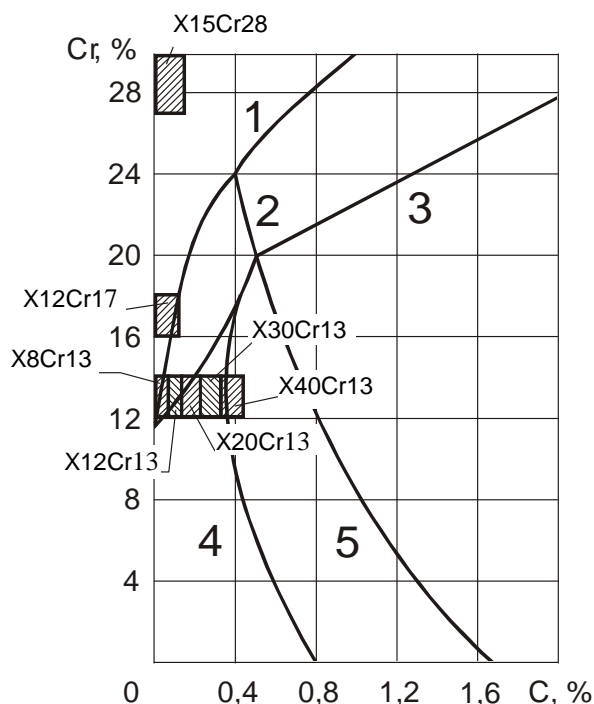
Kõige odavamatel **mittelegeerterasest traatidel** on tugevus kuni 3000 N/mm², kuid nad säilitavad selle ainult kuni temperatuurideni 200...250 °C. Üle selle temperatuuri algavad noolutusprotsessid, ja traat kaotab kiiresti oma tugevuse. Terased, mis sisaldavad üle 0,8 % C, on väikese plastsusega, eriti kui struktuuris on sekundaarne tsementiidi võrk. Seepärast enne tõmbamist kuumutatakse toorikut erilisel režiimil – s.o patenteeritakse eesmärgiga saada struktuuris peenlamelne perliit/trostit. Patenteerimine kujutab endast tooriku kuumutamist temperatuurini 860...940 °C (üle faasimuutuse temperatuuri A_{c1}), seisutust sellel temperatuuril ja jahutamist astmeliselt sulatinas kuni 410...550 °C ning järgnevat jahutamist õhus. Pärast seda tõmmatakse toorikud mitmekordselt ühekordse deformatsioonistmega 15...30%, viies summaarse deformatsiooni kuni 80...90%.

Terastraadi tugevuse tõus saadakse samuti elektrotermilise töötlemisega. See seisneb elektrivooluga kuumutamises kiirusega 400 °C/s kuni austeniidini, jahutamises õhus ja külmtõmbamises. Kiire temperatuuritõus viib austeniidis süsinikuga rikastatud tsoonide tekkele endistes plaatja tsementiidi alades. Kiire temperatuuritõusu tõttu ei jõua süsinik austeniidis ühtlaselt jaguneda, ja tooriku jahtumise käigus eraldub tsementiidi plaatide kohal ferriit. Järgneva külmtõmbamise käigus piki traadi telge moodustuvad ferriidis suunatud tsementiidikiud. Sellise omapärase struktuuriga traadi tugevus ulatub kuni 3300...3700 N/mm², kuid nende plastsus on madal.

Roostevabad austeniitsed kroomnikkelteras (Cr-Ni-sisaldusega (%) 18–8, 18–12, 25–12 ja 25–20) omandavad tänu suurele niklisisaldusele peale karastamist austeniitstruktuuri toatemperatuuril, ja kõrgematel temperatuuridel faasimuutustele ei allu. Nende tugevus saavutatakse karestumisega, mis säilib samade temperatuurideni nagu mittelegeerterastelgi, kuid tugevusega kaasneb ka suur plastsus laias temperatuurivahemikus. See võimaldab kasutada suuri deformatsioonistmeid tõmbamisel. Nad on hea korrosioonikindlusega (erinevalt mittelegeerterastest) ja hästi keevitatavad.

Roostevabadest martensiitterastest (C-sisaldus 0,2...0,4%, Cr-sisaldus 13...17%) traadid on 40...50% kõrgema tugevusega kui austeniitterastest traadid. Tõsi, martensiitne struktuur on stabiilne väga kitsas koostise vahemikus. Kui süsinikku on vähe ja kroomi üle 15%, siis teras muutub ferriitseks ja ei karastu (joonis 2.14). Termotöötlemine seisneb karastamises 950...1050 °C õhku või õlisse, seejärel noolutatakse traati 200 °C juures, mistõttu traat

saavutab tugevuse 2000 N/mm² ja enam. Seega martensiitterastest traatarmatuuriga KM töötemperatuur ei tohi ületada 200 °C.



Joonis 2.14. Kroomteraste struktuur:

1 – ferriitne, 2 – poolferriitne, 3 – ledeburiitne, 4 – üleeutektne,
5 – alaeutektne

Martensiitvanandatavad terased säilitavad oma suure tugevuse palju kõrgema töötemperatuuri juures. Nende peamine legeriv element on nikkel (17...26 %) ja rida elemente (Ti, Al, Mo), mis võivad nikliga või omavahel moodustada intermetalliide. Need terased on struktuurilt austeniitsed ja praktiliselt ei sisalda süsinikku ($C \leq 0,03$ %). Nende sulamite suur tugevus koos sitkusega tagatakse kahe tugevdamismehhanismi koosmõjul: martensiitne üleminek ($\gamma \rightarrow \alpha$) karastamisel ja järgnev vanandamine. Peale karastamist temperatuurilt 800...1000 °C on süsinikuvaba martensiit järgmiste omadustega: $R_m=1200$ N/mm², $R_p=1000$ N/mm², $A=20\%$, $Z=75\%$, $KU = 80$ J. Tulemusena on teras hästi survetõeldav, mistõttu külmtõmbamist saab teha suurte deformatsiooniastmetega (kuni 25% läbimi kohta). Traadi vanandamine temperatuuridel 450...510 °C 6...8 tunni jooksul viib austeniidi lagunemisele ja peente intermetalliidsete osakeste tekkele (Ni_3Al , $NiTi$, Fe_2Mo , Ni_3Ti), mis blokeerivad dislokatsioonide liikumise, kuid ei suurenda haprust (tänu väikesele süsinikusisaldusele puudub terases habras karbiidne faas). Seega põhiline erinevus martensiitvanandatavatel terastel, võrreldes teistega, ei seisne mitte suures tugevuses, vaid suures tugevuses koos anomaalselt suure sitkusega. Seetõttu nende sulamite puhul löögisitkuse näitajana ei kasutata mitte purustustööd, vaid purunemissitkust K_{1c} .

Martensiitvanandatavatel terastel on võime tugevneda vanandamisel – väga hinnaline omadus kasutamisel armeeritavate elementidena. Näiteks toimub alumiiniummaatriksiga KM difusioonkeevitus, valtsimine ja kuumpressimine nimelt sellises temperatuurivahemikus, mil armeerivad kiud tugevnevad. Kõik teised traadid kaotavad nendel temperatuuridel tugevuse täielikult.

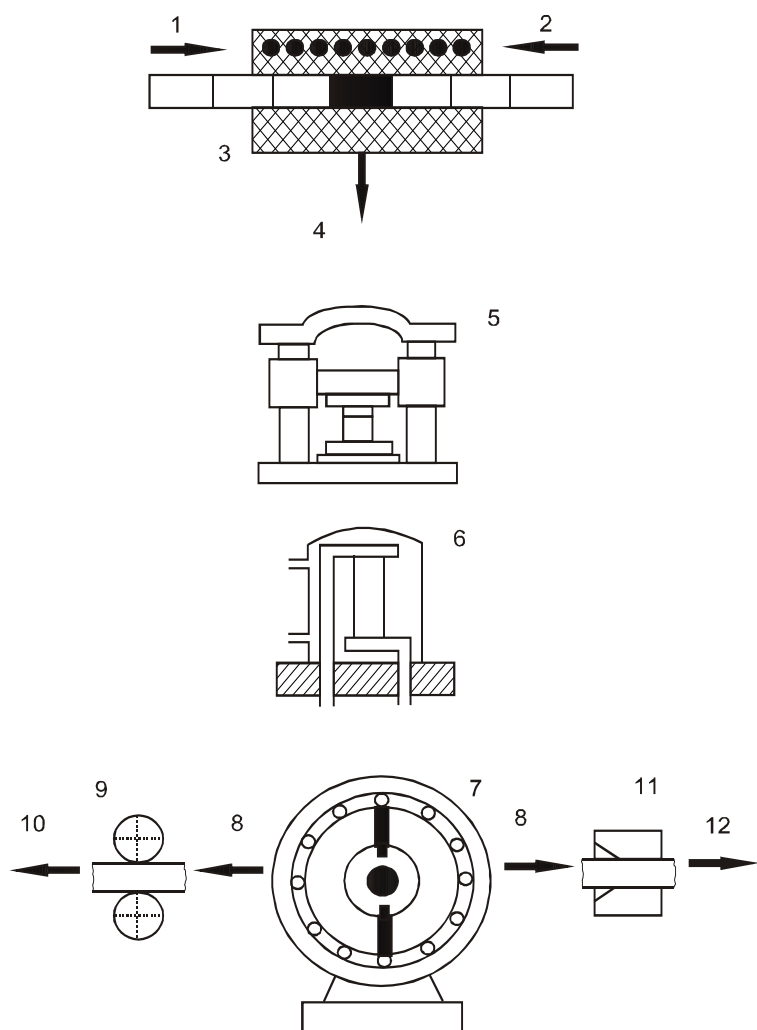
Kuumustugevate KM loomisel on vajalik armatuur, mis on võimeline tugevust kaotamata pika aja jooksul töötama kõrgetel temperatuuridel. Sellistele tingimustele vastavad raskuslavad metallid (W ja Mo).

Volfram- ja molübdeentraadi kasutamist soodustab asjaolu, et neid on valmistatud elektrotehnika jaoks suurtes kogustes juba kümneid aastaid. Erinevus elektrotehnikas ja komposiitmaterjalis kasutatava W- ja Mo-traadi vahel on nende tugevuses: armeerimiseks on vaja kõrgemate tugevusnäitajatega traati, võrreldes traadiga kütteelementide tarvis. Tugevust saab kergesti suurendada volframi ja molübdeeni legerimise teel.

Kõrge sulatustemperatuurist tulenevalt valmistatakse W- ja Mo-traati pulbermetallurgia meetodil, mille skeem on toodud joonisel 2.15. Peamised operatsioonid on järgmised:

1. Oksiidid WO_3 või MoO_3 taandatakse vesinikus kahes järgus, mil viiakse sisse ka lisandid ThO_2 , Co, Fe tugevuse suurendamiseks:
 - a) esimene järk – $620...670\text{ °C } WO_3 + H_2 \rightarrow WO_2 + H_2O$;
 - b) teine järk – $800...870\text{ °C } WO_2 + 2H_2 \rightarrow W + 2H_2O$.
2. Pulber pressitakse pressvormis toorikuteks pikkusega 500 mm ning ristlõikega $8 \times 8...40 \times 40$ mm surve all $400...500\text{ MPa}$ ($4-5\text{ t/cm}^2$), kasutades glütseriinpiirituse lahust pulbri pressitavuse parandamiseks.
3. Paagutamine toimub kahes järgus:
 - a) vesinikuaahjus temperatuuril $1000...1300\text{ °C}$;
 - b) voolu läbijuhtimise teel (keevitamisega) temperatuuril 3000 °C .Toorik kahaneb paagutamisel $15...20\%$ ja saavutab $5...15\%$ poorsuse.
4. Paagutatud poorne toorik tihendatakse sepistamise või valtsimise teel. Sepistamiseks kasutatakse nn rotatsioonsepistamismasinaid, mis tihendavad toorikut temperatuuril $1250...1450\text{ °C}$.

Pärast sepistamist tõmmatakse toorik kuni $0,01\text{ mm}$ läbimõõduga traadiks, kusjuures temperatuur on protsessi algul 1000 °C , lõpus aga $\geq 500\text{ °C}$. Tõmbamisel tehakse vahepealsed kuumutamised, kuna materjal kalestub võrdlemisi kergesti. Traati valmistatakse nii puhtast volframist ja molübdeenist kui ka volframreeniumi-, volframtooriumi- ja volfram-molübdeenisulameist. Traadi tugevus sõltub selle läbimõõdust: läbimõõduga $0,05...0,1\text{ mm}$ volframtraadi tugevus on $2500...3000\text{ N/mm}^2$ ja sama läbimõõduga molübdeentraadi tugevus on $2000...2500\text{ N/mm}^2$. Raskuslavaist metallidest traati kasutatakse kuumustugevate KM valmistamiseks, kus põhilised näitajad on vastupanu roomavusele ja kestustugevus. Kuni 1100 °C -ni on suurim tugevus volframreeniumtraadil, veel kõrgematel temperatuuridel on suurim kestvustugevus ThO_2 lisanditega volframtraadil, kuna ThO_2 tõstab tunduvalt volframi rekristallisatsioonitemperatuuri.



Joonis 2.15. Volfram- ja molübdeentraadi valmistamise skeem:

- 1 – oksiidipulber, 2 – vesinik, 3 – taandamisahi, 4 – metallipulber, 5 – press,
 6 – keevitusaparaat, 7 – rotatsioonsepistamismasin, 8 – paagutatud toorikud,
 9 – valtspink, 10 – lint, 11 – silm, 12 – traat

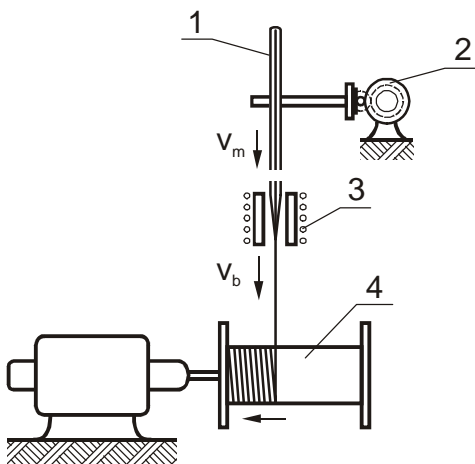
Perspektiivne armeeriv materjal on **berüllium** tänu oma väikesele tihedusele ($\rho=1850 \text{ kg/m}^3$), suurele tugevusele ($R_m=1120 \text{ N/mm}^2$) ja jäikusele ($E=320 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$), mis vastab eritugevusele (R_m/ρ) ja erijäikusele (E/ρ), vastavalt 60,5 ja 17300 km. Berülliumtoorikute ümbertöötamine traadiks on palju raskem kui volframtraadi puhul. Berülliumgraanulid, mis saadakse berülliumfloriidist, sulatatakse ja tehakse valandid, mis seejärel rafineerimiseks veel kord vaakumis ümber sulatatakse. Saadud valandid töödeldakse ümber laastuks, mis omakorda peenestatakse kuulveskis pulbriks. Pulber pressitakse, saadud pressised paagutatakse vaakumis ja seejärel valtsitakse, sepistatakse või tõmmatakse. Berülliumi suure tugevuse tõttu tõmmatakse teda kuumalt 400...480 °C juures või plastsest metallist kestas. Kõvasulamist tõmbesilmad kuumutatakse ette kuni 350...370 °C-ni. Ühekordselt tõmbega deformeeritakse 12...35%, tõmbamise kiirus on ligi 70 m/min. Peale tõmbamist traati kuumutatakse plastsuse suurendamiseks 785...815 °C juures.

Berülliumi puuduseks, mis takistab selle kasutamist KM-is, on väike plastsus ($A=1..2\%$) ja suur toksilisus.

Metallisulameist valmistatud pidevkiud

Otseselt sulameist saadavad kiud pole reeglina tugevad. Kuid paljude metallide, eeldatavalt kergsulavate puhul, on see meetod traadi tõmbamisest palju mugavam. Kõige sagedamini kasutatakse sulametalli surumist inertgaasi abil läbi keraamilise tõmbesilma. Meetod on kõrge tootlikkusega, võimaldab saada mitte eriti peeneid metallniite (mõni kümnendik millimeetrit), mis on sobivad kiudmaterjalide valmistamiseks, kus armatuuri tugevus ei ole määrav.

Peente ja ülipeente (alla 50 μm) pidevate metallniitude saamiseks kasutatakse tilgast tõmbamise meetodit (Taylori meetod), mis on toodud joonisel 2.16. Meetodi olemus seisneb metalli tõmbamises klaasümbrises. Metall (1), mis on joodetud klaasampulli, kuumutatakse induktoris (3) kuni sulamiseni. Klaas pehmeneb ja tekkinud kapillaari imendub metall, moodustades metallniidi klaasümbrises, mis keritakse kiirelt pöörlevale trumlile (4). Nii võib saada traadi läbimõõduga 1...3 μm ja pikkusega mitu kilomeetrit. Niidi omapära on äärmiselt sile pind ja sellepärast stabiilne tugevus (väike hajuvus). Taylori meetodil saadakse Sn, Ag, Au, Cu, Ni, Co, Fe, aga samuti messingist ja roostevaba terasest niite. Niitude tugevus on järgmine: N/mm^2 ; Sn – 150, Ag – 650, Cu – 400, Fe – 2800; mis on väiksem kui tõmmatud traadil. Klaasümbris eemaldatakse leeliselahuses söövitamisega.



Joonis 2.16. Klaasiga isoleeritud metallkiudude saamise seadme skeem:

- 1 – metallvarras klaaskestas, 2 – etteandmise mehhanism,
3 – kuumutusseade, 4 – pool

2.2.3. Keraamilised pidevkiud

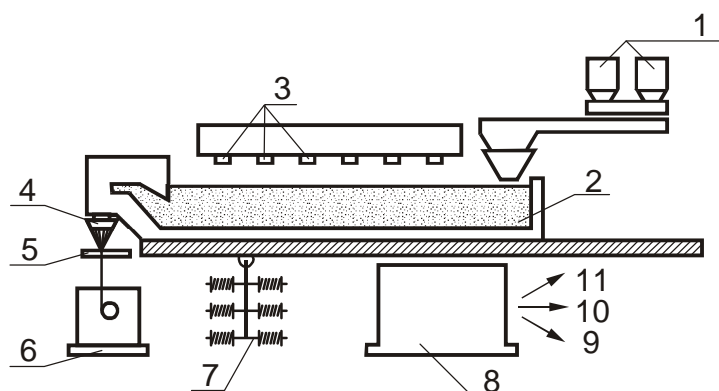
Plastkomposiitides kõige sagedamini kasutatav armatuur on mitmesuguse keemilise koostisega ja viisiga toodetud **klaaskiud**. On olemas 3 põhimõtteliselt erinevat klaaskiudude valmistamise meetodit:

- 1) kiudude tõmbamine klaasimassist läbi tõmbesilma;
- 2) kiudude tõmbamine kuumutatud klaastoorikust;
- 3) sulatatud klaasimassi pihustamine õhu-, gaasi- või aurujoaga või tsentrifugaaljõudude mõjul.

Kahe esimese meetodiga saadakse pidevkiud, aga kolmandaga – kiud pikkusega kuni 50 mm.

Kõige enam kasutatakse pidevkiudude saamiseks nende klaasimassist tõmbamist, mille skeem on toodud joonisel 2.17. Klaasimassist tõmmatakse suure kiirusega kiud, mis kiiresti jahtuvad. Kuna tõmbamisel hõõrduvad niidid üksteise vastu, siis määratakse neid määrdeainetega. See takistab niitel mikropragude teket, parandades nende tugevust. Määrde-

ainena kasutatakse enamasti tärklise emulsiooni või mineraalõlisid, mis aga halvendavad kiudude adhesiooni polümeermaatriksiga. Seepärast enne KM valmistamist määrdeained eemaldatakse.



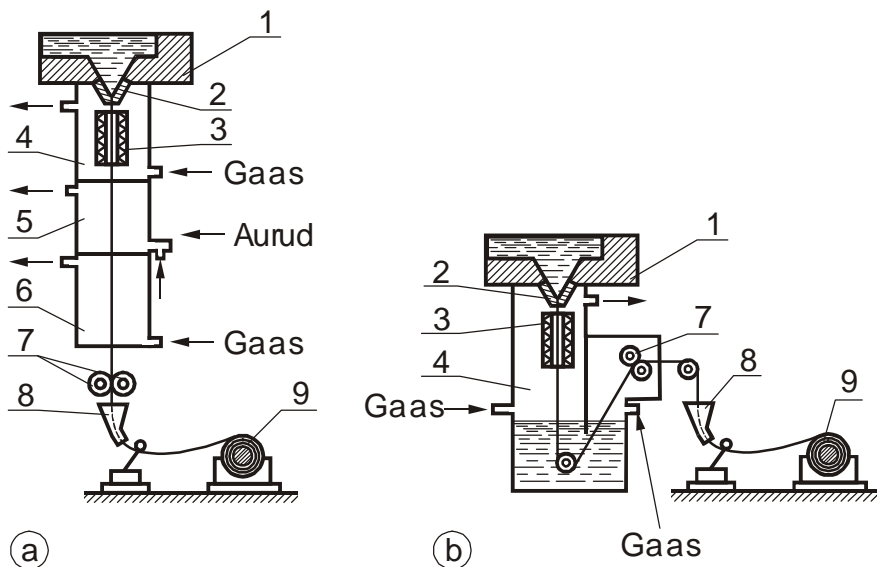
Joonis 2.17. Klaaskiudude saamise skeem:

- 1 – tooraine, 2 – gaasipõletid, 3 – sulaklaas, 4 – ketramine läbi filjeeri,
- 5 – lihtimine, 6 – pealekerimine, 7 – transportimine, 8 – kuivatamine,
- 9 – lõngad, 10 – heie, 11 – lühikiud

Klaaskiudude materjalina kasutatakse käesoleval ajal nn **E-klaasi**, millel on järgmine keemiline koostis, %: 54,4 SiO₂; 14,4 Al₂O₃; 17,5 CaO; 4,5 MgO; 8 B₂O₃; 0,5 (Na₂O+K₂O); 0,4 Fe₂O₃; 0,3 TiO₂. E-klaasi tihedus on 2540 kg/m³, pehmenemistemperatuur 846 °C, elastsusmoodul 7,35·10³ N/mm².

Märksa kõrgem pehmenemistemperatuur (ligi 2000 °C), võrreldes E-klaasiga, on **kvarts-klaasil**, mis kujutab endast praktiliselt puhast SiO₂. Kõrge sulamistemperatuuri tõttu tehakse temast niidid läbimõõduga 0,01...1,0 µm kvartsvarda sulatamisega gaasipõletis.

Klaaskiudude puuduseks on nende kulumine kiudude vihis, mistõttu neid on vaja määrada ja määre hiljem eemaldada. Tugevuse tõstmiseks ja kiudude adhesiooni parandamiseks maatriksiga kaetakse kiud metallpindega, nagu tsink, nikkel, vask ja raud. Mõnikord kasutatakse pindena kroomoksiidi (CrO₃), mis kantakse peale vesilahusest toatemperatuuril. Kroomoksiid muutub kuumutamisel rasksulavaks Cr₂O₃-ks. Klaaskiudude pindamine laiendab tunduvalt nende kasutamist. Kõige sagedamini kasutatakse metalliseerimisskeemi, mis on toodud joonisel 2.18a. Klaaskiude keeratakse pööriseas (2), mis asub klaasvanni (1) väljundil, seejärel lastakse need läbi kuumuti (3) gaasikambrisse (4) ning suunatakse metalliseerimiskambrisse (5) ja taandamiskambrisse (6). Pingutusrullide (7) abil suunatakse kiudude viht läbi juhikute (8) ja keritakse vastuvõtutrumlile (9). Samamoodi toimub metalliseerimine vannis, mis on täidetud sulametalliga, joonis 2.18b.

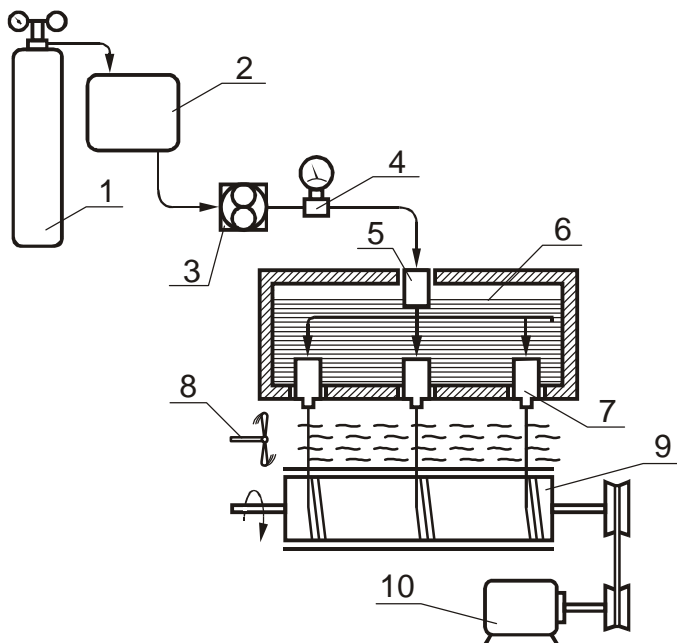


Joonis 2.18. Klaaskiudude aurufaasist (a) ja sulameist (b) metalliseerimisseadme skeem:
 1 – ahi, 2 – ketruspea, 3 – küttekeha, 4 – gaasikamber, 5 – kambri metallaurudega,
 6 – taandamiskamber, 7 – pingutusrullid, 8 – juhikud, 9 – vastuvõtutrummel

Kuumustugevad polükristalsed kiud on poorideta paagutatud keraamikast mitteorienteeritud kristallidega, mille pikkus on tunduvalt väiksem kui kiu läbimõõt. Keraamiliste kiudude omadused on samad, mis massiivsel keraamikal, nad valmistatakse kõige raskesulavamate, tugevamate, keemiliselt inertsetest ja kulumiskindlatest materjalidest: alumiiniumoksiidist, tsirkooniumdioksiidist, boornitriidist ja muudest keerukatest ühenditest. Polükristalsete kiudude tugevus on suurem, kui massiivsel keraamikal, kuid väiksem kui sama koostisega monokristallkiududel. Polükristalsete kiudude valmistamise protsess koosneb kolmest etapist:

- 1) metallorgaanilise ühendi suspensiooni või kolloidlahuse valmistamine;
- 2) kiudude vormimine vedeliku surumisega läbi filjeeri või õhukese kile saamisega vedeliku valamisel tasapinnale;
- 3) kuiva kooriku paagutus.

Näitena võib tuua **Al₂O₃ polükristalsete kiudude** saamise tehnoloogilise skeemi, mis on toodud joonisel 2.19. Lähtematerjaliks on 50%-ne alumiiniumatsetaadi Al(OH)·(CHO₂)·(C₂H₃O₂) vesilahus. Lahust kuumutatakse 50...80 °C juures ja pärast hoidmist vaakumeeritakse, mille tulemusena eraldub õhk, vesi ja suureneb lahuse viskoossus 2000...25000 puaasi (1P = 1 g/cm·s). Seejärel valatakse lahus reservuaari (2), kust ta lämmastiku rõhu toimel suunatakse hammasrataspumbale (3) ja edasi läbi filtri (5) püsiva temperatuuriga anumasse (6). Lahus surutakse läbi plaatinast anumate põhjas olevate avade, mis kujutavad endast filjeeri (7) avaga 0,127 mm (0,05"). Saadud kiud kuivatatakse kalorifeeriga (8) ja keritakse trumlile (9). Kerimisel tõmmatakse kiud täiendavalt läbimõõduni 10...20 μm. Seejärel kiud kuivatatakse ja paagutatakse, kuumutades neid aeglaselt kuni 1500 °C-ni, orgaanilised lisandid põlevad ära juba 500 °C juures. 1000 °C juures moodustub γ-Al₂O₃, mis kõrgemal temperatuuril muutub α-Al₂O₃-ks (korund). Kiudude tugevus on 2100 N/mm², tihedus 3150 kg/m³ ja elastsusmoodul 175·10³ N/mm². Keraamiliste kiudude omadused on toodud tabelis 2.6.



Joonis 2.19. Anorgaaniliste kiudude (Al_2O_3) ekstrudeerimisseadme skeem:
 1 – balloon, 2 – reservuaar, 3 – pump, 4 – manomeeter, 5 – filter, 6 – isotermiline puhastuskamber, 7 – filjeerid, 8 – kalorifeer, 9 – trummel, 10 – elektrimootor.

Tabel 2.6

Polükristalsete keraamiliste ja klaaskiudude omadused

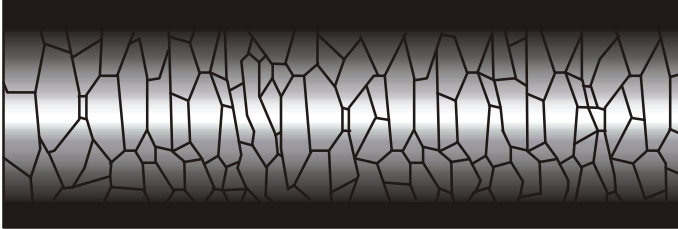
Materjal	Tihedus, kg/m^3	Tõmbetugevus R_m , N/mm^2	Elastsusmoodul E, $\text{N/mm}^2 \cdot 10^3$	Eritugevus, km	Erielasticusmoodul, km
ZrO ₂	4850	2100	350	43	72000
BN	1900	1400	90	73	47000
B ₄ C	2400	2310	490	96	200000
E-klaas	2500	3500...5000	100...200	145	40000
SiC	4000	2500	480	63	12000

2.2.4. Boor-, ränikarbiid- ja süsinikkiud

Metall- ja plastmaatriksiga KM armeerimiseks kasutatakse **boorkiude**. Nad on suure tugevuse ja kõvadusega, ei lagune kõrgetel temperatuuridel. Boorkiude saadakse fluoriidide ja bromiidide lagundamisega vesiniku keskkonnas: $2\text{BCl}_3 + 3\text{H}_2 = 2\text{B} + 6\text{HCl}$ koos järgneva gaasifaasist sadestamisega kuumutatud volframtraadile läbimõõduga 100...120 μm . Boori ja volframi koosmõju tulemusena koosneb kiu südamik mitmesuguse koostisega volframboriididest (WB, W₂B₅, WB₅). Pärast pikaajalist kuumutamist koosnevad boorkiud enamuses WB₄. Boorkiud läbimõõduga 70...200 μm on rombiline kristallstruktuuriga.

Südamiku tugevus on märksa väiksem kui kiul tervikuna. Erineva kahanemise tõttu jahtumisel tekkivad südamikus survepinged, aga ümbritsevas boorikihis – tõmbepinged. See põhjustab sisepepingeid kius ja radiaalsete pragude tekkimist (joonis 2.20). Väikese tiheduse juures (2600 kg/m^3) on boorkiududel suur tugevus, eriti survele (3500 N/mm^2) ja jäikus (elastsusmoodul $420 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$). Suurte terade olemasolu pinnal, aga ka lisandite,

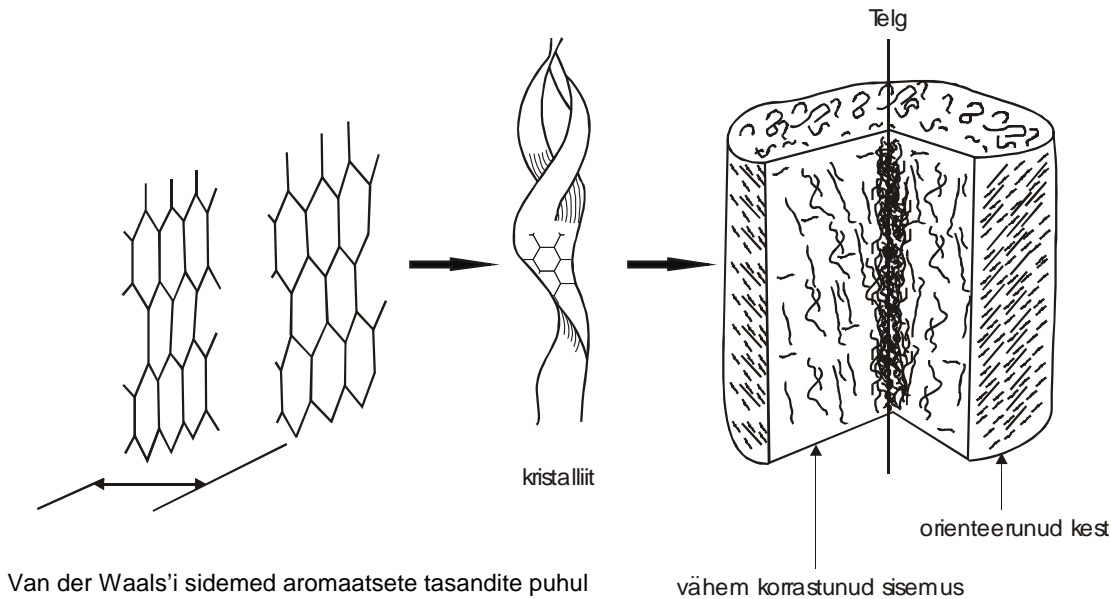
mikropragude ja pooride olemasolu vähendavad kiudude tugevust. Üle 400 °C boorkiud oksüdeeruvad ja 500 °C juures astuvad reaktsiooni alumiiniummaatriksiga. Kuumuspüsivuse suurendamiseks ja maatriksiga reaktsiooni takistamiseks kaetakse boorkiud ränikarbiid-, boorkarbiid- või boornitriidpindega. Ränikarbiidpindega kaetud boorkiude nimetatakse **borsikuks**.



Joonis 2.20. Boorkiu pinna struktuur

Suure kuumustugevuse ja kuumuspüsivusega on **ränikarbiidkiud**. Nende tihedus on 3900...4050 kg/m³, tõmbetugevus 1700...2500 N/mm² ja elastsusmoodul 450...480·10³ N/mm². Ränikarbiidkiudude valmistamise põhimõtteline skeem on sarnane boorkiudude valmistamise omale, kuigi SiC-kiudude saamine on keerulisem auru-gaasi segu doseerimise ja transpordi osas. Auru-gaasi faas koosneb metüülkloorsilaanist (CH₃SiCl₃), argoonist ja vesinikust. Sadestumine toimub järgmise reaktsiooni järgi: CH₃SiCl₃ → SiC +HCl volframniidile, mis on kuumutatud 1100...1200 °C-ni. Kiudude läbimõõt on 100 µm ja tugevus ligi 2800 N/mm².

Kõige perspektiivsemad kiud nii madalatemperatuurse polümeermaatriksiga kui ka kõrgetemperatuurse keraamilise maatriksiga KM armeerimiseks on tänapäeval **süsinikkiud** (joonis 2.21). Grafiidi suur tugevus ja jäikus põhitasandil on tingitud kovalentsidemest aatomite vahel (joonis 2.1b), mis on väga tugev side naaberaatomite vahel ja millel on ühised elektronid. Vastupidi, põhitasanditevahelised aatomid on seotud nõrkade van der Waalsi jõududega. Seega, kui orienteerida grafiitkiud piki põhitasandeid, siis saavutame suure tugevuse ja jäikuse. Defektideta süsinikkiudude teoreetiline tugevus on 100·10³ N/mm² ja elastsusmoodul 1060·10³ N/mm². Tänapäeval saadakse paremates tööstusettevõtetes 70% teoreetilisest elastsusmoodulist ja ainult 5...7% tugevusest. Mehaaniliste omaduste järgi jaotatakse süsinikkiud kõrge tugevusega (*High Toughness, HT*) ja kõrge elastsusmooduliga (*High Modulus, HM*) kiududeks, aga lähtematerjali järgi polüakrüülnitriil- (PAN) ja pigikiududeks. Tööstuslikult toodetavad süsinikkiud jagatakse kvaliteedi poolest kolme kategooriasse:

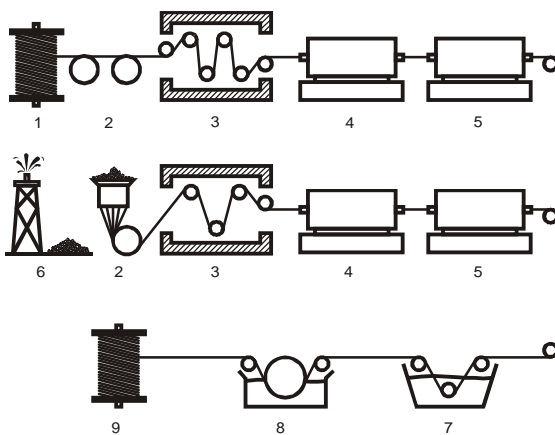


Joonis 2.21. Süsinikuaatomite paigutus grafiitkiududes

- 1) üldkasutatavad süsinikkiud (*general purpose carbon fibers, GPCF*);
- 2) kõrgpüsivad süsinikkiud (*high performance carbon fibers, HPCF*);
- 3) aktiveeritud süsinikkiud (*activated carbon fibers, ACF*).

Üldkasutatavaid süsinikkiude (GPCF) iseloomustab amorfne ja isotroopne struktuur, madal tõmbetugevus ja madal hind. Kõrgpüsivad süsinikkiud (HPCF) on suure tugevusega ja elastsusega, mis on anisotroopsed. Aktiveeritud süsinikkiude (ACF) iseloomustab suure hulga avatud mikropooride olemasolu pinnases, mis tunduvalt parandab nende märgumist maatriksmaterjaliga.

Süsinikkiude tootmise lihtsustatud skeem on toodud joonisel 2.22.

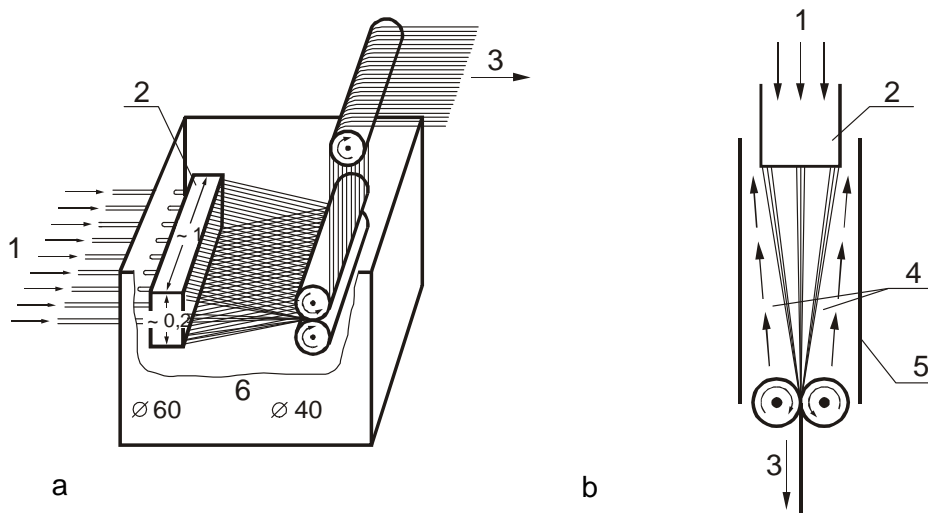


Joonis 2.22. Süsinikkiudude tootmise protsessi skeem:

- 1 – PAN-kiud, 2 – tõmbamine, 3 – termostabilisatsioon, 4 – karboneerimine,
- 5 – grafitiseerimine, 6 – naftapiigi, 7 – sulamist ketramine, 8 – pinnatöötlemine,
- 9 – epoksüapretiga lihtimine (katmine), 10 – pool

Kui lähtematerjalina kasutatakse PAN-kiude, siis tõmmatakse neid eelnevalt selleks, et orienteerida polümeerseid ahelaid piki kiu telge. Seejärel stabiliseeritakse nad õhus kuumu-

tamisega 200...300 °C juures, mille tulemusena termoplastsest polümeerist PAN-kiud muutub sulamatuks, ja seejärel neid karboneeritakse 1400 °C juures lämmastiku keskkonnas. Pigikiudude eelis on võimalus saada neid sulamist (nn märgmeetod), mida ei saa teha PAN-kiude kasutades. Selle tulemuseks on “märgmeetodi” suurem tootlikkus, võrreldes “kuivmeetodiga”, kui kasutatakse PAN-polümeerilahust orgaanilistes lahustites. Tänapäevane tehnoloogia märgmeetodil kiudude saamiseks võimaldab kasutada plaadikujulisi filjeere kuni 320 000 auguga. Selle abil saab keerata koaguleerimismisvannis polümeerköie, mis koosneb suurest arvust elementaarkiududest (joonis 2.23a).



Joonis 2.23. Polümeerkuidude saamise variandid: “märgmeetod” (a), “kuivmeetod” (b):
 1 – polümeerilahus, 2 – filjeerid, 3 – kuumtõmbamine, 4 – sadestusvann, 5 – kuum õhk, 6 – kiuumoodustumise kamber

“Kuivmeetodi” puhul võib kasutada filjeerplaate, mis sisaldavad kuni 2000 ava, mistõttu tõuseb kiudude omahind (joonis 2.23b). Lisaks peab märkima et pigikiud on ainult kõrge elastsusmooduliga, mis saadakse kuumutamise temperatuurivahemikus 1400...1800 °C. Suure tugevusega PAN-kiud saadakse madalatemperatuurse (alla 1400 °C) termotötlusega, aga suure elastsusmooduliga kiud – grafitiseerimisega temperatuuridel 1800...2700 °C.

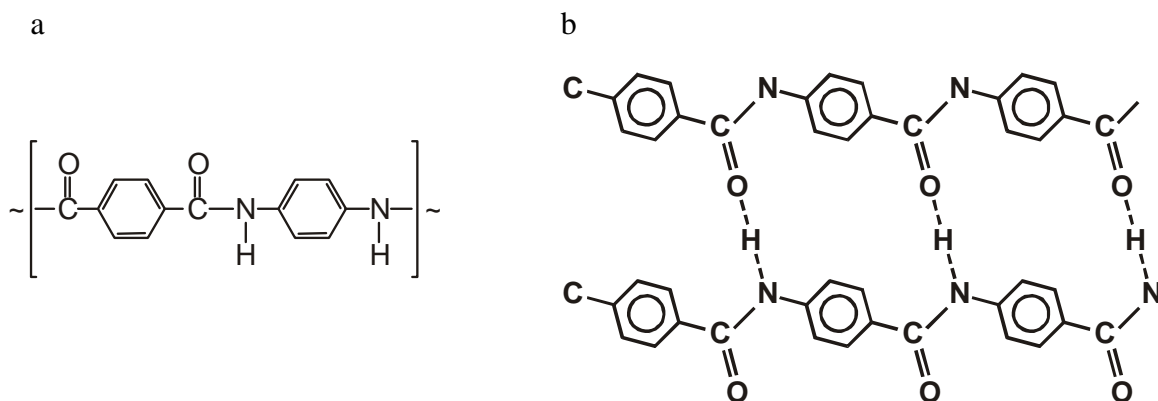
Süsinikkiudude struktuur koosneb heksagonaalvõrega lindikihtidest, mida nimetatakse *mikrofibrillideks* (joonis 2.21). Samasuunaliselt orienteeritud kitsaste pooridega eraldatud mikrofibrillid moodustavad *fibrillid*. Fibrillide ristlõike mõõtmed kõiguvad mõnest kümnendikust kuni sadade mikromeetriteni, kusjuures iga süsinikkiud koosneb kuni tuhandest fibrillist. Süsinikkiudude puudus on nende kalduvus oksüdeerumisele õhus, keemiline aktiivsus metallmaatriksi suhtes ja väike adhesioon polümeermaatriksiga. Selleks et kaitsta süsinikkiude oksüdeerimise eest ja reageerimast metallmaatriksiga, kantakse nende pinnale metall- või keraamilised pinnad (rasksulavad metallid, karbiidid, nitriidid, boriidid jt). Adhesiooni tugevdamiseks polümeersideainega kiudude pind eelnevalt söövitatakse.

2.2.5. Orgaanilised kiud

Suur saavutus polümeermaterjalide vallas on uue klassi **suure tugevusega orgaaniliste aramiidkiudude** saamine. Sarnaselt grafiidile on paljudel orgaanilistel ainetel struktuur, kus aatomid on seotud jäikades aromaatesetel rõngasahelates. Kui need ahelad orienteerida piki polümeerkuidu, siis saavad kiud suure tugevuse ja jäikuse; just see printsiip realiseeritakse aramiidkiudude korral. USA Kaubanduspalati määrangu järgi nimetakse aramiidkiude “keemilisteks kiududeks, mida saadakse kiudu moodustavatest polüamiididest, kus enam kui

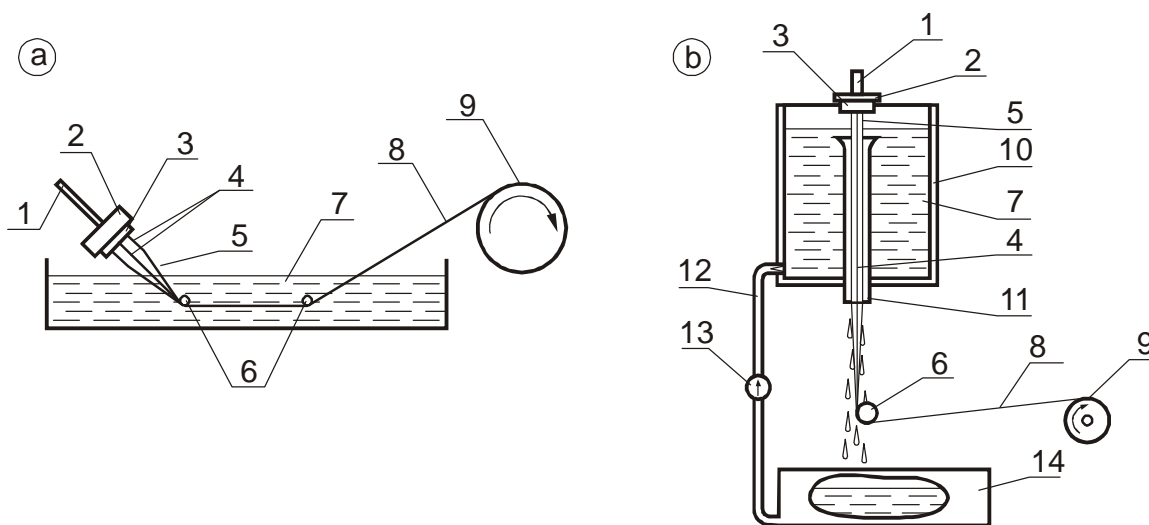
80% amiidgrupist on vahetult seotud kahe aromaatses rõngasahelaga”. Nende kiudude valmistamist alustas 1971. a firmas Du Pont (USA) kaubandusliku nimetuse Kevlar all.

Kevlarkiud kujutavad endast polü-n-fenüülentereftalamiidi, mille keemiline valem ja molekuli vaheliste sidemete skeem on toodud joonisel 2.24. Lähtepolümeer saadakse kloororgaaniliste dikarboonhapete segunemisel külma (5...10 °C) diammiiniga, saadud polümeeri graanulid pestakse vees ja kuivatatakse. Selles olekus ei ole molekulid graanulites orienteeritud (joonis 2.24a), mistõttu lahustuvad nad kergesti mitmetes lahustites, nt anorgaanilistes hapetes. Kiulise polümeeri valmistamise skeem on toodud joonisel 2.25.



Joonis 2.24. Kevlarpolümeeri struktuur

a – mitteorienteerituna graanulites, b – orienteerituna kiududes



Joonis 2.25. Kevlarkiu saamise skeemid: horisontaalne (a), vertikaalne (b):

1 – tigu, 2 – ketramine, 3 – filjeer, 4 – kiud, 5 – gaasivahe, 6 – niidijuhe, 7 – sadestusvann külma (0...4 °C) veega, 8 – niidi väljatõmbamine, 9 – pool, 10 – paak, 11 – ketramistoru, 12 – tagasivoolu toru, 13 – pump, 14 – sadestusvanni äravoolu paak.

Selle peamine osa on lahuse ekstrudeerimine temperatuuril 50...100 °C ja saadud niitide kiirjahutus jääkülmas vees (0...4 °C). Ekstrudeerimise ja tõmbamise tulemusena niitide molekulaarstruktuur saab orientatsiooni, mille tulemusena suureneb nende tugevus ja nad enam ei lahustu nagu lähtepolümeer (joonis 2.24b).

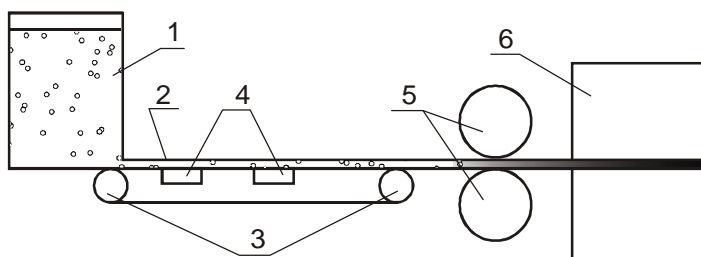
Aromaatsed rõngasahelad, mis annavad polüamiidi makromolekulile suure jäikuse, soodustavad makromolekulide eelorientatsiooni piki kiudu, mille tulemusena tekivad struktuurid, mis meenutavad pikki seotud köite süsteeme. Asjaolu, et polümeersed ahelad on tänu oma jäikusele sirged, määrab tiheda makromolekulide pakke mahuühikus, mis omakorda vähendab defektide arvu ja määrab kevlari suure tugevuse. Sellise struktuuriga kiududel on suur keemiline ja termiline püsivus. Erinevalt paljudest teistest orgaanilistest ainetest on kevlar püsiv tugevates orgaanilistes ja anorgaanilistes hapetes, nagu äädikhape, sipelgahape, väävel-, lämmastik- ja soolhape, aga samuti tugevates orgaanilistes lahustites, nagu bensool, tetrakloorsüsinik, atsetoon, triklooretüleen, petrooleum, bensiin jpt. Kuumutamisel kevlar ei pehmine ja ei muuda struktuuri kuni lagunemistemperatuurini – 500 °C. Kevlarniitide kudumine toimub kontsentreeritud väävelhappes, mis on ebatavaline polümeerkiududele. Kiudude omadusi saab reguleerida, kui muuta lahuse koostist, niitide moodustumise tingimusi või järgnevat termotöötlusrežiimi.

Firma *Du Pont* toodab kahte tüüpi kevlarkiude: Kevlar-29-st valmistatakse erineva tihedusega ja struktuuriga tehnilisi kiude ja Kevlar-49-st valmistatakse köit, paela ja riiet.

Kevlari tihedus on 1450 kg/m³, tõmbetugevus (Kevlar-29, Kevlar-49) – 2700...3800 N/mm², elastsusmoodul (100...150)·10³ N/mm², elastne deformatsioon 3...4,5%. Tugevatel ja jäikadel aramiidkiududel on unikaalsed omadused. Tänu väikesele tihedusele ja suurele tugevusele ületab ta eritugevuselt kõik teised armatuurina kasutatavad kiud ja metallisulamid, jäädes erielastsusmoodulilt alla ainult süsinik- ja boorkiududele. Samas on nad viimastest palju tehnoloogilisemad, kuna neid saab töödelda tavalistel tekstiilitööstuse seadmetel.

2.3. Armeerivate elementide saamine

Armeerivaid elemente – niitkristalle, metalltraate, amorfseid ja polükristalseid kiude, orgaanilisi kiude viiakse maatriksisse mitteorienteeritult või orienteeritult (andes neile teatud suuna). Esimesel juhul on KM isotroopsete omadustega, teisel juhul võivad omadused olla isotroopsed või anisotroopsed, sõltuvalt eelnevast armatuuri ettevalmistusest. Lühikestest kiududest ja traaditükkidest valmistatakse vilti, paberit või matte; kõige lihtsam on valmistada vilti vedelfaasimeetodil. Selleks immutatakse õhukene leht poorsusega 80...95% suspensiooniga (joonis 2.26). Toitepaagist (1) antakse kiududega suspensioon võrgule (2), mis on kaetud filterpaberiga. Võrk liigub pingustrumlite abil (3), vaakumfiltrid (4) imevad liigse vedeliku välja ja edasine moodustuva vildi tihendamine toimub surverullide (5) abil. Vajaduse korral paagutatakse vilt täiendavalt ahjus (6).

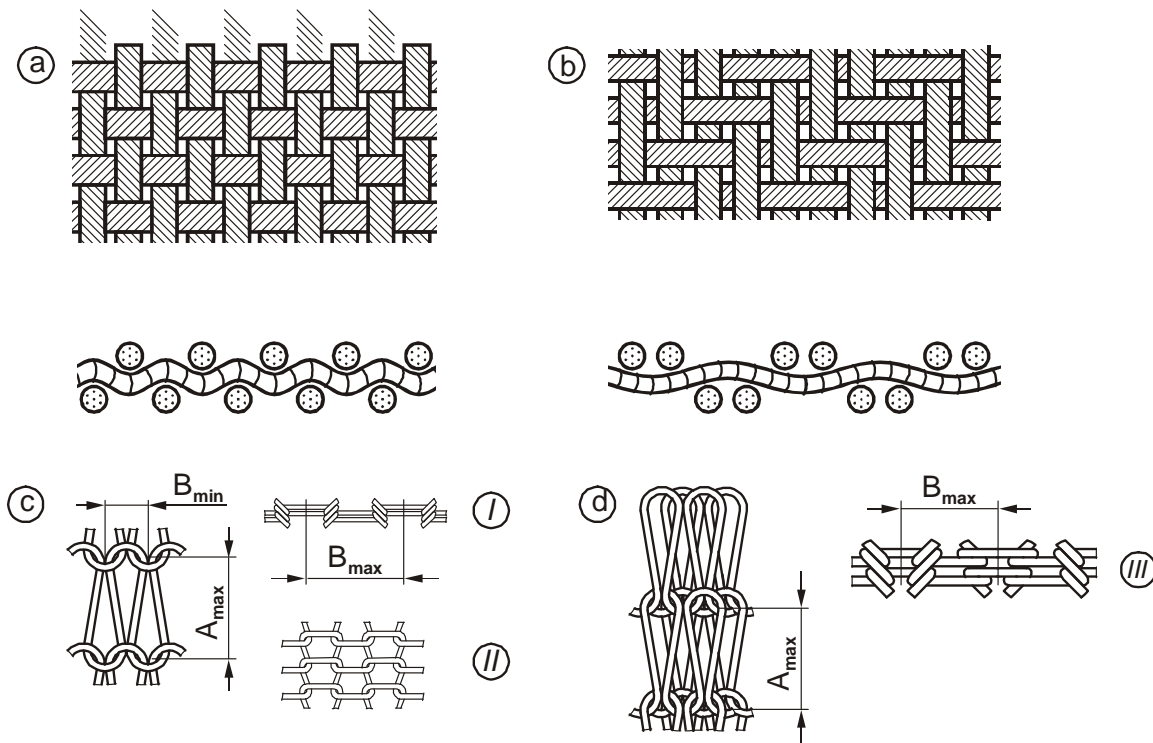


Joonis 2.26. Metallkiust vildi valmistamise skeem:

- 1 – toitepaak, 2 – võrk, 3 – rullid, 4 – vedeliku väljapumpamise kamber,
5 – surverullid, 6 – ahj

Vildi kiudude orienteerimine toimub tekstiilitöötlemisega, mis seisneb lühikeste peente polükristalsete kiudude kudumises niidiks, mida saab vahetult kasutada KM armeerimiseks või järgneva kudumiseks kangaks või võrguks. Kõige levinumad on joonisel 2.27a,b toodud kangad. Kangaid saab valmistada ainult suhteliselt plastsetest kiududest. Nii on terasvõrku

võimalik valmistada ainult plastsest vähese süsinikusisaldusega traadist, mis on aga väikese tugevusega. Teine puudus on suur kontaktpinge tihendamisel traatvõrgu piki- ja ristikiude vahel, mistõttu nad võivad kergesti puruneda või deformeeruda. Neist puudustest on vabad trikootažkangad (joonis 2.27c,d). Neil võrkudel on suur omaduste anisotroopsus (võrgul joonisel 2.27c on omaduste anisotroopia tegur 1,6; võrgul joonisel 2.27d – 2,2), mis võimaldab muuta KM omadusi laias diapasoonis.



Joonis 2.27. Labane (a) ja toimne (b) niidistus kangastes ning trikootažsiidistus (c, d) võrkudes

Võrku võib teha jäigast suure tugevusega metalltraadist läbimõõduga 0,02...0,2 mm, mille mahustruktuur võimaldab vähendada kontaktpingeid KM vormimisel, eriti pulbermaatriksite korral. Habrastest niidest orienteeritud armatuuri valmistamiseks (nt boor- või ränikarbiid) on võimalik suure elastsusmooduliga armatuuri siduda plastse traadiga ristsuunas. Sellised kombineeritud võrgud on tehnoloogilised ja kergendavad toorikute koostamist KM valmistamisel.

3. KOMPOSIITMATERJALIDE OMADUSTE PROGNOOSIMINE

Vaatamata komposiitmaterjalide eri liikidele ja nende valmistamise tehnoloogilistele erinevustele, on võimalik leida üldalused nende materjalide loomiseks. Põhiküsimus on komposiitmaterjali omaduste väljaarvutamine, kui on teada komponentide arv, kogus ja omadused. Ülesande lahendamiseks kasutatakse matemaatilisi mudeleid. Kui hästi üks või teine teoreetiline mudel vastab konkreetse materjali omadustele, saab kindlaks teha ainult katseliselt, sest kõik mudelid idealiseerivad koormatud reaalse objekti käitumist.

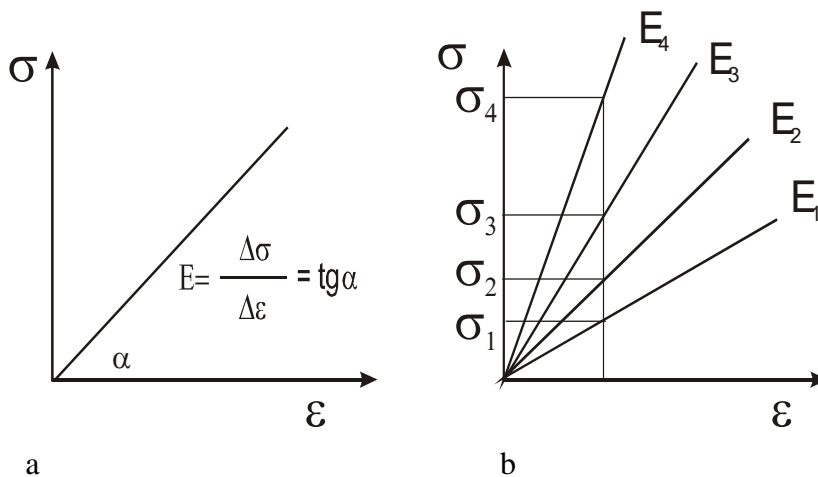
3.1. Komposiitmaterjalide jäikus

Isotroopses materjalis on pinge ja elastne deformatsioon seotud Hooke'i valemiga

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (3.1)$$

kus E on normaalelastsusmoodul e Youngi moodul.

Elastsusmoodul iseloomustab materjali jäikust, s.o selle deformeeritavust pinge mõjul. Koordinaadistikus σ - ε (joonis 3.1a) iseloomustab Youngi moodulit sirge $\sigma = f(\varepsilon)$ kaldenurga tangens, mis sõltub ainult materjali aatomitevaheliste sidemete tugevusest, mitte aga materjali olekust (karastatud, kalestatud, lõõmutatud jne). Mida jäigem on materjal, seda suuremad pinged tekkivad temas deformatsiooni mõjul (joonis 3.1b).



Joonis 3.1. Normaalelastsusmoodul (a) ja pinge ning elastsusmooduli vaheline seos jääval deformatsioonil (b)

Isotroopsetes materjalides, sh ka polükristalsetes metallides, on Youngi moodul ka isotroopne ja tema suurus ei sõltu koormuse suunast. Hoopis teine olukord on komposiitides. Üldjuhul on komposiitmaterjalid anisotroopsed ja nende jäikus sõltub oluliselt koormuse suunast. Seda demonstreerib joonis 2.4. Armeerimise viisiga saab kergesti reguleerida omaduste isotroopsust vajalikus suunas, just selles seisneb komposiitmaterjalide eelis tavaliste metallisulamite ees.

Pikikiudu on komposiitmaterjalil suur jäikus (joonis 2.4a,b), ristikiudu või armeerimisel disperssete osakestega (joonis 2.4c) sõltub jäikus maatriksist ja on madal. Armeerimisel ristikiudu on jäikus kõrge pikikiudu ja madal 45° nurga all olevate kiudude suhtes (joonis 2.4d).

Komposiitmaterjalide elastsusmooduli arvutamiseks kasutatakse valemeid (3.2) ja (3.3):

– pikisuunalise armatuuri korral

$$E_{KM_{\parallel}} = V_A \cdot E_A + (1 - V_A) \cdot E_M \quad (3.2)$$

– ristisuunalise armatuuri korral

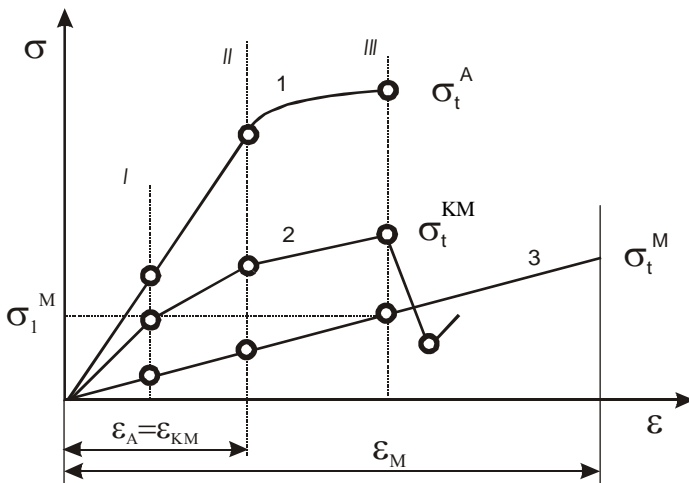
$$E_{KM_{\perp}} = \left(\frac{V_A}{E_A} + \frac{1-V_A}{E_M} \right)^{-1} = \left(\frac{E_M \cdot V_A + E_A \cdot V_M}{E_A \cdot E_M} \right) \quad (3.3)$$

kus V_A, V_M – armatuuri ja maatriksi maht,
 E_A, E_M – armatuuri ja maatriksi elastsusmoodul.

3.2. Komposiitmaterjalide tõmbetugevus

Kuna maatriksi ja armatuuri omadused erinevad oluliselt, siis pole ka nende koormuskõverad komposiitmaterjalis sarnased. Komposiitmaterjali ja selle faaside deformeermisel võib eristada kolme piirkonda (joonis 3.2):

- I – maatriks ja armatuur deformeeruvad elastselt,
- II – maatriks deformeerub plastselt, armatuur elastselt,
- III – mõlemad, nii maatriks kui ka armatuur, deformeeruvad plastselt.



Joonis 3.2. Komposiitmaterjali (2), selle armatuuri (1) ja maatriksi (3) koormuskõverad

Kui armatuuri ja maatriksi sideme tugevus on küllaldane, siis on nende suhtelised deformatsioonid võrdsed $\varepsilon_A = \varepsilon_M = \varepsilon_{KM}$, ja komposiitmaterjal deformeerub kuni armatuuri purunemiseni. Sellisel juhul on komposiitmaterjalile langev koormus võrdne armatuuri ja maatriksi koormuse summaga:

$$\sigma_{KM} = \sigma_t^A \cdot V_A + \sigma_1^M \cdot (1 - V_A) = \sigma_t^A \cdot V_A + \sigma_1^M \cdot V_M = V_A (\sigma_t^A - \sigma_1^M) + \sigma_1^M, \quad (3.4)$$

kus σ_t^A – armatuuri tõmbetugevus,
 V_A ja V_M – armatuuri ja maatriksi maht,
 σ_1^M – pingeline maatriksis armatuuri purunemise momendil (joonis 3.2, kõver 2).

Valemit (3.4) nimetatakse *segureegliks (rule of mixture)*, mis vastab komposiidi nn *staatilisest purunemise mudelile*. Arvutus segureegli abil annab komposiitmaterjalile tegelikult suurema tugevuse, mille põhjused on järgmised:

- a) armatuuri kiud purunevad ebaühtlaselt,
- b) maatriks sisaldab defekte,
- c) maatriksi ja armatuuri vahelise sideme tugevus pole piisav.

Tugevus, mis arvutatakse segureeglit kasutades, vastab paremini tegelikule, kui komposiitmaterjalid on valmistatud plastsete kiudude ja plastse maatriksi baasil. Sellisel juhul purunevad

armeerivad kiud üheaegselt ja hetkel, kui pinged nendes ületavad tugevuspiiri. Tegelikult sisaldab komposiitmaterjal hapraid kiude, mille omadused ei ole ühtlased, ja väheplastne maatriks ei suuda pingeid terveks jäänud kiudude vahel ümber jaotada. Sellisel juhul põhjustab segureegli kasutamine komposiitmaterjali tugevuse arvutamiseks suuri vigu (nt boorplastid, süsinikplastid, klaasplastid, keraamilised komposiitmaterjalid). Niisuguste komposiitide tugevuse arvutamisel tuleb kasutada *statistilise purunemise mudelit*.

Statistilised meetodid lähtuvad sellest, et habrast maatriksit ja kiudu sisaldavas komposiitmaterjalis ei vii ühe kiu purunemine teiste kiudude purunemiseni, sest kiudude defektid jagunevad kiu pikkusele ebakorrapäraselt. Esimese kiu purunemise järel puruneb järgmine mingis teises kohas. Selline purunemine toimub teatud piirini, enne kui komposiitmaterjal puruneb tervikuna. Seega kujutab komposiitmaterjali tugevuse statistiline mudel armatuuri ketina, mis on valmistatud järjestikku ühendatud lühikestest lülidest; sellise keti ühe lüli purunemine ei too kaasa teiste lülide üheaegset purunemist. Iga lüli pikkust võib arvestada nagu ebaefektiivset pikkust l^* , kuna purunenud kiudude otsad ei tugevda komposiiti, vaid on pingekontsentraatorid, mis määravad kogu keti tugevuse. Komposiitmaterjali tugevust statistilise mudeli järgi arvutatakse valemiga

$$\sigma_{KM} = \frac{\sigma_o \cdot V_A}{\sqrt[m]{\frac{m \cdot e \cdot l^*}{d_A}}} \quad (3.5)$$

kus V_A – armatuuri maht,

σ_o – materjali teoreetiline tugevus segureegli järgi,

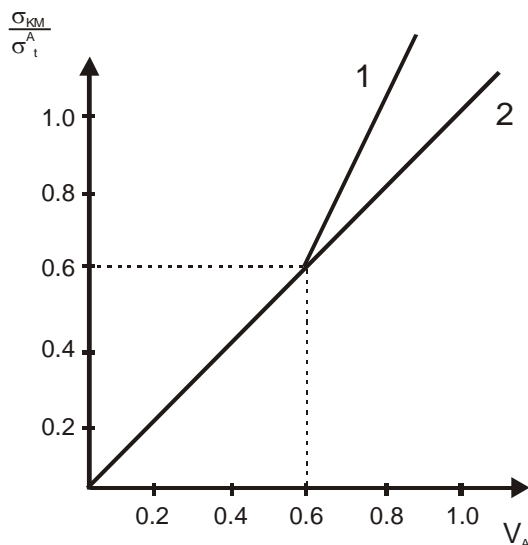
m – tegur, mis arvestab üksikute kiudude tugevuse σ erinevust kimbu tugevusest σ_{kimp} ($m = f(\sigma_{kimp} / \sigma)$, plastsetel kiududel $m \approx 15 \dots 20$, hapratel $m = 2 \dots 5$),

l^* – kiu ebaefektiivne pikkus (vt p 3.5)

d_A – kiu läbimõõt,

e – naturaallogaritm alus ($e=2,7$).

Joonis 3.3 näitab mõlema purunemismudeli järgi arvatud suhtelist tugevust. Kuni armatuurisalduseni $V_A < 0,5$ annavad mõlemad mudelid komposiitmaterjalile võrdse tugevuse. Kui armatuuri on rohkem kui 60%, siis annab statistiline mudel komposiitmaterjalile suurema tugevuse kui segureegel.



Joonis 3.3. Komposiitmaterjali suhtelise tugevuse sõltuvus armatuuri kogusest;

1 – statistilise purunemise mudeli järgi, 2 – staatilise (segureegli) mudeli järgi

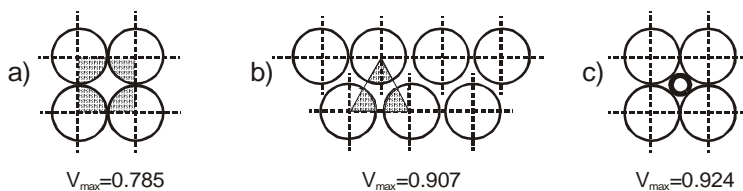
Armatuurisisaldust üle 50% kasutatakse eelkõige plastkomposiitides. Seepärast on andmed klaasplasti tugevuse kohta paremas kooskõlas statistilise mudeliga. Komposiitmaterjalid metallide või keraamika baasil sisaldavad tavaliselt vähem armatuuri ($V_A < 0,5$), mistõttu komposiitide reaalne tugevus on väiksem kui mõlema mudeli järgi arvatult. Nähtavasti on see seotud puudustega komposiitmaterjalide valmistamise tehnoloogias.

3.3. Armatuuri ja maatriksi optimeerimine

Eeltoodust järeldub: mida suurem on armatuuri osa V_A , seda suurem on ka komposiitmaterjali tugevus σ_{KM} . Valemite kasutamisel on aga piiranguid, mis tulenevad võimalikust armatuuri maksimaalsest ja minimaalsest sisaldusest.

Nagu nähtub joonisest 3.4, sõltub armatuurisisalduse ülemine piir kiudude asetusest maatriksis.

Armatuuri tegelik maht on alati tunduvalt väiksem teoreetilisest ja tavaliselt ei ületa 0,7...0,75. See on seotud maatriksi materjali voolamisega väikestes kiuvahelistes pooridesse, mis omakorda sõltub armatuuri määrgumisest maatriksiga.



Joonis 3.4. Kiudude pakkeskeemid ühesuunalisel armeerimisel; a – tetragonaalne, b – heksagonaalne, c – segu

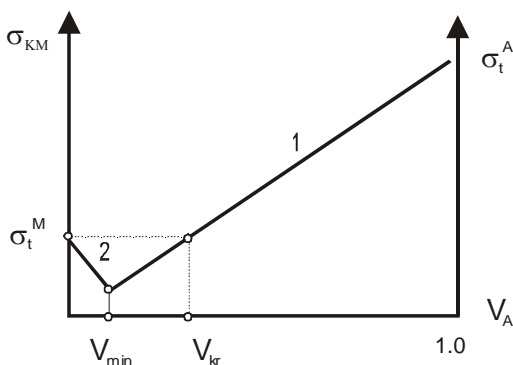
Armatuurisisalduse alumine piir tuleneb sellest, et koormamisel, kui armatuuri kogus on väike, katkeb eelkõige armatuur. Seda võib vaadelda armatuuri defektina (pooridena), ja komposiidi tugevus sõltub ainult maatriksi tugevusest.

$$\sigma_{KM}^{\min} = \sigma_t^M (1 - V_A) = \sigma_t^M \cdot V_M \quad (3.6)$$

kus σ_t^M – maatriksi tugevuspiir,

V_M – maatriksi maht.

Valemite (3.4) ja (3.6) koosmõju näiteks on graafik (joonis 3.5), kus sirge 1 näitab valemi (3.4) ja sirge 2 valemi (3.6) mõju. V_{\min} on joonte 1 ja 2 lõikepunkt, mis vastab komposiitmaterjali minimaalsele tugevusele.



Joonis 3.5. Komposiitmaterjali tugevuse sõltuvus armatuurisisaldusest: 1 – üle V_{\min} (valemi 3.4 järgi), 2 – alla V_{\min} (valemi 3.6 järgi)

Minimaalne armatuuri maht leitakse, võrdsustades valemid (3.4) ja (3.6) ning lahendades nad V_{\min} suhtes:

$$V_{\min} = \frac{\sigma_t^M - \sigma_l^M}{\sigma_t^A + \sigma_t^M - \sigma_l^M} \quad (3.7)$$

Armatuuri kriitiliseks mahuks V_{kr} nimetatakse sellist mahtu, kus komposiitmaterjali tugevus võrdub armeerimata maatriksi tugevusega (joonis 3.5).

Kui asendada valemis V_A (3.4) V_{kr} -ga ja võrdsustada see maatriksi tugevusega σ_t^M , saame

$$V_{kr} = \frac{\sigma_t^M - \sigma_l^M}{\sigma_t^A + \sigma_l^M} \quad (3.8)$$

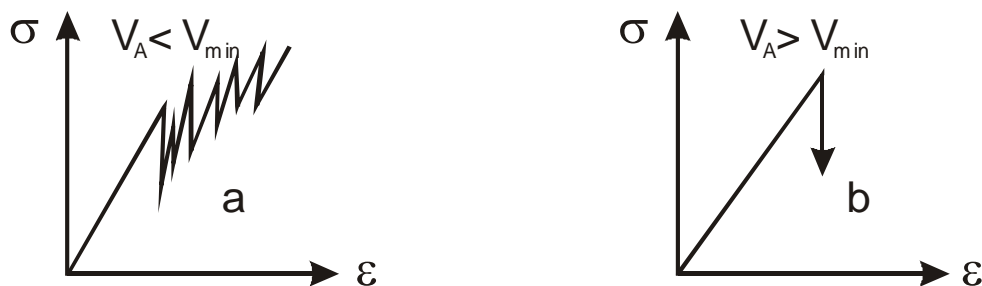
Armeerimise mõju suurendamiseks on vaja, et V_{\min} ja V_{kr} oleksid võimalikult väikesed. Selle saavutamiseks kasutatakse armeerimiseks tugevaid kiude. Mõned andmed V_{\min} ja V_{kr} kohta on tabelis 3.1.

Tabel 3.1

V_{\min} mahuprotsendid alumiiniumist ja roostevabast terasest maatriksiga ning terastraatarmatuuriga komposiitmaterjalides

Maatriksi materjal ja mehaanilised omadused N/mm ²	V_{\min} , % terastraadi tugevusel R_m , N/mm ²			
	700	1700	3500	7000
Alumiinium $\sigma_l^M=30, \sigma_t^M=85$	8,3	3,2	1,6	0,8
Roostevaba teras (18% Cr, 10% Ni) $\sigma_l^M=175, \sigma_t^M=455$	53,4	17,8	8,4	4,1

Tabelist nähtub, et mida plastsem on maatriks (nt alumiinium), seda väiksema armatuuri kogusega on võimalik seda tugevdada, ja vastupidi. Tugeva maatriksi tugevdamiseks on vaja palju armatuuri, eriti kui selle tugevus on ligilähedane maatriksi tugevusele. Komposiitmaterjali purunemise mehhanism juhtudel, kui $V_A < V_{\min}$ või $V_A > V_{\min}$, on täiesti erinev (joonis 3.6).



Joonis 3.6. Ühesuunalise armeerimisega Cu-W-komposiidi tõmbediagrammide skeemid, kui $V_A < V_{\min}$ (a), $V_A > V_{\min}$ (b)

Kui V_A on väiksem minimaalsest vajalikust mahust, siis toob maatriksi plastne deformatsioon kaasa selle karestumise, ja seega kogu komposiitmaterjali tugevnemise. Seetõttu on tõmbediagrammil hambuline kuju (joonis 3.6a).

Kui $V_A > V_{\min}$, siis komposiitmaterjali tugevus on määratud kiudude tugevusega ja nende purunemine põhjustab materjali purunemise (joonis 3.6b).

Oluline komposiitmaterjali omadus on *eritugevus ja erielastsusmoodul (erijäikus)*. Selle all mõistetakse tugevuse või elastsusmooduli suhet komposiitmaterjali tihedusse, mis annab võimaluse erinevaid komposiitmaterjale omavahel võrrelda.

Kuna tugevuse ja elastsusmooduli ühik on N/m^2 ja tihedusühik kg/m^3 , siis eritugevuse ja erielastsusmooduli ühikuks on

$$\left[kg \cdot \frac{m}{s^2} \cdot \frac{1}{m^2} \frac{m^3}{kg} \right] = \left[\frac{N}{m^2} \cdot \frac{m^3}{kg} = \frac{m^2}{s^2} \right]$$

mis on arvutamiseks ebamugav.

Seetõttu on mõnedes käsiraamatutes ja õpikutes [2, 7, 11] kasutusele võetud tinglik eriomaduste ühik [m] või [km], kusjuures selle ühiku kasutamist eritugevuse määramiseks iseloomustab konkreetne füüsikaline mõiste: antud materjalist rippuva traadi maksimaalne pikkus, mis ise ennast hoiab.

$$\left[\frac{kgf \cdot m^3}{m^2 kg} \right] = [m], \text{ kusjuures } \frac{MPa}{g/cm^3} = 0,1 \text{ km ja } \frac{GPa}{g/cm^3} = 100 \text{ km}$$

Teistes allikates [28] (W. Callister) kasutatakse selleks ühikut MPa (eritugevus) või GPa (erijäikus), kui valemities σ_{KM}/ρ ja E_{KM}/ρ võetakse tihedus (t/m^3) lihtsa numbrina.

Komposiitmaterjali tiheduse saab arvutada aditiivsuse valemi järgi:

$$\rho_{KM} = \rho_A \cdot V_A + \rho_M (1 - V_A) = \rho_M + (\rho_A - \rho_M) V_A, \quad (3.9)$$

kus ρ_A ja ρ_M on vastavalt armatuuri ja maatriksi tihedused.

Komposiitmaterjali eritugevus on arvutatav valemities (3.4) ja (3.9) järgi juhul, kui $V_A > V_{\min}$

$$\sigma_e = \frac{\sigma_{KM}}{\rho_{KM}} = \frac{V_A (\sigma_t^A - \sigma_t^M) + \sigma_t^M}{V_A (\rho_A - \rho_M) + \rho_M} \quad (3.10)$$

ja valemities (3.6) ja (3.9) järgi juhul, kui $V_A < V_{\min}$

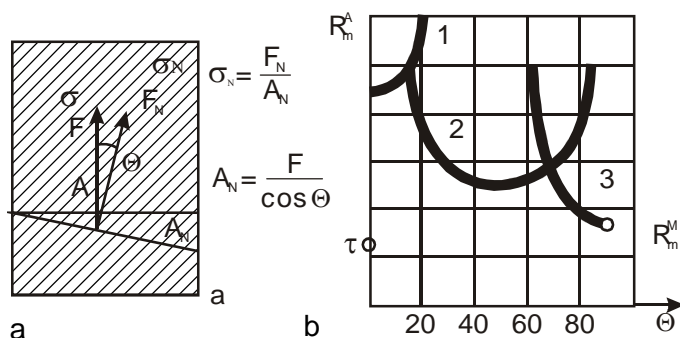
$$\sigma_e = \sigma_e \frac{\sigma_{KM}}{\rho_{KM}} = \frac{\sigma_t^M (1 - V_A)}{V_A (\rho_A - \rho_M) + \rho_M} \quad (3.11)$$

Võrdsustades valemities (3.10) ja (3.11) ning lahendades need V_A suhtes, saab V_{\min} väärtuse valemi (3.7) järgi, mis vastab komposiitmaterjali eritugevuse miinimumile.

Siit tuleneb, et V_{\min} ei sõltu maatriksi ja armatuuri tihedusest. See asjaolu on tähtis, kuna komposiitmaterjale valmistatakse oluliselt erineva tihedusega komponentidest.

3.4. Armatuuri orientatsiooni mõju ühesuunalisel tõmbel

Kiuliste komposiitmaterjalide omadused sõltuvad oluliselt nende koormamise suunast. Joonisel 3.7 on näha komposiitmaterjali tugevuse sõltuvust nurgast Θ armatuuri ja mõjuva jõu vahel.



Joonis 3.7. Kiulise komposiitmaterjali koormamise skeem sõltuvalt armatuuri suunast (a) ja selle tugevusest telgsuunas (b).

Väikeste nurkade korral ($\Theta = 0 \dots 5^\circ$) määrab materjali tugevuse armatuuri tugevus. Kui jätta arvestamata maatriksi tugevus, mis on armatuuriga võrreldes väike, siis saadakse normaalpinged kiududes:

$$\sigma_N = \frac{F_N}{A_N} = \frac{F \cos \Theta}{A / \cos \Theta} = \sigma \cdot \cos^2 \Theta \quad (3.12)$$

Komposiitmaterjali tõmbetugevuse saab arvutada valemiga (3.13), kui $\sigma_N = \sigma_t^A$:

$$\sigma_\Theta = \frac{\sigma_t^A}{\cos^2 \Theta} \quad (\text{kõver 1}) \quad (3.13)$$

Keskiste nurkade puhul ($\Theta = 5 \dots 80^\circ$) on määrav maatriksi ja faaside vahelise kihi purunemine, mida iseloomustab nihkepinge τ ($\tau = \sigma_\Theta \cdot \sin \Theta \cdot \cos \Theta$). Komposiitmaterjali tõmbetugevuse saab arvutada valemiga (3.14)

$$\sigma_\Theta = \frac{\tau}{\sin \Theta \cos \Theta} \quad (\text{kõver 2}) \quad (3.14)$$

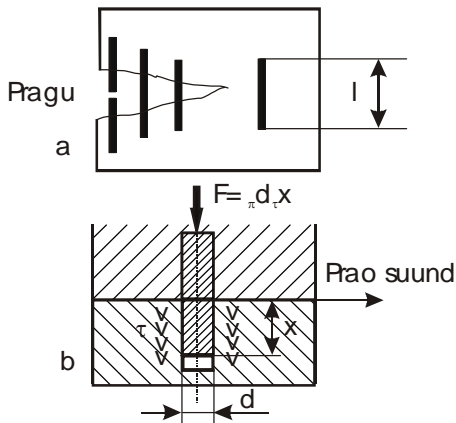
Suurte nurkade korral ($\Theta > 80^\circ$) on komposiitmaterjali tugevus täielikult määratud maatriksi ristisuunalise tugevusega, valem (3.15)

$$\sigma_\Theta = \frac{\sigma_t^M}{\sin^2 \Theta} \quad (\text{kõver 3}) \quad (3.15)$$

Eespool toodust nähtub, et ühesuunalisel armeerimisel peab koormus olema teljesihiline või armatuuri suhtes kuni 5° nurga all. Tugevus on minimaalne, kui koormus on armatuuri suhtes umbes 45° nurga all.

3.5. Komposiitmaterjali tugevus diskreetsete kiududega armeerimisel

Vaadeldud komposiitmaterjali tugevuse arvutamise valemid on õiged siis, kui armeeritakse pikkade kiududega. Kui komposiitmaterjali armeeritakse lühikeste (diskreetsete) kiududega, siis tuleb arvestada nn otsaefekti, mis on seotud pingete kontsentratsiooniga kiudude otstel ja mis avaldab mõju komposiitmaterjali tugevusele. Seda selgitav skeem on toodud joonisel 3.8.



Joonis 3.8. Prao levikuskeem (a) ja kiule ülekantav koormus (b)

Komposiitmaterjalis, mis on armeeritud diskreetsete paralleelkiududega, antakse koormus üle nihkepingetega, mis on proportsionaalsed kiu pikkusega l ja selle osaga x (kiu otsa ja prao suuna vahelise kaugusega).

Koormatud komposiidis võivad olla

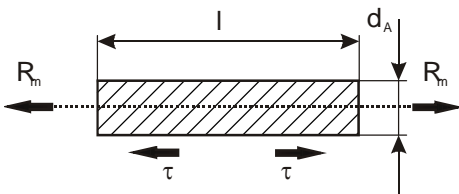
- kiud pikkusega $l = l_{kr}$. Tõmbepinged nendes on tugevuspiirist väiksemad ja kiud ei purune, vaid tõmmatakse maatriksist välja. Nende tugevust täielikult äraei kasutada;
- kiud pikkusega $l > l_{kr}$. Sel juhul on komposiitmaterjali tugevus määratud armatuuri tugevusega ja kasutada võib eespool toodud valemeid.

Armatuuri kriitiliseks pikkuseks l_{kr} loetakse sellist pikkust, mille korral on kiud täielikult koormatud ja purunevad ning nendest sõltub komposiitmaterjali tugevus. Kriitiline pikkus sõltub sideme tugevusest armatuuri ja maatriksi vahel. Seda pikkust saab arvutada, kui võrdsustada kiududele mõjuvad normaal- ja tangentsiaal jõud (joonis 3.9)

$$\sigma_t^A \cdot \frac{\pi d_A^2}{4} = \tau \pi d_A \cdot \frac{l}{2} \quad (3.16)$$

Kui $l = l_{kr}$, on nihke- ja normaal jõud võrdsed, ja seega

$$l_{kr} = \frac{\sigma_t^A}{2\tau} \cdot d_A \quad (3.17)$$



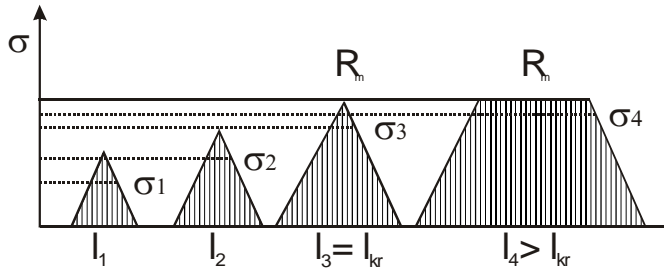
Joonis 3.9. Armeeritud komposiidis kiu tõmbamisel mõjuvad jõud

Kriitiline pikkus suureneb faasidevahelise sideme nõrgenemisel, kiudude läbimõõdu d_A ja nende tugevuse σ_t^A kasvamisel.

Arvutustes ei kasutata suurust l_{kr} , vaid suhet l_{kr}/d_A , kuna viimane ei sõltu mõõteühikust. Metallmaatriksi puhul on see suhe ≤ 250 , plastmaatriksi puhul 350 ja enam.

Kui oletada, et diskreetsetes kiududes kasvavad normaalpinged otsast nende keskosa poole lineaarselt, nagu see on näidatud pingepüüridel (joon 3.10), saab arvutada komposiitmaterjali tugevuse ka juhtudel, kui $l < l_{kr}$. Keskmisi pingeid kiududes saab arvutada valemiga

$$\sigma = \frac{1}{l_0} \int_0^l \sigma_{dl} = \frac{\tau \cdot l}{d_A} \quad (3.18)$$



Joonis 3.10. Tõmbepingete epüürid eri pikkusega kiududes:
 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ – keskmised pinged $\sigma = \tau \cdot l / d_A$

Kui kiud on lühemad kui l_{kr} , siis puruneb komposiitmaterjal kiudude väljatõmbamisel maatriksist, nagu seda on näidatud joonisel 3.8. Sel juhul omandab aditiivsuse valem (3.4) (segureegel) kuju

$$\sigma_{KM} = \frac{\tau \cdot l}{d_A} \cdot V_A + \sigma_t^M (1 - V_A) \quad (3.19)$$

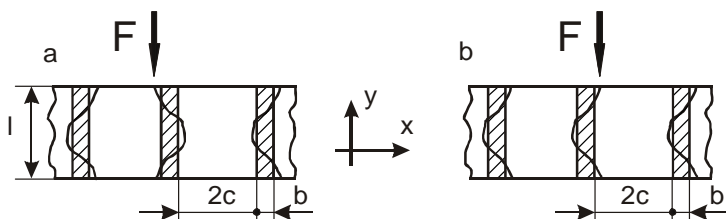
Kui armatuuri pikkus ulatub l_{kr} -ni, siis normaalpinge on maksimaalne selle keskel ($\sigma_{max} = \sigma_t^A$) ja edasisel kiu pikkuse suurendamisel (joonis 3.10, pikkus l_4) maksimaalne pinge ei kasva, kasvab aga kiu osa, kus pinge mõjub. Vähekoormatud kiudude otste pikkust nimetatakse *ebaefektiivseks pikkuseks* l_{ee} ja selle võrra tuleb suurendada kiudude üldpikkust L , et nad kannaksid koormust. Seega peab arvestama, et $L - 2l_{ee} \gg l_{kr}$.

3.6. Komposiitmaterjali survetugevus

Komposiitmaterjali survetugevust mõjutavad nii armatuuri mehaanilised omadused kui ka kiu läbimõõt, maatriksi jäikus ja tugevus ning faasidevaheliste üleminekupindade omadused.

Komposiitmaterjal kannab survekoormust nii kaua, kuni ta kiud ei nõtku (ei kaota kindlasuunalist orientatsiooni).

Kiududega armeeritud kokkusurutud komposiiti võib kirjeldada kahemõõtmelise mudeliga (joonis 3.11), mis koosneb sirgetest kiududest pikkusega l , laiusega b ja mis on maatriksis vahekaugusega $2c$.



Joonis 3.11. Ühesuunalise armatuuriga komposiitmaterjali survemudel sümmeetrilisel (a) ja ebasümmeetrilisel (b) nõtkel

Armatuurisuunalise koormuse F mõjul võib materjal deformeeruda kahe erineva mehhanismi järgi:

1. Kõrvuti asetsevad kiud kaotavad püsivuse ja deformeeruvad eri suundades sümmeetriliselt kiududevahelise ja nendega paralleelse pinna suhtes (joonis 3.11a). Sel juhul toimub komposiidi purunemine tõmbepingete mõjul, mis on risti kiu teljega.
2. Kõrvuti asetsevad kiud deformeeruvad ühes faasis (asümmeetriliselt) kiududevahelise ja nendega paralleelse pinna suhtes (joonis 3.11b). Selles variandis puruneb maatriksi materjal nihkedeformatsiooni tulemusena.

Vastavalt kahele kirjeldatud purunemismehhanismile võib survetugevust arvutada valemitega (3.20) ja (3.21):

$$\text{a) purunemisel esimese mehhanismi järgi } \sigma_s = 2V_A \sqrt{\frac{V_A \cdot E_M \cdot E_A}{3(1 - V_A)}} \quad (3.20)$$

$$\text{b) purunemisel teise mehhanismi järgi } \sigma_s = \frac{G_M}{1 - V_A} \quad (3.21)$$

kus G_M on maatriksi nihkeelastsusmoodul ($G_M \approx 0,5E$).

Kuna mõlemal juhul on survetugevus proportsionaalne kiudude mahuga, mis on aga proportsionaalne nende läbimõõduga, siis on jämedamate kiududega komposiitmaterjal suurema survetugevusega kui peenemate kiududega komposiitmaterjal sama armatuurimahu korral.

Vähese armatuurisisalduse (metall, keraamika) puhul kulgeb purunemine esimese mehhanismi järgi, suure V_A puhul (plastid) – teise mehhanismi järgi. Peale V_A mõjutab purunemist suhe E_A/G_M .

Mida suurema väärtusega on see suhe, seda suurem on armatuurimaht V_A , ja purunemine toimub tõmbepingete mõjul. See pole soovitatav, kuna analoogselt metallidega on eelistatavamad nihkepinged, neid talub komposiitmaterjal paremini.

Kokkuvõtteks võib öelda, et kuna survekoormustel mängivad armatuuri omadused väiksemat rolli kui tõmbekoormustel, siis annab ka armeerimine survekoormuste puhul väiksemat efekti kui tõmbekoormustel (välja arvatud komposiitmaterjali summutusvõime ja väsimustugevus survekoormustel).

3.7. Komposiitmaterjali purunemissitkus

Üks komposiitmaterjali tähtsaim omadus on suur vastupanu pragude levimisele. Igas materjalis on sisedefekte. Need võivad juba suhteliselt väikeste pingete mõjul hakata suurenema, mis lõpptulemusena viib purunemiseni. Sellest, kuidas armatuur tõkestab pragude levimist, sõltub konstruktsioonide töökindlus. Tuleb arvestada, et kõrge staatilise tugevusega (R_m , R_p) materjal on reeglina väikese sitkusega. Tugevus ei soodusta materjali võimet takistada prao levimist madalate plastsusnäitajate (A ja Z) tõttu.

Eriti oluline on silmas pidada, et üks ja sama materjal võib olla sitke, kui temast valmistatud detail on õhuke, ja samas habras, kui detail on massiivne (nt klaaskiud ja klaas). Selles väljendub nn mastaabitegur. See ei luba laiendada väikeste katsekehade mehaanilisi omadusi suurtele massiivsetele detailidele.

Materjali purunemissitkuse hindamiseks on vaja leida kriteerium, mis lubaks võrrelda materjalide omadusi sõltuvalt nendest valmistatud detailide suurusest.

Praod on defektid, mis on pingekontsentraatoreiks, ja pinged praod tipus võivad ületada materjali tugevuspiiri. Prao kasvamisega materjalis kaasneb:

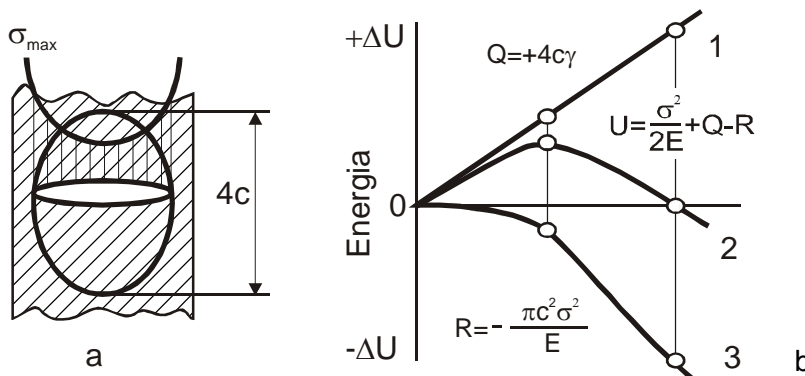
- a) elastsusenergia R vabanemine, mis vähendab pingestatud materjali siseenergiat;
- b) materjali siseenergia kasv pinnaenergia Q arvel seoses uue pinna moodustumisega pragunemisel.

Prao käitumine pinge all olevas materjalis sõltub eelnimetatud energiatega bilansist, mis vastavalt termodünaamika II seadusele peab olema minimaalne.

Ebastabiilse praod energiatega bilans on järgmine: siseenergia U praota ühikpaksusega plaadis (joonis 3.12a), mis on koormatud pingega σ , on arvutatav valemiga

$$U = \frac{\sigma \varepsilon}{2} = \frac{\sigma^2}{2E}, \quad (3.22)$$

kus σ – pinge,
 ε – suhteline deformatsioon,
 E – normaalelastsusmoodul.



Joonis 3.12. Pingete kontsentratsioon ellipsikujulise praod tipus (a) ja siseenergia muutumise skeem praod suurenemisel (b): 1 – pinnaenergia muutus praod suurenedes, 2 – summaarne siseenergia, 3 – vabanev elastne energia

Kui plaadis on pragu, siis toimub selles pinge mõjul kaks protsessi:

- 1) praod pikkuse kasvuga kaasneb elastsusenergia R vähenemine. Praod pikkusel $2c$ väheneb elastsusenergia R proportsionaalselt ellipsoidi pindalaga $2\pi c^2$:

$$R = \frac{\sigma^2}{2E} \cdot 2\pi c^2 = \frac{\pi c^2 \sigma^2}{E} \quad (3.23)$$

- 2) seoses praod kasvuga tekib kaks uut pinda suhtelise pinnaenergiaga q . Pinnaenergia suurus

$$Q = 4c \cdot q. \quad (3.24)$$

Kuna elastsusenergia R vähendab materjali siseenergiat, siis on ta negatiivne ($-R$). Ja vastupidi, plaadi energiat suurendav pinnaenergia Q on positiivne ($+Q$).

Prao käitumine koormatud plaadis sõltub energiatega Q ja R tasakaalust. Graafiliselt näeb seda joonisel 3.12b.

Energia diferentseerimine praok pikkuse järgi näitab, kas pragu on püsiv või ebastabiilne.

1. Kui $\frac{d(-R + Q)}{dc} > 0$, siis on pragu püsiv ega kasva.

2. Kui $\frac{d(-R + Q)}{dc} < 0$, siis pragu kasvab täiendava energia juurdeviimiseta ja toimub habras purunemine.

3. Kui $\frac{d(-R + Q)}{dc} = 0$, siis pragu on ebastabiilne.

$$\text{Diferentseerimisega saab } \frac{d}{dc} \left(-\frac{\pi c^2 \sigma^2}{E} + 4cq \right) = -\frac{\pi 2c \sigma^2}{E} + 4q = 0 \quad (3.25)$$

$$\text{kust } 2q = \frac{\pi c \sigma^2}{E} \quad (3.26)$$

$$\text{ja seega kriitiline pinge } \sigma_{kr} = \sqrt{\frac{2Eq}{\pi c}} \quad (3.27)$$

$$\text{Parameeter } G_\sigma = \frac{\pi c \sigma^2}{E} \quad (G_\sigma = 2q) \quad (3.28)$$

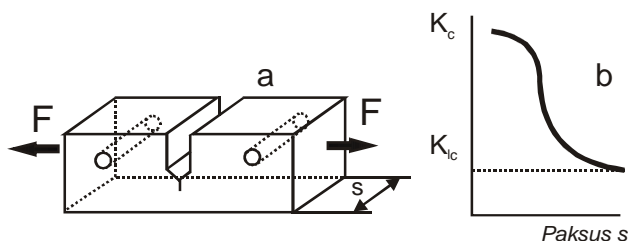
seob omavahel pinge ja defekti suuruse, millest sõltub materjali töökindlus

$$G_\sigma = \frac{K^2}{E}, \text{ kus } K^2 = \pi c \sigma^2 \text{ ja } K = \sqrt{G_\sigma} = \sigma \sqrt{\pi c} \quad (3.29)$$

K on pinge intensiivsuse tegur, mis iseloomustab pingete kontsentratsiooni praos tippus. Teda võib võrrelda elektrilise või magnetilise pingega.

Prao käitumine koormatud plaadis sõltub teguri K suurusest. Seda kriitilist suurust, mille puhul pragu kasvab iseseisvalt ilma koormuse suurenemiseta, tähistatakse K_C . Seega seob K_C omavahel pinge suuruse ja praok kriitilise pikkuse purunemise momendil.

Tegur K_C näitab kõige suuremat pinget ja praok pikkust, mis ei too veel kaasa materjali purunemist. Tegur K_C määratakse kõige raskemates tingimustes – paksus ja laias pingekontsentratsiooniga paindeteimikus. Sellises teimikus on praok tipp praktiliselt ainult kõige ohtlikumate normaalpingete mõju all, sest nihkepinged ja plastne deformatsioon puuduvad (nn tasapinnaline deformatsiooniolukord). Rasketest katsetustingimustest tulenevalt omandab tegur K_C tõmbel minimaalse väärtuse, mida tähistatakse K_{1C} (joonis 3.13).



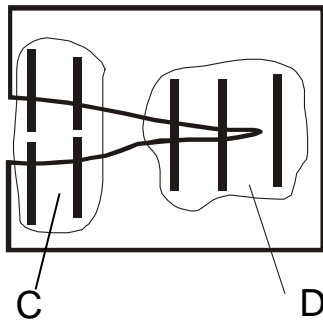
Joonis 3.13. Teimiku kuju purunemissitkuse määramiseks (a) ja teguri K_C sõltuvus teimiku paksusest (b)

Tegur K_{IC} on purunemissitkuse näitaja, ta iseloomustab materjali töökindlust ja selle kasutamine on õigustatud põhiliselt raskkoormatud või vastutusrikastes konstruktsioonides (sillad, liftid, lennuaparaadid). Tegur K_{IC} annab võimaluse lahendada kaht ülesannet:

- hinnata olemasolevate defektide suuruse järgi masinate töökindlust,
- hinnata koormuste järgi lubatud defekti suurust.

Tavaliste isotroopsete materjalide puhul (sh ka metallisulamites) kasvab purunemissitkus, pingete intensiivsuse tegur K_{IC} koos metalli plastsusnäitajatega A ja Z . See kehtib ka iga komposiitmaterjali komponendi kohta, aga kui nad on ühendatud, siis saab uue materjali sitkust tõsta mitte ainult klassikalisel meetodil, s.o plastsusel arvel. Komposiitmaterjali iseloomustavad kaks erinevat faasi, mida eraldavad üleminekupinnad. Selle tõttu tõstetakse komposiitmaterjali sitkust kahe meetodiga:

- takistatakse prao levikut (vähendades selle energiat) kiudude väljatõmbamisega maatriksist. Selle mehhanismi puhul takistavad prao kasvu hõõrdejõud, mis tekivad maatriksi ja kiudude vahel;
- takistatakse prao levikut barjääride abil, milleks on maatriksi ja armatuuri vahelised üleminekupinnad: sideme purustamine nendel üleminekupindadel vajab lisaenergiat (joonis 3.14).



Joonis 3.14. Prao levikuskeem

Piirkonnas D leiab aset kiudude väljatõmbamine maatriksist, piirkonnas C aga purunevad kiudude ja maatriksi vahelised sidemed. Kiudude väljatõmbamistöö on suurem kui faasidevaheliste üleminekupindade purustustöö, ja see annab võimaluse tõsta komposiitmaterjali sitkust isegi juhul, kui mõlemad faasid on haprad. Seega on vaja luua sellised tingimused, et kiud ei puruneks, vaid nad tõmmataks maatriksist välja.

Samuti osutub tulemuslikuks armatuuri plastsusel ja sitkuse tõstmine, seda eriti hapra maatriksiga komposiitmaterjalide puhul.

Maatriksi ja kiudude plastsusel tulenevad järgmised variandid:

- habras maatriks + habras kiud,
- habras maatriks + plastne kiud,
- plastne maatriks + habras kiud.

Igale variandile on iseloomulik oma purunemismehhanism.

Esimene variant – habras maatriks + habras kiud – eeldab armeerimist diskreetsete kiududega, mis ei purune, vaid tõmmatakse maatriksist välja. Selleks vajalik energia on tunduvalt suurem, kui kulub iga komponendi purunemiseks eraldi. Seetõttu võib eeldada, et komposiitmaterjali purustustöö võrdub kiudude väljatõmbamistööga.

Kui kiudude pikkus $l > l_{kr}$, (vt. valem 3.17), siis moodustab väljatõmmatud kiudude osa l_{kr}/l nende üldarvust, aga väljatõmmatud kiudude arv komposiitmaterjali pinnahüvikule avaldub

valemiga

$$N = \frac{l_{kr}}{l} \cdot \frac{4V_A}{\pi d_A^2} . \quad (3.30)$$

Maksimaalne väljatõmbamistöö W_{\max} realiseerub, kui $l=l_{kr}$:

$$W_{\max} = \frac{1}{12} V_A \cdot \sigma_t^A \cdot l_{kr}. \quad (3.31)$$

Valemite (3.17), (3.30) ja (3.31) kohaselt saab komposiidi sitkust tõsta, suurendades korrutist $V_A \cdot \sigma_t^A \cdot l_{kr}$. Seda võib saavutada kas vähendades sideme tugevust armatuuri ja maatriksi vahel (τ), suurendades kiudude arvu (N) komposiitmaterjali pinnauhikus, kasutades optimaalse läbimõõduga kiudusid (d_A) või optimeerides l_{kr} ja N suhte.

Kui haprad kiud purunevad hapra maatriksiga komposiidis ilma väljatõmbamiseta, siis jääb komposiitmaterjali sitkus väikeseks.

Teine variant – habras maatriks + plastne kiud – eeldab kõigepealt tugevat sidet armatuuri ja maatriksi vahel. Sel juhul ei läbi pragu hapras maatriksis plastset kiudu, vaid seiskub, kusjuures kiud venivad.

Tugevus kasvab proportsionaalselt armatuuri paksusega ning mahuga, st samadel tingimustel nagu esimeses variandis, aga ka faasidevahelise sideme tugevuse suurendamise teel.

Kolmanda variandi – plastne maatriks + habras kiud – puhul kasvab purustustöö võrdeliselt kiudude läbimõõduga d_A ja pöördvõrdeliselt nende mahulise sisaldusega V_A . Positiivselt mõjutavad purustustööd ka maatriksi tugevus σ_t^M ja selle deformeeritavus ε_M . Parema tulemuse annab armeerimine diskreetsete kiududega, mida tõmmatakse maatriksist välja.

Esimese variandi järgi purunevad tavaliselt keraamilise või süsinikmaatriksiga komposiitmaterjalid, teise järgi metall- ja süsinikarmatuuriga komposiitmaterjalid, kolmanda variandi järgi aga plastkomposiidid.

3.8. Komposiitmaterjalide mehaaniliste omaduste määramise meetodid

Erinevalt tavaliste isotroopsete materjalide (nt metallide) omadustest sõltuvad komposiitmaterjalide omadused oluliselt valmistamise tehnoloogiast, jõu rakendamise suunast ja teimiku kujust.

Komposiitmaterjalide struktuuri iseärasuste tõttu on sageli vajalikud ka niisugused katsetused, mida tavaliste metallide puhul ei tehta. Näiteks kiududega armeeritud materjalil tuleb määrata selline omadus nagu kihtidevaheline nihketugevus. Ebapiisav nihketugevus põhjustab materjali kihistumist. Komposiitmaterjalide mehaaniliste omaduste määramiseks tuleb ühe teimi asemel teha mitu (9–10) tõmbesurveime. Kokkuvõtteks võib kinnitada järgmist:

- a) komposiitmaterjali mehaanilised omadused määratakse ainult kindlas suunas,
- b) arvestada tuleb komposiidi valmistamistehnoloogiat, mis mõjutab omadusi,
- c) teimikutel laboratoorsetes tingimustes saadud näidud on reaalsetel detailidel üldjuhul halvemad.

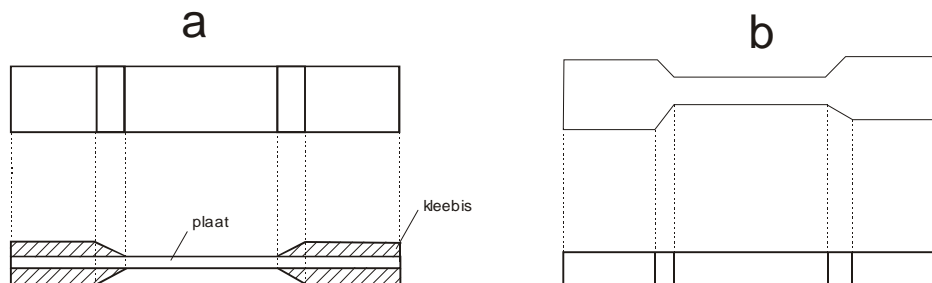
Tavaliselt viiakse komposiitmaterjalidega läbi kolm teimi: tõmbe-, surve- ja nihketeim. Omapärane on ka komposiitmaterjalide kõvadusteim.

3.8.1. Tõmbeteim

Üheteljeline tõmbeteim on kõige levinum komposiitmaterjali katsetamisviis. Selle abil määratakse elastsusmoodulit, tõmbetugevust ja plastsust ning Poissoni tegurit.

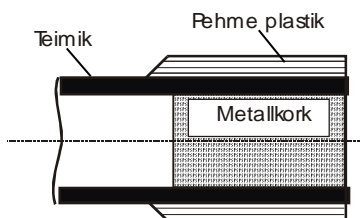
Erinevalt metalliteimidest on oluline komposiitmaterjalist teimiku kinnitusviis katsemasinas. Kasutatakse ka pikemaid teimikuid ja suurt tähelepanu pööratakse pinge-kontsentraatorite mõjule. Tõmbeteimiks kasutatakse lamedaid või torukujulisi teimikuid. Lamedad teimikud on tavaliselt plaadi- või labidakujulised, nende mõõtmed on normitud.

Plaadikujulisi teimikuid (joonis 3.15a) kasutatakse pikisuunas kiududega armeeritud materjalide puhul. Pikisuunaliste pingekontsentraatorite mõju vähendamiseks kleebitakse plaadi otstele tugevdusplaadid, mille plastsus on suurem kui põhimaterjali oma ja paksus 2–3 korda suurem teimiku paksusest. Sellele vaatamata purunevad teimikud sageli otstest. *Labidakujulised* teimikud (joonis 3.15b) purunevad reeglina tööosas ja neid kasutatakse ristsuunas kiududega armeeritud komposiitmaterjalide katsetamisel.



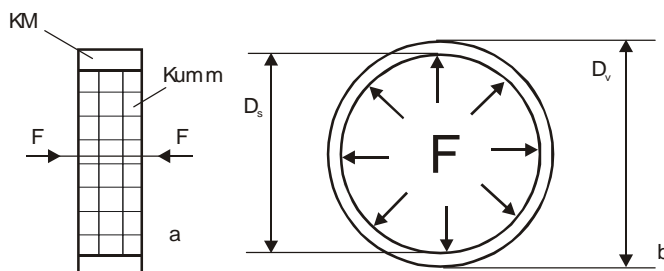
Joonis 3.15. Tõmbeteimikute kujusid

Eriti oluline on katsetada komposiitmaterjale mitte piki või risti kiudu, vaid nurga all vahemikus $0...90^\circ$. Kuna lamelate teimikute katsetamine kiudude suhtes nurga all mõjuva jõuga raskendab nende deformeerimist, siis muutub teimiku ristlõige ristkülikust rööpkülilikuks. Sellel juhul on tulemusi arvutada keerukas, ja materjali tõmbeteim teostatakse torukujuliste teimikutega. Et katsemasina kinnitusklambrid ei muljuks toru otsi, tugevdatakse neid metallkorkidega ja pealekleebitud pehme plastiga (joonis 3.16). Kuna lamelad ja torukujulised teimikud valmistatakse erinevate tehnoloogiatega, siis ühe ja sama komposiidi omadused, mis on määratud, kasutades erinevaid teimikuid, pole ühesugused ja võrreldavad.



Joonis 3.16. Torukujulise teimiku ots

Kuna komposiitmaterjali kõige mõjusam valmistamise tehnoloogia on mähkimine, siis on omaduste määramiseks tõmbel välja töötatud Ameerika sõjalaevanduse laboris (Naval Ordnance Laboratory) spetsiaalne nn NOL-proov, mille skeem on toodud joonisel 3.17.



Joonis 3.17. NOL-teimikute surveteimi skeem: kummirõnga abil (a), survevedeliku abil (b)

Tõmbeteimil koormatakse ringteimik seestpool survega, mida arendab kummist kork või vedelik. Elastsusmoodul ja tõmbetugevus arvutatakse järgmiste valemite abil:

$$E = \frac{pD_s}{2h\varepsilon} \quad (3.32)$$

$$\sigma = \frac{pD_s}{2h} \quad (3.33)$$

kus p – surve,

D_s – teimiku siseläbimõõt,

h – teimiku kõrgus,

ε – teimiku välispinna suhteline deformatsioon.

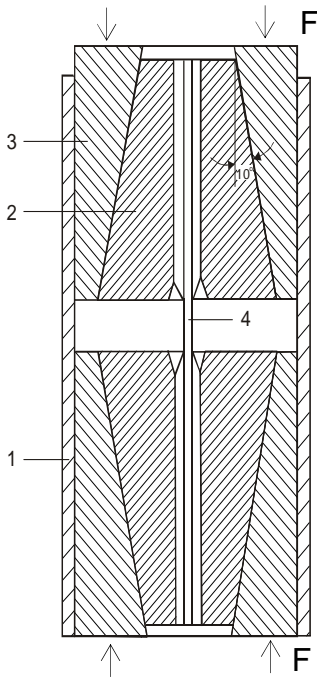
Teimiku soovitatavad mõõtmed (tollidest ümber arvestatud millimeetritesse) on $D_s = 146,05^{+0,05}$,

$h = 6,35^{+0,05}$, $D_v = 149,1^{+0,05}$.

Samu meetodikaid ja valemeid kasutades tehakse ka surveteim, vaid teimikud on telgjõudude vältimiseks kitsamad ($h/D = 0,05$).

3.8.2. Surveteim

Komposiitmaterjali purunemise põhjus survel on kiudude püsivuse (asendi) kadumine nõrga vastupanu tõttu nihkedeformatsioonile. Surveteimi iseärasus on see, et teimiku tugevus sõltub oluliselt kõrgusest – mida kõrgem on teimik, seda väiksem on hõõrdejõudude mõju tema otstel. Lühikest teimikut kasutatakse vaid surveelastsusmooduli määramisel väikeste koormuste juures, pikki teimikuid aga siis, kui komposiitmaterjal on plastselt hästi deformeeritav. Kiudude väikese püsivuse tõttu horisontaalsuunas ei tohi nurga tangens mõjuva jõu ja teimiku telje vahel ületada 0,001–0,004 kraadi. Selle tagamiseks kasutatakse rakist, mis on toodud joonisel 3.18.

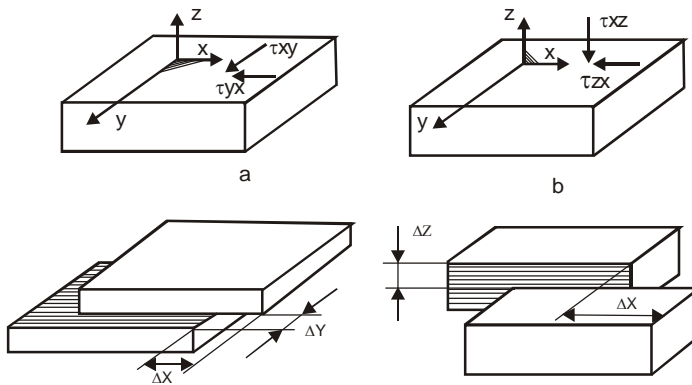


Joonis 3.18. Surveteimi rakis: 1 – kest, 2 – kiilhaarats, 3 – bandaaž

3.8.3. Nihketeim

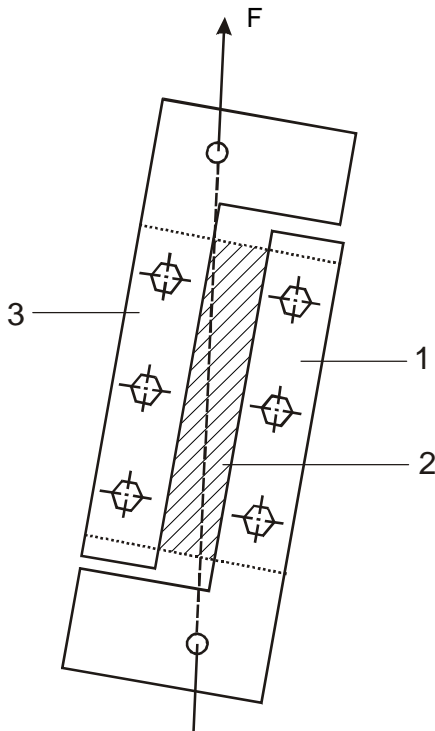
Kuna komposiitmaterjal koosneb kahest või enamast faasist, millest üks on suhteliselt pehme ja väikese tugevusega, teine vastupidi kõva ja jäik, siis on oluline nende vastupanu nihkedeformatsioonile ja -purunemisele. Seda määratakse vastavate teimidega. Sõltuvalt komposiidis kasutatud armatuurist (leht, kiud), esineb kaks nihkevarianti:

- nihe toimub armatuurilehe (kiudude kihi) tasandil nihkepingete τ_{xy} ja τ_{yx} mõjul (joonis 3.19a);
- nihe toimub maatriksis nihkepingete τ_{xz} ja τ_{zx} mõjul (joonis 3.19b).



Joonis 3.19. Nihkedeformatsioonid kihelistes komposiitides: armatuuri tasandil (a), kihtidevahelises maatriksis (b)

Mõlemal juhul on deformatsioon maatriksist. Esimese variandi puhul määratakse nihkemoodul G_{xy} ja nihketugevus τ_{xy} , teise variandi puhul – maatriksi ja armatuuri vaheline tugevus τ_{zx} . Esimese variandi omaduste teimimine viiakse läbi, katsetades lehekujulist teimikut spetsiaalses rakises (joonis 3.20).



Joonis 3.20. Nihketeimi rakis. 1, 3 – haaratsid, 2 – teimik

$$\text{Nihkemoodul määratakse valemiga } G_{yx} = \frac{F}{l} \cdot h \cdot \sqrt{2} \cdot \left(1 + \varepsilon_1 - \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} + \varepsilon_2 \right), \quad (3.34)$$

kus F – koormus,

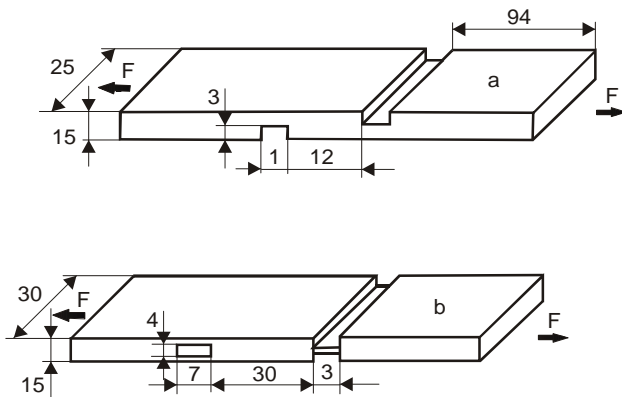
l – teimiku külje pikkus (10×100 mm),

h – teimiku paksus,

ε_1 ja ε_2 – suhtelised deformatsioonid diagonaalsuunas.

$$\text{Nihketugevus määratakse valemiga } \tau_{xy} = \frac{F}{l} \cdot h \cdot \sqrt{2}. \quad (3.35)$$

Määratavad tugevusomadused kihtidevahelisel purunemisel (skeem 3.19b) on maatriksi elastsusmoodul ja nihketugevus, mille tingib faasidevaheline seos. Teimikutena kasutatakse pingekontsentraatoritega plaate (joonis 3.21); tüüp b on eelistatavam, sest see väldib teimikus pöördemomenti.



Joonis 3.21. Teimikud tõmbekoormusega nihketugevuse määramiseks

Nihketugevus kihtidevahelisel purunemisel arvutatakse valemiga

$$\tau = F/A, \quad (3.36)$$

kus F – tõmbejõud,

A – purunemispind (teimiku tüüp a korral $A = 12 \times 25 \text{ mm}^2$, tüüp b korral $A = 39 \times 30 \text{ mm}^2$).

Nihkeelastsusmoodulit määratakse valemiga

$$G = \Delta F / A \Delta \gamma, \quad (3.37)$$

kus ΔF – tõmbejõu juurdekasv,

A – murdepind pingekontsentraatori kohal (vt valem 3.36),

$\Delta \gamma$ – suhteline deformatsioon ühes maatriksikihis.

Nihketeimiga määratud omadused sõltuvad oluliselt teimiku suuruselt, ja neid võib vaadelda kui suhtelisi suurusi, mida saab kasutada erinevate materjalide võrdlemiseks.

3.8.4. Paindeteim

Erinevalt metallide katsetamisest paindele, annab komposiitide katsetamine paindele raskesti interpreteeritavad tulemused. See on seotud komposiitide struktuuri keeruka deformatsioonimehhanismiga. Teatavasti metallide katsetamisel paindele võib kihtidevahelist nihet mitte arvestada, mõistlikult võib seda küll ette kujutada ja arvutada deformatsioonid ja pinged nn “neutraalkihi” suhtes, mis ei deformeeru.

Samal ajal on komposiitide katsetamisel kihtidevaheline deformatsioon reaalne ja erinev komposiidi faaside erineva elastsusmooduli tõttu. Selle tulemusena kutsub paindekoormus metallides esile vaid normaalpingeid, kihilistes komposiitides aga nii normaal- kui ka nihkepingeid. See asjaolu teeb komposiitide paindetugevuse väga tundlikuks mitmete raskelt kontrollitavate mõjurite (nii struktuur kui ka tehnoloogilised) suhtes, mistõttu paindeteimi kasutatakse harva ja selle tulemusi ei saa tavaliselt laiendada teistele isegi sama koostise ja tehnoloogiaga valmistatud komposiitidele.

3.8.5. Kõvadusteim

Komposiitide, v.a keraamiliste komposiitide kõvadust määratakse Rockwelli modifitseeritud meetodiga, mis erineb tavameetodist otsaku (teraskuuli) mõõtmete poolest. Andmed selle kohta tuuakse tabelis 3.2. Keraamiliste komposiitide kõvaduse määramisel kasutatakse standardset Vickersi meetodit.

Tabel 3.2

Rockwelli kõvadusskaalad R, L, M, E

Skaala	Eelkoormus F_0 N(kg)	Üldkoormus F N(kg)	Kuuli läbimõõt mm	Mõõteskeem
R	98,1 (10)	588 (60)	12,7	
L	98,1 (10)	588 (60)	6,35	
M	98,1 (10)	981 (100)	6,35	
E	98,1 (10)	981 (100)	3,175	

4. METALLMAATRIKSKOMPOSIITMATERJALID (MMKM)

Nagu eespool mainitud (vt p 2), kasutatakse komposiitide valmistamiseks kolme peamist meetodit: valamine, pressimine või mähkimine, mille konkreetne valik sõltub maatriksi ja armatuuri koostisest. Teisi, traditsioonilisi metallide töötlemise variante (keevitus, lõikamine jm) praktiliselt ei kasutata. Valmistamistehnoloogia peab maksimaalselt säilitama komposiitmaterjali komponentide positiivsed omadused ja vähendama nende puudusi.

4.1. Metallmaatrikskomposiitmaterjalide valmistamise viisid

Metallmaatrikskomposiitmaterjalid (MMKM) koosnevad metalsest maatriksist ja armatuurist, milleks võivad olla mitmesugused (metall-, süsinik-, keraamilised jt peale orgaaniliste) kiud. Armatuuri järgi jagatakse MMKM pidevate kiududega ja diskreetsete kiududega KM-ks ning dispersioontugevdatud sulameiks (joonis 2.2). Valmistamisviisi järgi jaotatakse MMKM valatuiks ja deformeerituiks. Valatud MMKM saadakse armatuuri immutamiseega sulametallidega või kasutades eutektse koostisega sulami suunatud kristalliseerimist, mille käigus sulametallist sadestub tugevdav faas. Deformeeritud MMKM saamiseks kasutatakse paagutamist, kuumpressimist, difusioonkeevitamist, kuumstantsimist, plahvatusega pressimist ja mitmesuguseid pindamise mooduseid. Paljusid tahkefaasmeetodeid, kaasa arvatud dünaamilisi, kasutatakse ka keraamilise maatriksiga KM saamiseks.

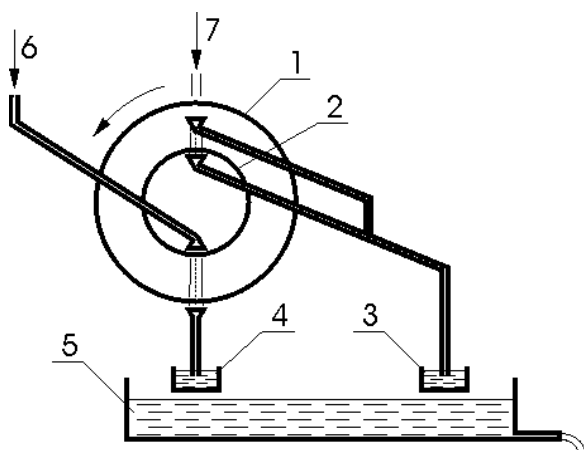
4.1.1. Niitkristallidega armeeritud MMKM saamine

Niitkristallidega armeeritud MMKM valmistamine toimub kahes staadiumis:

- kiudude saamine,
- MMKM valmistamine.

Kuna kasvatatud niitkristallid tunduvalt erinevad üksteisest mõõtmetelt, kristallivõre ja pinna korrapärasuse, aga ka mehaaniliste omaduste poolest, siis tuleb kõigepealt eraldada kõlbulikud kiud ja sorteerida need mõõtmete järgi.

Kiudude klassifikatsiooni mõõtmete järgi tehakse vedeliku ja õhu meetodil. Vedeliku meetodit kasutatakse kõige peenemate niitkristallide ($\varnothing 1...5 \mu\text{m}$, $l = 100...1000 \text{ mm}$) eraldamiseks. Seadme skeem on toodud joonisel 4.1. Suspensioon (6), mis sisaldab 1...5% niitkristalle, suunatakse separaatorisse, mille põhiosad on kaks pöörlevat võrktrumlit (1) ja (2). Pikad kiud jäävad võrgule (1) ja pestakse läbi trumli suunatud veejoaga (7) kogujasse (3). Lühikesed kiud lähevad läbi mõlema trumli võrgu ja kogunevad kogujasse (4). Separatuur on varustatud sõelte komplektiga, et järgnevatel separeerimistel saada väiksema pikkusevahemikuga kiude.



Joonis 4.1. Separatori skeem niitkristallide klassifitseerimiseks:
 1, 2 – sõeltrumlid, 3, 4 – kiudude kogujad, 5 – vee äravool,
 6 – kiududega suspensioon, 7 – vesi

Paljude ainete niitkristalle kaetakse pinnetega, et parandada nende märgumist metallmaatriksiga, vältida nende vigastamist töötlemisel, takistada liigset lahustumist maatriksis või parandada orienteerimist. Pinded mitte ainult ei kergenda komposiitmaterjalide saamist, vaid on vahetsooniks, kus pinged antakse maatriksilt kiududele ja sellega mõjutatakse MMKM talitusomadusi.

Enim levinud on pinnete kandmine kiududele keemilisel aurustus-sadestusmeetodil (CVD) metallide karbonüülidest – $Me_m(\text{CO})$ või nende halogeenidest – $Me_m\text{Cl}_n$. Sel meetodil kantakse kiududele Ni-, Ti-, W-pindeid, kuna nende karbonüülid lagunevad kergesti kuumutamisel või halogeenide taandamisega ja ei too kaasa kiudude struktuuri muutumist. Tabelis 4.1 on toodud kiudude metalliseerimistingimused karbonüülid lagundamisel.

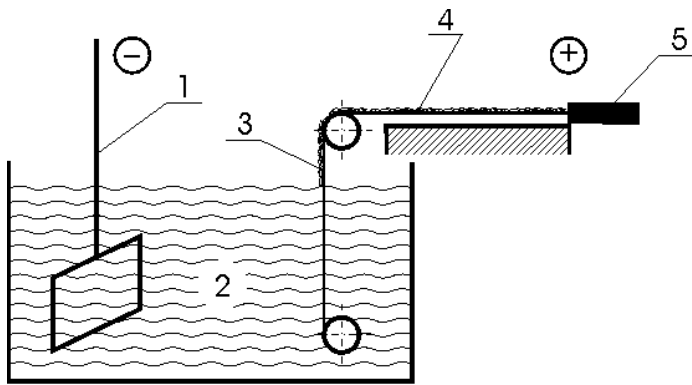
Tabel 4.1

Kiudude metalliseerimisrežiimid karbonüülid lagundamisel

Pindmaterjal	V	Cr	Mo	W	Ni	Co
Karbonüül	$\text{V}(\text{CO})_8$	$\text{Cr}(\text{CO})_6$	$\text{Mo}(\text{CO})_6$	$\text{W}(\text{CO})_6$	$\text{Ni}(\text{CO})_3$	$\text{Co}(\text{CO})_3$
Temperatuur, °C	20	40	50	70	20	20
Kiu kuumenemise temperatuur, °C	70...100	350...750	450...700	450...750	150...250	180...220

Tähelepanuväärne on kiudude orienteeritus komposiidile mõjuva jõu suhtes, kuna ainult sel juhul, kui jõu suund on paralleelne kiudude suunaga, realiseeruvad KM omadused kõige täielikumalt. Kiudude orienteerimiseks segatakse nad viskoosse ammooniumalginaadi (NH_4NO_3) lahusega, moodustades suspensiooni. Suspensioon ekstrudeeritakse läbi silma vedelasse happelahusesse, kus alginaat muutub želatiiniks. Saadud köis läbimõõduga umbes 6 mm tõmmatakse ja keritakse mitmes kihis trumlile, kihid lõigatakse lahti ja kuivatatakse. Seejärel kuumpressitakse, kusjuures sideaine lendub, ja saadud lehes on kiud ühesuunalised.

Teine orienteerimise meetod seisneb selles, et elektrivool juhitakse läbi kahe elektroodi vahel oleva dielektrilise suspensiooni, mistõttu kiud polariseeruvad ja orienteeruvad jõujoonte suunas. Ühe elektroodina võidakse kasutada õhukest liikuvat metall-lehte, millele kiud orienteeritult sadestuvad (joonis 4.2).



Joonis 4.2. Niitkristallide orienteerimine galvaanilises vannis:

- 1 – elektrood, 2 – paak kiudude suspensiooniga, 3 – metallfoolium,
- 4 – kiudude asetuse fooliumil, 5 – pingutusseade

Kiudude ühendamine maatriksiga peab arvestama kiudude orientatsiooni muutumist ja mehaanilisi vigastusi jõu mõjul. Seepärast pulbermetallurgia meetod – komponentide mehaaniline segamine, pressimine ja järgnev paagutamine – ei anna häid tulemusi. Parimaks peetakse orienteeritud kiududega riide või vildi immutamist sulametalliga. See ei põhjusta kiudude mehaanilist vigastamist ja tagab poorideta KM struktuuri. Häid tulemusi saadakse kergsulavate metallidega nagu Al, Cu, Ag immutamisel. Rasksulavate metallidega immutamine kutsub esile kiudude lahustumise. Märgumise parandamiseks sulametallidega metalliseeritakse eelnevalt mulliidist ja teised mittemetalsed kiud.

4.1.2. Kiududega armeeritud MMKM valmistamine

MMKM armeerimine lühikeste väikese läbimõõduga kiududega ei erine MMKM armeerimisest niitkristallidega. Kiudude läbimõõdu ja pikkuse suurenedes tõuseb armatuuri tehnoloogilise komposiidi vormimisel ja maatriksiga ühendamisel. Seejuures jääb ära mitu operatsiooni, nagu kiudude sorteerimine, klassifitseerimine, orienteerimine ja pindamine. Seepärast on kiududega armeeritud MMKM valmistamine palju lihtsam kui niitkristallidega MMKM valmistamine.

Kiudude ja maatriksi pinnad on reeglina kaetud oksiidikihtidega, kõrvaliste lisanditega, tehnoloogiliste määretega, mis kõik vähendavad maatriksi ja armatuuri vahelist tugevust. Seepärast esimeseks operatsiooniks MMKM valmistamisel on pindade puhastamine, milleks kasutatakse erinevaid meetodeid.

Peamiselt kasutatakse mehaaniliste lisandite (mustuse) eemaldamist. Selleks kasutatakse vannis loputamist, vee- või aurujoaga töötlemist ja kombineeritud meetodeid, kus samaaegselt kasutatakse nii mehaanilist kui ka ultraheliga töötlemist. Puhastamiseks kasutatakse mitmesuguseid nii pesemisvahendite, nagu leeliseline sooda, kui ka mineraalhapete ja leeliste vesilahuste. Määrdeainete jääkide eemaldamiseks kasutatakse mitmesuguseid orgaanilisi lahusteid (atsetoon, piiritus jt). Viimaste eelised on kiire aurustuvus ja see, et nad ei põhjusta metallides korrosiooni.

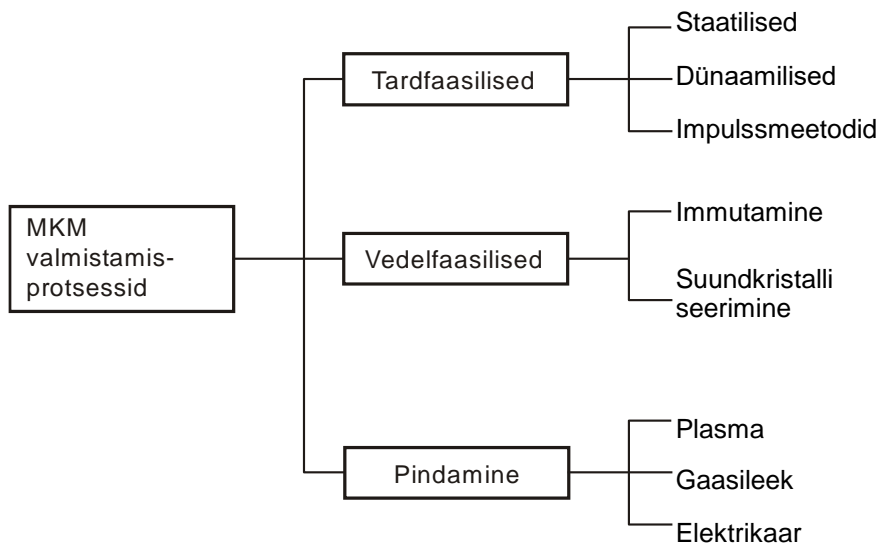
Titaanisulamite puhastamiseks on eriti tõhus leeliselise sooda lahus. Alumiiniumi, vaske ja terast puhastatakse silikaatlahuses, mis hüdrolüüsil moodustab ränihappe. Kuna viimane on kolloidses olekus, siis mustus, mis metallilt maha pestakse, läheb lahusesse ja ei sadestu enam puhastatavale pinnale. Neutraalsed pesemisvahendid sünteetiliste seebivesilahuste kujul pesevad maha rasvad.

Tagi eraldamiseks kiudude pinnalt kasutatakse keemilist või elektrokeemilist puhastamist hapete või leeliste lahuste vannis. Sool-, väävel- ja fosforhappe lahuseid kasutatakse pindade

söövitamiseks. Lämmastikhappe lahust kasutatakse passiveerimiseks, et saada tihedat oksiidikilet.

Kõige intensiivsem ja universaalsem on ultraheliga puhastamine, mis seisneb akustilise kavitatsiooni tekitamises sagedusega 20...40 KHz. Seejuures tekivad vedelikus mullid, mis materjali pinnal lõhkevad, tekitades löögiimpulsi, mis purustab mustusekihi. Parema tulemuse saavutamiseks lisatakse vedelikule puhastusvahendeid. Näiteks lisatakse volframtraadi puhastamiseks grafiitmäärdest 10%-list sööbenaatriumi lahust, mis on kuumutatud 80...85 °C-ni. Ultraheliga töötlemine eemaldab mitte ainult mehaanilise mustuse ja ärastab rasvad, vaid eemaldab ka tihedad oksiidikihid.

Konstruksioonimaterjalina kasutatava MMKM valmistamiseks on kõige laiemat kasutamist leidnud protsessid, mis on toodud joonisel 4.3. Nagu joonisest nähtub, võib maatriksmaterjal valmistamise käigus olla tahkes, vedelas või pihustatud (aurustunud) olekus. Valmistamisviis sõltub armatuuri liigist ja omadustest ning tema koosmõjust armatuuriga. Tavaliselt tuleb hoiduda armatuuri mehaanilistest vigastustest ja tähtis on tema hea adhesioon maatriksiga. Samuti ei tohi armatuur lahustuda maatriksis või valmistamise käigus oluliselt muuta oma omadusi. Peale selle tuleb tootmises eristada lõpptootest pooltoodet (prepreg), milleks võivad olla immutatud nõör, kiud või riie.



Joonis 4.3. Metallmaatriksiga komposiitide valmistusprotsesside liigitus

Tardfaasilised protsessid, mis põhinevad pulbermetallurgia meetodi kasutamisel, pole tehnoloogiliselt keerulised ja on piiratud diskreetse ja pulbrilise armatuuri kasutamisega.

Kaitsvate pinnete pealekandmine leiab laialdast kasutamist MMKM valmistamisel. Meetod võimaldab kihiliselt muuta materjali koostist ja järelkult ka MMKM omadusi. Seejuures tuleb arvestada materjali võimalikku liigset kuumenemist gaasi- või plasmajoas.

Kasutamist on leidnud MMKM saamise meetodid, kus maatriksmaterjal on **vedelas olekus**. Need on mitmesugused immutamise viisid, aga samuti suunatud kristalliseerimine. Järgnevalt on toodud lühike ülevaade MMKM saamise peamistest meetoditest.

Tardfaasilised protsessid

MMKM valmistamise aluseks on tardfaasilised protsessid, mis põhinevad mitmesugustel pulbermetallurgia tehnoloogilistel variantidel: külm- ja kuumpressimine, hüdrostaatiline ja dünaamiline pressimine, ekstrudeerimine, valtsimine jt.

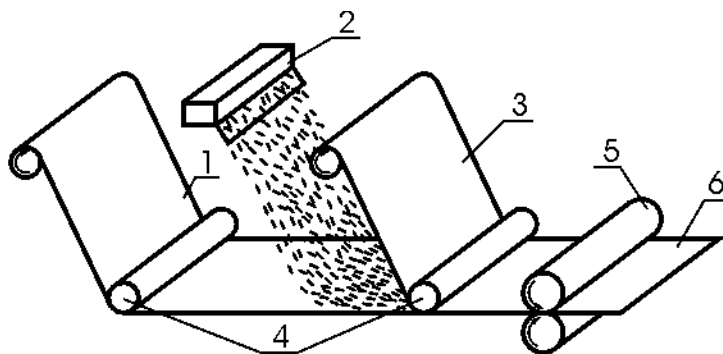
Kuna pulbermetallurgia tehnoloogilised protsessid on toodud erikursuses, siis siinkohal tuuakse ainult neid iseärasusi, mis on kasutatavad kiudstruktuuriga MMKM saamisel.

Kõik pulbermetallurgia tehnoloogilised variandid koosnevad kolmest põhioperatsioonist: komponentide segamine, vormimine (pressimine) ja järgnev paagutamine, mis toimub tardfaasis s.o temperatuuril, kus põhikomponent on tahkes olekus.

Komponentide mehaanilise segamisega valmistatakse segu, mis sisaldab diskreetseid osakesi (armatuuri). Segamiseks kasutatakse mitmesuguseid segisteid (koonus-, trummel- jt segistid), mis tagavad armatuuri ühtlase jagunemise maatriksis. Kuulveskeid kasutatakse laialdaselt kõvasulampulbrite märgjahvatamiseks. Kuiva segamise korral (isegi lühikeste kiudude korral) ühtlast komponentide segamist ei toimu. Järgneval pressimisel toimub pulbrisegu tähelepanuväärne elastne deformatsioon, mis viib pressise purunemisele pärast koormuse alt vabanemist.

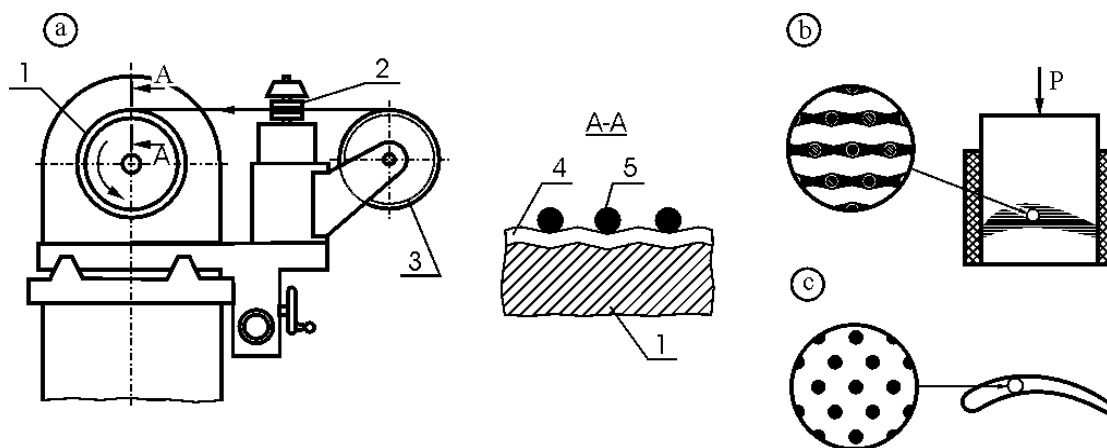
Paremaid tulemusi annab plastifitseeritud pulbrisegu **ekstrudeerimine**. Sel juhul plastifitseeritud pulbrisegu koos kiududega surutakse läbi filjeeri. Plastifikaatoritena kasutatakse bakeliidi-, parafiini- jt lahuseid. Plastifikaator seob ekstrudeeritavad osakesed ja loob soodsad tingimused pulbrisegu voolamiseks läbi filjeeri. **Kuumekstrudeerimisel** ettekuumutatud pulbrisegu või pulbertoorik, mis sisaldab armatuuri, surutakse läbi mitmesuguse kujuga filjeeri. See meetod võimaldab saada ühtlase tihedusega pikki torusid, vardaid, nurk- jt profiile raskesti pressitavaist pulbreist, nt valmistatakse niimoodi SAP-tüüpi materjali [1].

Kõige suurema tootlikkusega on armeeritud lindi ja lehe valmistamine **valtsimise teel** (joonis 4.4). Selle tehnoloogia järgi tihendatakse valtside (5) vahel maatrikspulber ja pidevkiudarmatuur või armatuurilint (1) ja (3), mille vahel on diskreetseid kiud (2). Valtsimise käigus deformeeruvad plastne maatriks ja tugev ning kõva armatuur (kiud) erinevalt. Kiud surutakse pehmemasse maatriksisse, aga protsess võib toimuda ka kiude plastselt deformeerimata. Kiudude ja maatriksi koosdeformeerimisel täidab plastne maatriks kiududevahelise ruumi, kus võivad olla defektid. Tavaliselt viiakse valtsimine läbi temperatuuril, mis on madalam kiudude rekristsallisatsioonitemperatuurist (säilib tõmbamisel tekkiv kaldestus). Kuna roostevaba terasest traadi tugevuse langus toimub alates 400 °C, siis alumiinium-teras KM valtsimine viiakse läbi 380...400 °C juures. Peale temperatuuri mõjutab valtsitud KM omadusi ka kiudude suund (risti- või pikisuunas). Lubatav pikideformatsioon on määratud kiudude purunemisega, aga ristisuunas nende kõverdumisega. Mõlemal juhul KM kaotab oma tugevust.



Joonis 4.4. Diskreetsete kiududega komposiidi valtsimisprotsessi skeem: 1, 3 – metallfoolium, 2 – diskreetsetega kiudude punker, 4 – pingutusrullid, 5 – valtsimisrullid, 6 – armeeritud leht

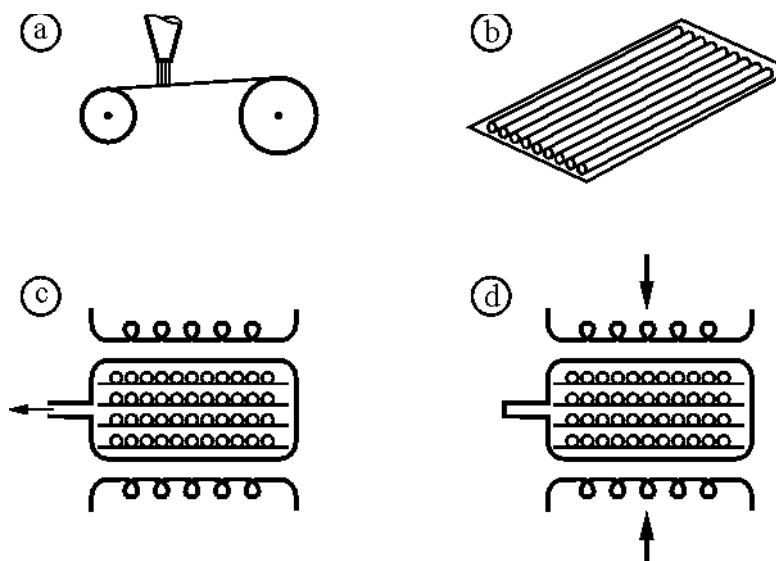
Valtsimist kasutatakse sageli lehtpooltoodete saamiseks, millest edaspidi valmistatakse tavalise pressimise teel sändvitš-tüüpi tooteid. Üks selliseid variante on toodud joonisel 4.5. Silindrilisi torusid saadakse eriseadme abil pidevate kiudude alumiiniumlehele kerimisega. Pealekeritud armatuur fikseeritakse lehtedele liimi abil plasmapiindamisega. Pärast seda lõigatakse silinder läbi mööda moodustajat ja saadud toorik tihendatakse valtsimise või pressimise teel. See võimaldab armatuuri orienteerida üksteise suhtes erinevate nurkade all. Monokihtide koostamisega saadakse jäiga armatuuriga MMKM, nt Al-B-, Ti-SiC-, Mg-B-, Ti-B-materjalid.



Joonis 4.5. Al-B-kiudarmeeritud turbiinilaba valmistamise skeem: tooriku saamine (a), tooriku pressimine (b), valmistoode (c), 1 – trummel, 2 – pingutusseade, 3 – boorkiu viht, 4 – alumiiniumleht, 5 – boorkiud

MMKM saamiseks, mis on armeeritud habraste jäikade kiududega, kasutatakse kõige enam **difusioonkeevitust**. Difusioonkeevitus on üks keevitamise viise, mis seisneb kokkusurutud detailide hoidmises mõõdukal surve ja temperatuuril, mis tagab difusiooniprotsesside läbiviimise. Difusioonkeevituse skeem on toodud joonisel 4.6. Sändvitš-tüüpi materjali saamine kujutab endast polümeersideaine pealekandmist kiududele (joonis 4.6a), toorikute vormimist (joonis 4.6b), sideaine eemaldamist vaakumis eelpaagutuse käigus (joonis 4.6c) ja paketi kuumpressimist (joonis 4.6d). Kõige sagedamini viiakse keevitamine läbi vaakumis, mis takistab kuumutamisel oksiidikilede teket, kuid ka kaitsvate gaaside keskkonnas (vesinik,

argoon jt). Põhilised tehnoloogilised parameetrid on: vaakumi sügavus, kuumutustemperatuur, surve ja aeg. Vaakumi sügavus tööstusseadmetel on difusioonkeevitamisel tavaliselt $1,3 \cdot 10^{-2}$ Pa – $1,3 \cdot 10^{-4}$ Pa ($10^{-4} \dots 10^{-6}$ mm Hg). Madala vaakumi korral on oht metallide oksüdeerumisele, sügava vaakumi saamine vähendab aga tootlikkust.



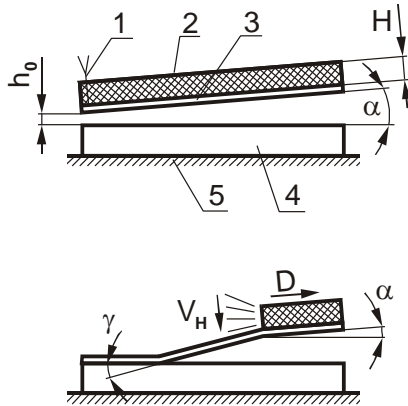
Joonis 4.6. Difusioonkeevitusprotsessi skeem: armatuuri ettevalmistamine (a), lehttoorikute montaaž (b), sideaine väljapõletamine (c), keevitamine (d)

Difusioonkeevitamise temperatuur on alati kõrgem materjali rekrustallisatsioonitemperatuurist, mistõttu kiirenevad ka roomavusprotsessid. Puhaste metallide rekrustallisatsiooni- ja roomavustemperatuur on vastavalt 0,4 ja 0,5 sulamistemperatuurist, kuid sulamisel on see kõrgem. Surve difusioonkeevitamisel valitakse sõltuvalt maatriksi ja kiudude plastsetest omadustest. Ta peab olema selline, et garanteerida tihe kontakt MMKM komponentide vahel ja samal ajal vältida hapra armatuuri purunemist. Näiteks valmistatakse reaktiivmootori booralumiiniumist turbiinilabad, mis on näidatud joonisel 4.5, temperatuuridel $580 \dots 600$ °C, rõhul $30 \dots 35$ MPa ($3 \dots 3,5$ g/mm²), kestusega 1...2 min. Kui kasutada kõrgema sulamistemperatuuriga maatriksit kui alumiinium, nt titaani, pikendatakse kestust 30 minutini ja enam.

Vaatamata lühiajalisele temperatuuri mõjule toimub difusioonkeevitusel siiski ebasoovitav koosmõju MMKM komponentide vahel, mille tulemusena armatuur nõrgeneb. Selles seisneb tihendamise põhiidee, kus kuumutusaeg piirduks mõne sekundiga – see on leidnud kasutamist **dünaamilisel kuumpressimisel (DKP)**. Erinevalt difusioonkeevitusest tihendatakse DKP puhul sändvits-tüüpi toorikud löögienergiat kasutades. Toorikud kuumutatakse kiiresti (tavaliselt mitte kauem kui 10...15 min), seejärel asetatakse toorik sepahaamri alla ja tihendatakse langeva haamri löögiga. Seejuures MMKM komponendid keevituvad sekundi murdosa vältel kokku. Hapra kiudarmatuuri korral see meetod ei kõlba, kuid plastse metallarmatuuri puhul annab ta paremaid tulemusi kui difusioonkeevitus. Sageli asetatakse toorikud komponentide oksüdeerimise vältimiseks kuumutamisel hermeetilisse metallkonteinerisse, mis eelnevalt vaakumeeritakse. Pärast komposiidi tihendamist konteineri ümbris eemaldatakse.

Impulssmeetoditest MMKM saamisel on leidnud kasutamist ka **plahvatuskeevitamine**. Meetod on eriti tõhus pooltoodete (leht, toru) valmistamiseks, aga ka valmisdetailide saamiseks. Meetod ei nõua eelnevat kuumutamist, mis välistab armatuuri pehmenemise. Lööklaine mõju erinevus on selles, et ta võimaldab saada maksimaalset karestumist ilma plastse deformatsioonita.

Üks plahvatuskeevituse skeem on toodud joonisel 4.7. Jäigale alusele (5) (massiivne terasplaat, betoon) asetatakse detail (4), milleks võib olla sandvitš-tüüpi MMKM. Nurga α all asetatakse teatud kaugusele h_0 löökplaat (3), millele omakorda asetatakse lõhkelaeng (2) paksusega H . Nurga ülemisse ossa paigutatakse detonaator. Kuna lõhkeaine puutub vahetult kokku löökplaadiga (mõnikord ka läbi pehmenitava tihendi), siis kõrgenergeetiline impulss, mis tekib lõhkeaine plahvatamisel, ei haju, vaid toimib keevitustsoonis kontsentreeritult.



Joonis 4.7. MMKM saamine plahvatuse meetodil:

1 – detonaator; 2 – lõhkelaeng, 3 – löökplaat, 4 – toorik, 5 – tugi

Plahvatuseks nimetatakse lõhkeaine lagunemist gaaside ja soojuse eraldumisega, ja lööklaine levib kiirusega mitu tuhat meetrit sekundis, ületades heli levimise kiiruse materjalis. Detonatsioon levib punktist (1) igas suunas kiirusega D ja sõltub lõhkeaine omadustest, tema tihedusest ja lõhkeaine kihi paksusest. Gaaside tugev surve annab surveplaadile kiiruse v_H , mis küünib kuni 1000 m/s. Löökpilaadi (3) ja alusplaadi (4) vahele moodustub nurk γ , mis määratakse kiiruste v_H ja D suhtega. Löökpilaadis ja toorikus toimuvad märkimisväärsed plastsed deformatsioonid, mis kutsuvad pinnakihis omakorda esile kohaliku adiabaatse soojusvahetuse ümbritseva keskkonna kuumenemise. Tänu kuumenemisele ja plastsele deformatsioonile keevituvad puhastatud pinnad kokku.

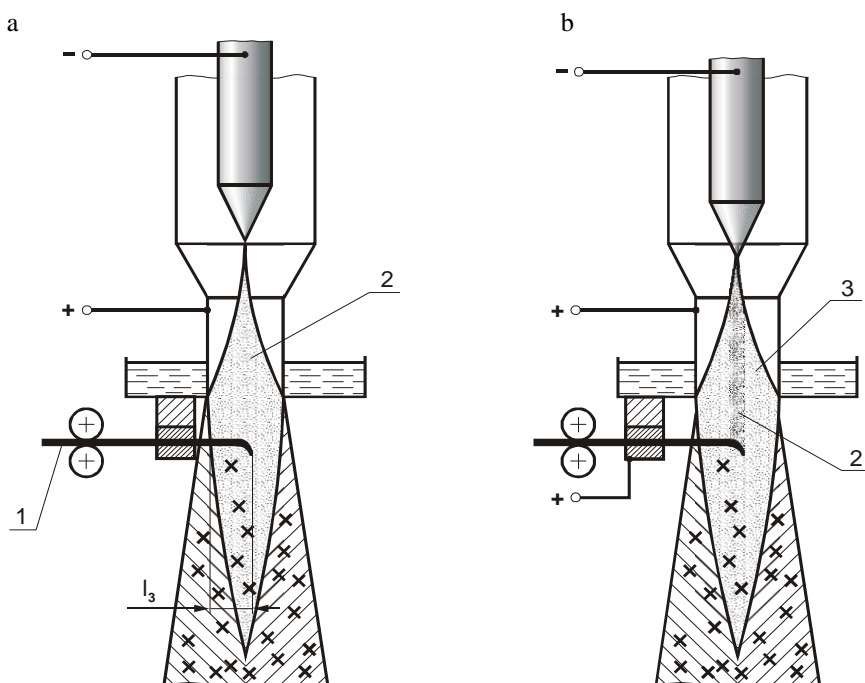
Plahvatuskeevituse parameetrid – detonatsioonikiirus D , löögikiirus v_H ja kohtamisnurk γ valitakse nii, et saada tugev liide matriksi ja armatuuri vahel, teisalt aga vältida MMKM kahjustumist lööklaine poolt. Peale tasapindsete toorikute saab plahvatusega vormida ka õõnessilindreid ja vardaid. Selleks on vaja muuta tooriku kuju ja plahvatuse viisi.

Pinnete pealekandmise viisid

Viimastel aastatel on välja töötatud pindamise teoreetilised alused ja mitmesugused kõrgetootlikud seadmed pinnete pealekandmiseks erineva koostisega komposiitmaterjalide (metall-, süsinik-, keraamilise ja plastmatriksiga) valmistamiseks. Pindamismeetodite ühine tunnus on aluse (mudeli) olemasolu, millele kantakse matriksmetalli ja armatuuri kihid. Peale pindamist eraldatakse alus ja saadakse armeeritud materjal, mis kopeerib alust. Pinnete pealekandmise viise on mitmeid.

Plasmapindamine seisneb materjali pealekandmises plasmajoaga, mille temperatuur on kuni 15 000 °C, kusjuures pealekantav materjal sulab, ioniseerub ja suunatakse aluse pinnale. Osakesed, liikudes suure kiirusega (kuni 150 m/s), põrkuvad vastu alust, liituvad alusega ja moodustavad omavahel pinde. Plasmapõleti skeem on toodud joonisel 4.8. Plasma moodustajateks on mitmesugused gaasid (argoon, lämmastik, harvem õhk) ja nende segud. Gaasi kuumutamise allikas plasmatronis on plasmakaar, mis tekib veega jahutatavate

elektroodide vahel. Vabalt põleva plasmakaare temperatuur on ligikaudu 5700 °C, kuid gaasi pealeandmisel surutakse kaar kokku ja tema temperatuur tõuseb 15 000 °C-ni. Selle tulemusena kasvab gaasi ionisatsiooni aste, mis omakorda tõstab pihustatava materjali temperatuuri. Seepärast sulatab plasma mitte ainult metalli (joonis 4.8a), vaid ka rasksulavad mittemetalsed ühendid (joonis 4.8b). Plasmapihustamise protsess on kergesti mehhaniseeritav ja automatiseeritav ning võimaldab peale kanda erineva koostisega pindeid alates polümeersestest ja lõpetades rasksulavate ühenditega. Pinne võib koostiselt olla ühe- või mitmekihiline. Protsessi põhiline puudus on suur energiakulu ja kõrge müratase (kuni 100 Db).



Joonis 4.8. Plasmapihustamise skeem: elektrit mitte juhtiva materjaliga (a), elektrit juhtiva materjaliga (b),
1 – etteande mehhanism, 2 – plasmakaar, 3 – abikaar

Elektrolüütsadestamine on kasutusel kerge diskreetsete kiudude korral, mida saab hoida elektrolüütsuspensioonis hõljuvas olekus. Katoodil sadestub maatriksmetall koos kaootiliselt jaotatud armatuuri kiududega. Protsess toimub madalal temperatuuril ja survet kasutamata, mis vähendab ebasoovitavaid temperatuuriefekte ja kiudude purunemise.

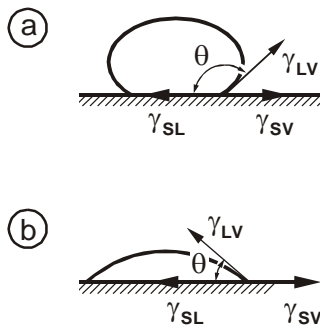
MMKM saamise vedelfaasilised meetodid

Põhitegur, mis määrab MMKM vedelfaasilise saamise võimalused, on sulametalli märgumine armatuuri kiududega. Üldjuhul eristame 3 varianti:

- 1) sulametall märgab armatuuri ja ei lahustu viimases;
- 2) sulametall märgab armatuuri ja lahustub piiratud armatuuris;
- 3) sulametalli ja armatuuri vahel puudub märgumine, ja komponendid ei lahustu teineteises.

Kõige paremad tulemused immutamisel annab esimene variant. MMKM näitena, kus komponendid praktiliselt teineteises ei lahustu, aga märgumisnurk on väike, on volfram- või molübdeenkiududega armeeritud vase või hõbeda baasil MMKM. Hea märgumise näide on enamik paagutatud kõvasulameid, eelkõige WC-Co kõvasulamid, mille paagutamisel tekib koobalti vedelfaas.

Märgumist uuritakse “lamava” tilga meetodil. Armatuuri materjalile asetatakse sula maatriksmetalli tilk (joonis 4.9). Kui märgumisnurk on alla 90° , siis sulametall märgab armatuuri. Väga hea märgumise korral ($\theta = 0^\circ$) jookseb sulametall armatuuril laiali. Maatriksi võimet märjata armatuuri hinnatakse pinnaenergia väärtusega piiril tahke faas – sulafaas (γ_{SL}), sulafaas – aurufaas (γ_{LV}) ja tahke faas – aurufaas (γ_{SV}). Kui $\gamma_{SL} > \gamma_{SV} + \gamma_{LV} \cos \theta$, siis immutamise tingimused ei soosi märgumist (joonis 4.9a). Selleks, et sulametall märgaks täielikult armatuuri, peab laialivalgumise tegur S olema positiivne: $S = \gamma_{SV} - (\gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta) > 0$ (joonis 4.9b).



Joonis 4.9. Armatuuri märgamine vedela maatriksi poolt: mittemärgumine (a), märgumine (b)

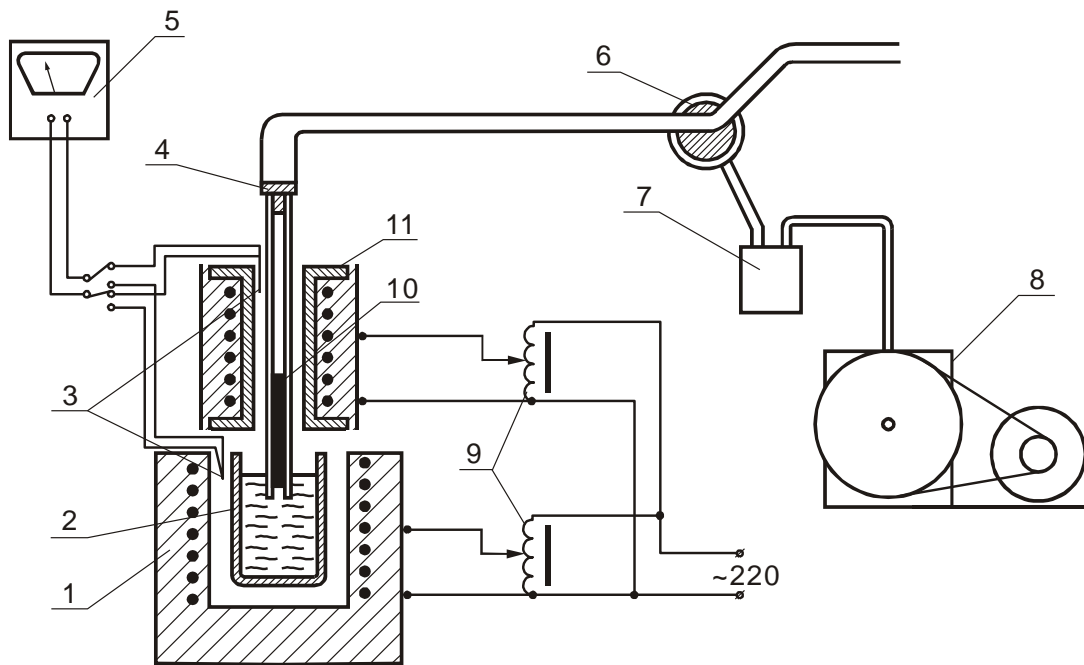
Komponentidevaheline keemiline reaktsioon teeb immutamistingimused keeruliseks nii märgumise kui ka mittemärgumise korral.

On kaks meetodit märgumise parandamiseks:

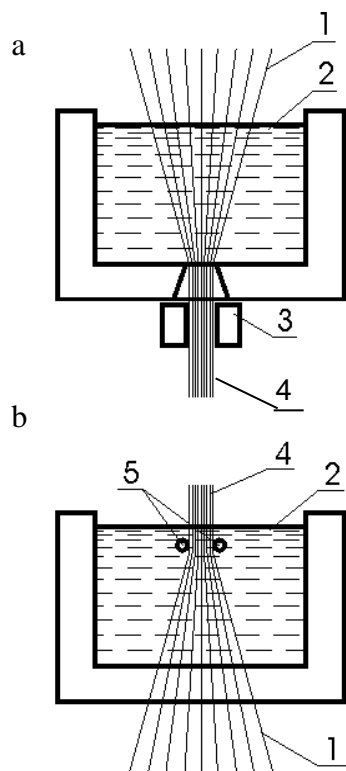
- suurendada pinnaenergiat γ_{SV} kiudude pindamise teel;
- vähendada pinnaenergiat γ_{SL} , lisades sulamile pindpinevaid aineid, mis faasipiiril kiudmaatriks kogunedes vähendavad faasidevahelise piiri energiat.

Esimese viisi näiteks on alumiinium- või magneesiummaatriksi puhul süsinikkiududele nikkelkihi pealekandmine. Teise viisi näiteks on polükristalsete alumiiniumoksiidist kiududega immutamisel nikkemaatriksile vähesse koguse titaani lisamine.

Suurem osa MMKM kujutavad endast süsteeme, mis vedelfaaspaagutamisega on raskesti realiseeritavad, kuna sulamaatriks ja armatuur reageerivad omavahel. Selliseid komposiite on lihtsam saada tardfaasiliste meetoditega. Immutamise kasutamine aga on õigustatud ainult keeruka kujuga detailide saamisel. Selleks kasutatakse erinevaid viise – vaakumvalu, tsentrifugaalvalu, survevalu. Joonistel 4.10 ja 4.11 on toodud MMKM saamise erinevad skeemid, milliseid kasutatakse kuumuskindlate nikli- ja koobaltisulamite korral.



Joonis 4.10. Vardakujulise MMKM saamine vaakumimmutamise teel:
 1 – šahtahi, 2 – sulametalliga tiigel, 3 – termopaarid, 4 – poorne püünis,
 5 – galvanomeeter, 6 – kolmekäiguline kraan, 7 – mahuti, 8 – eelvaakumpump,
 9 – autotransformaator, 10 – kiududega toru, 11 – toruahi

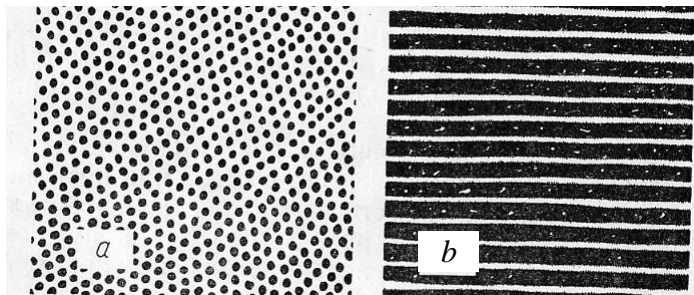


Joonis 4.11. MMKM saamine pidevvalu meetodil (a) ja väljatõmbemeetodil (b):
 1 – kiud, 2 – vedelmetall, 3 – kristallisaator, 4 – komposiitmaterjal, 5 – filjeer

Armeeritud toorikute ja profiilide saamiseks kasutatakse ka **vaakumimmutamist** (joonis 4.10). Selle tehnoloogia järgi asetatakse volfram- ja molübdeentraadid või -kiud kuumuskindlast terasest torusse (10). Toru üks ots joodetakse õhukese membraaniga kinni, teine ots aga ühendatakse poorsest materjalist korgi (4) ja mahuti (7) kaudu vaakumpumbaga (8). Pärast vaakumeerimist lastakse toru joodetud ots sula maatriksmaterjaliga täidetud tiiglisse (2), membraan sulab ja sulametall tiiglist täidab toru. Antud meetodi korral saab kiudude kogust laias vahemikus reguleerida (kuni 60 %).

Pidevvalu meetodil on võimalik saada pikki (kuni 1 m) ja mitmesuguse keerulise kujuga profiile (nurgikud, I-talad, torud). Seda meetodit kasutatakse boorkiududega armeeritud magneesiumsulameist toodete saamiseks. Meetodit kasutatakse ka teiste MMKM saamiseks, kus armatuur ja maatriks vastastikku ei reageeri. Selleks kasutatakse kahte varianti (joonis 4.11) pidevvalu meetodit (joonis 4.11a), kus kiud (1) läbivad pidevalt sulametalli vanni (2) ja kogutakse kristallisaatorisse (3) või väljatõmbemeetodit, kus kiud tõmmatakse läbi filjeeri (5) (joonis 4.11b). Toorik (4) formeerub kristallisaatorist või tõmbesilmast läbi tõmmates, kiirusega, mis on küllaldane maatriksmaterjali jahtumiseks.

Üks vedelfaasilise MMKM saamise meetod on **eutektsulami suunatud kristalliseerimine**. Meetod seisneb toorikute saamises, kus tänu aeglasele suunatud temperatuurigradiendile kasvavad piki toorikut välja paralleelsed nõel- või plaadikujulised kristallid, mis jaotuvad ühtlaselt kogu materjali ulatuses. Sellisel armeerival faasil on väga head mehaanilised omadused, ta on hästi seotud maatriksiga ja seepärast on saadaval eutektsel MMKM väga head omadused. Tüüpilised eutektstruktuuriga MMKM on toodud joonisel 4.12.



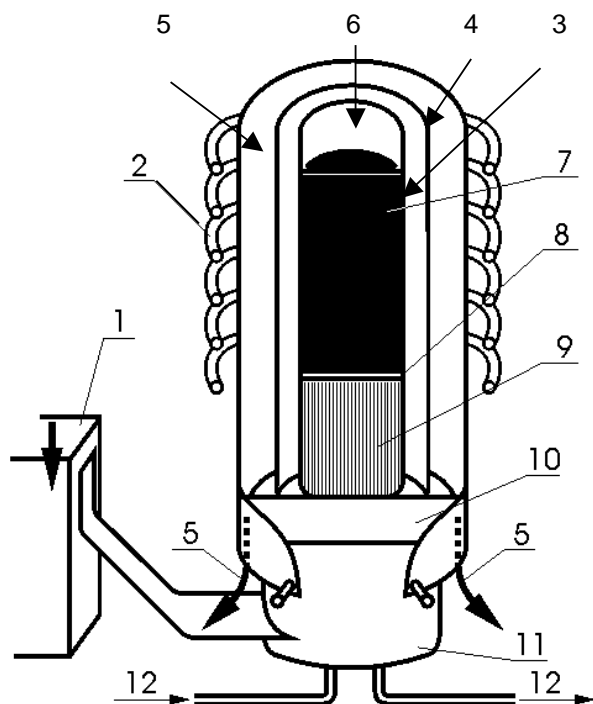
Joonis 4.12. Eutektsete MMKM mikrostruktuur:

- a – kiuline Al-Al₃Ni eutektikum (ristlõige),
- b – plaadikujuline Al-CuAl₂ eutektikum (pikilõige)

Geomeetriliselt korrapärased struktuurid moodustuvad eutektse koostisega vedelfaasist suunatud kristallisatsioonil konstantsel temperatuuril, mis tagab kristallide kasvu vajalikus suunas. Suunatud kristalliseerumise tingimus on kontrollitud temperatuurigradient vedelfaasi ja tardunud osade vahel, kusjuures see piir (kristallisatsioonifront) peab olema selge ja küllaltki kitsas. Joonisel 4.13 on toodud see protsess. Tiigel (3) eutektsulamiga (7) algul kuumutatakse induktori abil kuni sulamiseni ja seejärel hakatakse tarduvat valandit (9) tõmbama kuumutussoonist välja konstantse kiirusega. Sulam tardub järk-järgult ja kristallisatsioonifront nihkub ülespoole.

Kristallisatsioonikiirus sõltub soojusvahetusest, mida reguleeritakse seadme materjali ja detaili kuju valikuga ning tiigli (3) alumise osa jahutamise veega läbi ploki (11) ja aluse (10). Sellise meetodiga saadakse Al-Al₃Ni-komposiit, kus Al₃Ni sisaldus on 11 mahuprotsenti. Tavalisel valumeetodil saadud sulam ei ole tugev ($R_m = 90 \dots 100 \text{ N/mm}^2$), suunatud kristallisatsioonil kiirusega 2...10 cm/h orienteerub armeeritud faas ühes suunas (joonis

4.12a), mille tulemusena sulam tugevneb kuni 330 N/mm^2 -ni. Seejuures ulatub maatriksist soolhappes söövitamise teel eraldatud kiudude tugevus kuni 2800 N/mm^2 . Al-Al₃Ni-eutektsulami põhiline eelis on kõrge kuumus- ja väsimustugevus. Peale 100-tunnist seisutust 620 °C juures ei erine tugevus lähtetugevusest, väsimuspiir aga on 4...5 korda kõrgem kui maatriksil.



Joonis 4.13. Eutektse MMKM suunatud kristallisatsiooniseadme skeem: 1 – liikuv tugi, 2 – liikumata induktor, 3 – tiigel, 4 – klaaskorpus, 5 – inertgaas, 6 – keraamiline ümbris, 7 – sulam, 8 – kristallisatsioonifront, 9 – valand, 10 – alus, 11 – jahutussärk, 12 – vesi

Teine tuntud komposiitmaterjal, mida on võrdlemisi kerge saada suunatud kristallisatsiooniga, on Al-Cu KM, kus ühtlaselt jaotunud CuAl₂ plaatide kogus on 50 mahuprotsenti (joonis 4.12b).

Tervikuna suunatud kristallisatsiooniga võib saada kuumustugevaid või anisotroopsete füüsikaliste omadustega (nt elektri- ja soojusjuhtivus) KM. Näiteks on InSb-Sb-komposiidi elektrijuhtivus pikikiudu 10 korda suurem kui ristsuunas. Sellisest KM plaadi elektritakistus muutub pöörlemisel magnetväljas suurusjärgust enam, mis võimaldab seda kasutada vahelduva resistorina, mis ei kannata kulumise ja sädelemise all.

4.1.3. Kiudude ja maatriksi omavaheline side

MMKM saamine on tihedalt seotud kõrgetemperatuurse koosmõjuga. Eristatakse kahte liiki koosmõjusid:

- reaktsioone komposiidi valmistamisel,
- reaktsioone, mis võivad tekkida komposiidis tööolukorras.

Esimest tüüpi reaktsioonid on seotud MMKM valmistamisviisiga. Seda saab õige tehnoloogilise skeemi ja tehnoloogiliste režiimide valikuga viia miinimumini. Palju intensiivsem koosmõju toimub vedelfaasiliste saamismeetodite korral. Positiivselt mõjub ka protsessi madalam temperatuur ja kestus (nt sundimmutamise kasutamine kapillaarimmutamise asemel).

Teist tüüpi reaktsioonid on seotud armatuuri ja maatriksi olemusega. Nende kiirust saab vähendada maatriksi ratsionaalse legerimise ja barjääride tekitamisega kiududel.

Nende MMKM arv, milles puudub täielikult vastastikune lahustuvus maatriksi ja armatuuri vahel, s.o termodünaamiline sobimatus, on piiratud. Praktelist huvi neist MMKM-st pakuvad vase ja hõbeda baasil pseudosulamid, mida kasutatakse elektrikontaktmaterjalidena: Cu-W-, Ag-W-, Mg-Ti-, Mg-B- jt sulamid. Kuid paljud metallid ja nende sulamid reageerivad armeerivate kiududega, mistõttu kiud muutuvad hapraks ja nõrgaks. Seetõttu on MMKM saamise tahkefaasilised meetodid sageli eelistatavad, võrreldes vedelfaasilistega.

Põhilised tegurid, millest sõltub vastastikune koosmõju, on difusioon (heterodifusioon) kiudude ja maatriksi vahel ning intermetalliidide teke faasidevahelisel piiril. Difusiooniteguri temperatuuriline sõltuvus väljendub valemiga:

$$D=D_0 \exp(-Q/RT) \quad (4.1)$$

kus D_0 – eksponendi kordaja, cm^2/s (konstant, mis sõltub metalli tüübist);

Q – aktivatsioonienergia, kJ/mol ;

R – gaasikonstant ($8,317 \times 10^3 \text{ J/kmol} \cdot \text{K}$);

T – absoluutne temperatuur, K .

Valemist selgub, et difusioonikiirus sõltub temperatuurist eksponentsiaalselt (s.o väga tugevalt). Valemis (4.1) toodud näitajate väärtused lubavad prognoosida difusiooni koosmõju astet konkreetsetes temperatuurilises-ajalistes töötingimustes. Väärtused, mis on tarvilikud valemis (4.1), on toodud kirjanduses [7, 28].

Difusioonikiirust faasidevahelisel piiril kiud-maatriks saab vähendada, kui lahustada nendes mingi kolmas komponent. Sellega väheneb nende keemiliste potentsiaalide vahe. Näiteks kasutatakse volframkiududega armeeritud nikli baasil KM-s puhta nikli asemel selle sulamit, mis sisaldab kuni 35% volframi; samamoodi kasutatakse poorse raua immutamisel vasega (tüüpiline pseudosulam) puhta vase asemel selle sulamit rauaga. Kui faasidevahelisel piiril moodustuvad haprad intermetalliidid, siis seda viisi kasutada ei saa. Sellisel juhul tuleb faasidevahelise stabiilsuse tõstmiseks kasutada kiududel difusiooni takistavaid barjäärpindeid. Pindmaterjal ei tohi töötemperatuuril laguneda ja lahustuda maatriksis või kius, olema vajaliku tugevus- ja sitkusvaruga ning ei muuda KM hapraks. Täielikult neid nõudmisi täita on raske, kuid siiski võimalik, kui valida niisugused pinded, mis vähendavad difusioonikiirust mitu suurusjärku, võrreldes vahetu kontaktiga. Näiteks on volfram- ja molübdeenkiud soovitatav katta mõne mikromeetri paksuse titaannitriidi (TiN) kihiga. Selleks kasutatakse eelkõige füüsikalist aurustussadestust (PVD).

Faasidevaheliste protsesside keerulisust ja tähtsust arvestades on välja töötatud arvutusmeetodeid, mis võimaldavad prognoosida legerimise ja muude tegurite mõju KM tööeale.

4.1.4. Dispersioontugevdatud sulamid

Dispersioontugevdamine/armeerimine (joonis 2.2c) on universaalne maatriksi armeerimise viis suurele rühmale materjalidele, milliseid nimetatakse *dispersioontugevdatud* (*dispersion strengthened*) komposiitideks. Meetod seisneb tugevdava faasi sisseviimises maatriksisse peente (disperssete) osakeste näol, mis takistavad dislokatsioonide liikumist maatriksis. Eriti tähtis on see meetod kuumustugevate sulamite saamisel. Materjalide vastupanu roomavusele tõuseb, kuna sellise struktuuriga sulamis on dislokatsioonide liikumine raskendatud.

Dispersioontugevnemine eeldab tardlahuse moodustumist, mehaanilist deformeerimist, dispersioonkõvenemist/tugevnemist disperssete osakestega vastavate sulamite saamiseks.

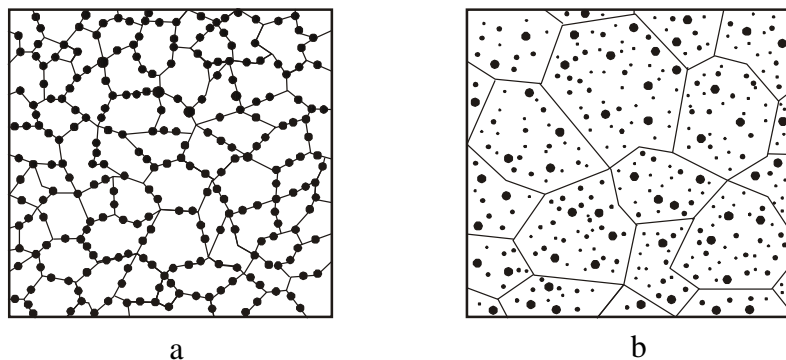
Laialdaselt kasutatakse dispersioonkõvendatud/tugevdatud sulameid, mis säilitavad tugevuse temperatuurini kuni $0,6 T_s$ (põhimetalli sulamistemperatuurist). Tugevnemine saavutatakse kunstliku vanandamise teel, s.o üleküllastunud tardlahustes disperssete osakeste moodustumise teel, mis blokeerivad dislokatsioonide liikumise. Vanandamise efekt saavu-

tatakse sulamites, kus ühe komponendi lahustuvus teises väheneb temperatuuri langemisel. See võimaldab eelneva karastamisega fikseerida maatriksmetallis üleküllastunud olek – tardlahuse struktuur, millega kaasneb tavaliselt tugevuse vähenemine ja plastsuse suurenemine, mis kergendab sulami survetöötlemist. Järgnev vanandamine põhjustab tugevuse ja kõvaduse ning kuumustugevuse kasvu. Selle sulamite rühma tüüpiline esindaja on duralumiinium. Sama vanandamismehhanism pole omane mitte ainult duralumiiniumile, vaid ka paljudele terastele (nt martensiitvanandavad terased) ja sulamitele (nikroomid), räni ja alumiiniumiga legeritud titaanisulamitele, aga samuti mõnedele oksiidkeraamika baasil komposiitidele (nt $MgO \cdot Fe_2O_3$). Vanandamise tugevdav efekt on üldiselt piiratud tardlahuste lagunemise termodünaamilise protsessiga. Tugevdava faasi mahuline kogus on suhteliselt väike (mõni protsent).

Dispersioontugevdatud sulamite tugevdamise mehhanism põhimõtteliselt ei erine dispersioontugevnevate sulamite tugevdamise mehhanismist – esimeste korral luuakse faasiline suhe tugevdava faasi sisseviimise teel materjali valmistamise käigus. Õige tugevdava faasi koguse valik võimaldab säilitada materjali töökindluse kuni $0,9T_s$.

Kiulistes komposiitides sõltub tugevus vahetult armeeritud kiudude tugevusest – nende KM tugevuse eest vastutavad kiud. Dispersioontugevdatud materjalides armatuuri (osakeste) tugevust ja kõvadust ei kasutata. Osakesed on vaid takistuseks dislokatsioonide liikumisele maatriksis, mistõttu viimase roomavuspiir suureneb.

Vaatamata sellele, et tugevuse tõstmine kiududega armeerimise teel on perspektiivsem, on dispersioontugevdamine vanandamise teel tehnoloogiliselt kergemini läbiviidav ja võimaldab saada rida uusi materjale, eelkõige kuumustugevaid metallmaatriksiga sulameid.



Joonis 4.14. Dispersioontugevnevate sulamite struktuur: karkass-struktuur (a), dispersne struktuur (b)

Dispersioontugevdatud sulamite loomise põhimõtted

Dispersioontugevdatud sulameiks nimetatakse KM, kus tehnoloogilise operatsiooni käigus viiakse maatriksisse ja jaotatakse ühtlaselt disperssed osakesed, mis ei reageeri ega lahustu selles kuni sulamistemperatuurini. Põhilised tegurid, mis määravad KM omadused, on armeeritava faasi inertsus, tema disperssus, kogus ja jagunemise ühtlus. Maatriks neis sulameis on koormust vastuvõttev (erinevalt armeerimisel kiududega), ja dispersne tugevdav faas loob dislokatsioonide liikumisele barjääre.

Tugevdava faasi valikul lähtutakse tema termodünaamilistest omadustest, difusiooni-protsessidest maatriksis, KM töötingimustest, faasi mahuline kogus määratakse tehnoloogiliste võimalustega jaotada see maatriksis ühtlaselt.

Dispersioontugevdatud sulamite struktuur võib olla kahte tüüpi: **karkass-** (joonis 4.14a) või **dispersne** (maatriks) (joonis 4.14b). Karkass-struktuuri puhul moodustab tugevdav faas karkassi nii, et iga osake on ümbritsetud mitme maatriksmaterjali teraga.

Dispersse (maatriks)struktuuri korral asetsevad osakesed ühesuguse orientatsiooniga maatriksmaterjali terade sees. Üht või teist tüüpi struktuuri teke sõltub sulami valmistamise viisist. Kõik tehnoloogilised operatsioonid dispersioontugevdatud sulamite saamisel peavad tagama tugevdava faasi osakeste ühtlase jaotuse maatriksis ja mitte lubama osakeste kasvu ja koaleerumist (kokkukasvamist) termotöötlemise käigus ja töös.

Tugevdava faasina kasutatakse kõrge sulamistemperatuuriga ($T_s > 1000$ °C), kõvu, suure eripinnaga ($S > 10$ m²/g), polümorfseid muutusi mitteomavaid, keemiliselt puhtaid, maatriksis mittelahustuvaid, kuid maatriksiga hästi märguavaid aineid. Esimene kriteerium, mille järgi hinnatakse ühe või teise rasksulava ühendi sobivust tugevdavaks faasiks, on tema moodustumise vabaenergia (entalpia). Nagu nähtub tabelist 4.2, ületab oksiidide entalpia suuresti teiste keemiliste ühendite (nitriidid, karbiidid) entalpiat.

Tabel 4.2

Mõningate ühendite entalpia ΔH

Ühend	ΔH , kkal/mol	Ühend	ΔH , kkal/mol	Ühend	ΔH , kkal/mol
CuAl ₂	9,5	AlN	76,5	SiO ₂	210,2
Ni ₃ Ti	33,4	HfN	88,2	CeO ₂	270,2
Ni ₃ Al	37,5	Be ₃ N ₂	134,7	ThO ₂	293,2
Cr ₃ C ₂	42,5			MgO	143,7
TiC	43,9			Al ₂ O ₃	400

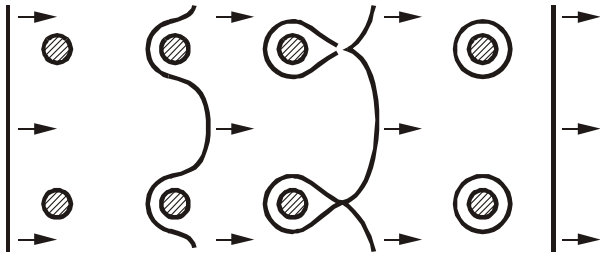
Et saavutada suurimat tugevdavat efekti, peab plastse maatriksi terade suurus olema vahemikus 0,1...1,0 µm ja tugevdaval faasil – 0,01...0,05 µm ning vahekaugus nende vahel 0,1...0,5 µm, s.o maatriksi terade suurus peab olema ligikaudu suurusjärgu suurem, kui tugevdavad osakesed. Tugevdava faasi mahuline kogus on tavaliselt 5...10%, samas on kuumustugevatel vanandavatel sulamitel see kuni 60%.

On mitmesuguseid teooriaid pulbri osakestega tugevdamise kohta. Kõige kasutatavam on inglise füüsiku E. Orovani mudel. Tema skeem on toodud joonisel 4.15, kus vaadeldakse dislokatsioonide liikumist pehmes ja sitkes maatriksis, mis sisaldab ümaraid tugevdava faasi osakesi. Kui tugevdava faasi osakeste vahekaugus on suur, siis nihkepingete tagajärjel dislokatsioonid osakeste vahel painduvad, tema lõigud sulguvad iga osakese taga, jättes sõlmed iga osakese ümber, ning seejärel liiguvad dislokatsioonid edasi. Uus dislokatsioon omakorda, minnes läbi osakeste vahelt, jätab sõlme iga osakese ümber, mille tulemusena kasvavad summaarne dislokatsiooni pikkus ja nende energia. Inertsete osakeste ümber tekib elastne pingeväli, mis raskendab maatriksis uute dislokatsioonide läbimineku, ja lõpptulemusena takistab roomeprotsessi.

Orovani teooria edasiarendus teiste teadlaste poolt viis järeldustele, et peente pulbri-osakestega tugevdatud materjalide voolavuspiir ja tugevus on pöördvõrdeline ruutjuurega osakestevahelise keskmise kaugusega:

$$R_p (R_m) = \text{const } L^{-1/2}, \quad (4.2)$$

kus L – osakeste keskmine vahekaugus.



Joonis 4.15. Dislokatsioonide liikumise skeem Orovani järgi

Pulbersegude saamine

Dispersioontugevdatud sulamite saamine toimub pulbermetallurgia klassikalise skeemi järgi, mis koosneb pulbrite saamisest, nende pressimisest ja paagutamisest. Tugevdava faasi ühtlane jagunemine materjalis esitab protsessile lisanõudeid. Tänapäeval on neist kasutusel:

- 1) metalli ja tugevdava faasi pulbrite mehaaniline segamine;
- 2) soolade termiline lagundamine;
- 3) pindoksüdeerimine;
- 4) siseoksüdeerimine;
- 5) lahuste keemiline sadestamine;
- 6) sulade komponentide segamine (metallurgiline meetod).

Mehaaniline segamine on kõige lihtsam, odavam ja tehnoloogiliselt vastuvõetavam viis pulbersegude valmistamiseks. Kui pulbrite tihedused on erinevad, siis mehaaniline segamine ei taga tugevdava faasi ühtlast jagunemist. Mehaaniliseks segamiseks kasutatakse mitmesuguse konstruktsiooniga segisteid. Pulbreid segatakse üldjuhul kuivalt ilma kaitsva keskkonnata. Väga aktiivsete pulbrite korral (nt titaan) täidetakse oksüdeerimise vältimiseks segisti inertse või kaitsva gaasiga. Kuulveskis toimub koos segamisega ka jahvatamine, protsess toimub märjas keskkonnas, mis tagab peenema jahvatuse ja komponentide ühtlasema jagunemise segus. Jahvatusvedelikena kasutatakse piiritust, atsetooni, destilleeritud vett jne. Mehaanilise segamise eriliik on metallifaasi lisamine soolalahuse kujul, mis segamise käigus kõveneb. Näiteks Ni+ThO₂ pulbersegu homogeense segu saamiseks segatakse nikli pulber tooriumnitraadi piirituslahusega.

Soolade termilist lagundamist kasutatakse pulbrisegude saamiseks, mis on kergesti taandatavad vesinikus. Selleks segatakse maatriksmetalli ja tugevdava faasi soolade lahused mehaaniliselt, kuivatatakse madalas vaakumis (0,1 Pa) ja kuumutatakse oksiidide saamiseks üheskoos, ning seejärel taandatakse vesinikus.

Pindoksüdeerimine on mugav KM saamise viis, kus tugevdavaks faasiks on sama metalli-oksiid. Selle tüüpiline esindaja on Al-Al₂O₃-sulam (SAP), mille saamiseks pihustatakse sulaalumiiniumi, saadud graanulid peenestatakse kuulveskis steariinhappe juuresolekul. Viimane on pindaktiivne lisand, mis tungib jahvatatavate osakeste mikropragudesse. Saadud Al-pulber (alumiiniumpuuder) sisaldab 5...20 % Al₂O₃ ja on tihedusega ca 1000 kg/m³.

Siseoksüdeerumist kasutatakse pulbersulamite saamiseks, kus üks faas oksüdeerub kõrgetel temperatuuridel kergemini kui teine. Hapnik difundeerub sulamisse ja oksüdeerib vähem korrosioonikindla komponendi, moodustades oksiidiosakesed korrosioonikindlamas maatriksis. Viimastena kasutatakse kõige sagedamini Ag, Cu, Ni või Fe. Meetod võimaldab saada väga ühtlase jaotusega tugevdava faasi, kuid ülipeente osakestega (alla 0,1..1,0 μm) legeeritud pulbrite saamiseks kasutatakse seda vähe.

Keemiline sadestamine lahustest põhineb mõningate metallide omadusel moodustada tugevdav faas, kui lahusesse viia taandatavate omadustega ühendeid. Näiteks saab sel viisil tooriumoksiidi ThO₂ (üks kõige inertsemad ühendeid, vt tabel 4.2), sadestades seda

vaskpindadele. Selleks viiakse hüdroksiini $\text{NH}_2 \cdot \text{NH}_2$ vaskatsetaadi $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ vesilahusesse, mis sisaldab ThO_2 pulbrit. Saadud pulber kujutab endast plakeeritud materjali, milles iga tooriumoksiidi osake on kaetud õhukese vasekihiga. Analoogiliselt võib saada ka teisi pulbreid, mis on kaetud teiste kergtaandavatest metallidest pinnetega.

Meetodi puuduseks on see, et pulber tuleb pärast kuivatada ja pesta, mis alati ei õnnestu. Seepärast kasutatakse teist meetodit, kus vedel hüdroksiidide lahus kuivatatakse ja taandatakse koos, saadud dispersne metallipulbri segu kaetakse nitraatide või atsetaatide kihiga, mis järgneval kuumutamisel muutub oksiidiks. Sellisel meetodil saadakse ülipeeneid $\text{Ni-Al}_2\text{O}_3$, $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$ ja Cu-SiO_2 pulbreid.

Metallurgilist meetodit kasutatakse juhul, kui dispersioontugevdatud sulam moodustub vahetult sulametalli kristallisatsiooni protsessis. Selleks segatakse rasksulav tugevdav faas – oksiid, keemilisel teel eutektse koostisega maatriksmetalliga. Sulam kristallub eutektse koostisega disperssete osakeste kujul. Meetod leiab piiratud kasutamist.

4.2. Metallmaatrikskomposiitmaterjalide omadused

Sõltuvalt kasutatavast armatuurist ja valmistamise viisist võib kõik metallkomposiidid jagada kahte rühma: kiudarmeeritud, mis leiavad kasutust peamiselt normaal- või madalatel temperatuuridel, ja dispersioonarmeeritud tööks kõrgetel temperatuuridel, kus määrav omadus on materjali roometugevus.

4.2.1. Kiudarmeeritud metallkomposiidid

Kiudarmeeritud metallkomposiidid (fibre reinforced metallic composites) on komposiitmaterjalid, mis on valmistatud eelkõige kergsulavate ja kergmetallide (alumiinium, magneesium, titaan jt) baasil.

Alumiiniumi baasil komposiidid

Kihstruktuuriga (nn sändvitš-tüüpi) metallkomposiitmaterjale valmistatakse alumiinium-fooliumist ja terastraadist valtsimise, difusioon- või plahvatuskeevituse teel. Saadud materjali ($V_A = 40\%$) tihedus on 4700 kg/m^3 , löögisitkus $KV = 20 \dots 30 \text{ J}$, elastsusmoodul $E = 120 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$, tõmbetugevus R_m toatemperatuuril on 1500 N/mm^2 , temperatuuril $550 \dots 600 \text{ }^\circ\text{C}$ $900 \dots 1000 \text{ N/mm}^2$. Asendades puhtast alumiiniumist maatriksi dispersioontugevdatud Al-pulbersulamiga, tõuseb töötemperatuur ilma komposiidi tugevuse languseta kuni $600 \text{ }^\circ\text{C}$. Lisaks terastraadile kasutatakse Al baasil metallkomposiitmaterjali valmistamisel armatuurina ka boor- ja süsinikkiudu. Boorkiu tõmbetugevus on keskmiselt 3500 N/mm^2 , elastsusmoodul $450 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$, tihedus 2500 kg/m^3 . Alumiiniumi armeerimine boorkiuga annab tulemused, mida näeme tabelis 4.3.

Siit selgub, et eritugevuse (R_m/ρ) ja erielastsusmooduli (E/ρ) poolest on boorarmatuuriga komposiidid keskmiselt 1,5...3 korda paremad kui terasarmatuuriga komposiidid.

Veel kergemaid komposiite saab, kui armatuurina kasutatakse süsinikkiudu. Süsinikkiu sisaldusel 40...50% on komposiidil järgmised omadused: $R_m = 650 \dots 1150 \text{ N/mm}^2$, $E = 200 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$, $A = 1,5 \%$, $KV = 20 \dots 30 \text{ J}$, $\rho = 2200 \dots 2300 \text{ kg/m}^3$.

Alumiiniumi baasil komposiite kasutatakse lennukitööstuses. Nendest valmistatakse lennukite ja rakettide raskkoormatud osi (tiivad, stabilisaatorid, kütusepaagid jt).

Tabel 4.3

Alumiiniumboorkomposiitide omadused

Armatuuri maht V_A , %	0	10	20	30	40	50
Tõmbetugevus R_m , N/mm ²	140	380	650	900	1150	1400
Elastsusmoodul E , 10 ³ N/mm ²	70	100	135	180	200	250
Katkevenivus A , %	–	–	–	0,7	0,7	0,6
Eritugevus, km	5,4	14,6	25,0	34,5	44,0	54,0
Erielastsusmoodul, km	2700	3800	5200	6900	7700	9600

Magneesiumi baasil komposiidid

Metallkomposiitmaterjalid magneesiumi baasil on kerged ($\rho_{Mg}=1700 \text{ kg/m}^3$) ja selle tõttu parimate eriomadustega. Eriti perspektiivne armatuurimaterjal on boorkiud, kuna boor praktiliselt ei lahustu sulamagneesiumis ja jääb püsivaks kuni temperatuurini 750 °C. See võimaldab Mg-B-komposiite valmistada vaakumis immutamise meetodil temperatuuril 700...750 °C. Saadavad materjalid on tugevad ja jäigad, kerged ning kuumuskindlad.

Mg-komposiitide omadusi saab veelgi parandada, kui kasutada maatriksina Mg-Li-sulamit (8% Li). Sellise maatriksiga komposiitmaterjal on veelgi tugevam ja kergem ($\rho_{Li}=530 \text{ kg/m}^3$). Immutamise teel saadud komposiidi tõmbetugevus on 2400 N/mm² armatuurisisaldusel 70%, mis annab eritugevuseks 140 km. See näitaja on üks kõrgemaid metallkomposiitmaterjalide hulgas.

Titaani baasil komposiidid

Titaani baasil valmistatud metallkomposiitmaterjalid kasutatakse armatuurina Mo-, SiC- või boorkiude ning sellised materjalid töötavad temperatuurideni 800 °C. Mo-armatuuriga ($V_A=40\%$) titaankomposiidil on 800 °C juures tõmbetugevuseks $R_m=325 \text{ N/mm}^2$, mis on 9 (!) korda rohkem kui puhtal titaanil samal temperatuuril. Kuna Mo-armatuur on raske, siis asendatakse see boorkiuga, kuna aga boor reageerib kergesti titaaniga, siis pinnatakse boorkiudu ränikarbiidiga (tuntud borsikuna). Komposiidi Ti-borsiku omadused (armatuurisisaldus 25%) on 900 °C temperatuuril järgmised: $R_m=900 \text{ N/mm}^2$, $E=210 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$, $\rho=4000 \text{ kg/m}^3$, mis annab $R_m/\rho=22,5 \text{ km}$ ja $E/\rho=5250 \text{ km}$.

Nikli baasil komposiidid

Nikroomi (Ni-Cr-sulam) ja nimoniki (Ni-Cr-Ti-Al-sulam) baasil metallkomposiitmaterjalid on kõige kuumustugevamad metallisulamid. Selle rühma materjalide töötingimused eeldavad, et armatuur oleks stabiilne kõrgetel temperatuuridel. Selleks kasutatakse armatuurina raskesulavaid metalle (W ja Mo), korundi Al₂O₃ või süsinikkiudu, mis on kaetud termodünaamiliselt stabiilsete ühenditega – TiN, BN, ZrN jt. See võimaldab kasutada komposiite temperatuuril, kus puhas maatriks kaotab praktiliselt tugevuse. Näiteks nikroomi baasil W-armatuuriga ($V_A=50\%$) metallkomposiitmaterjalil on temperatuuril 1100 °C tõmbetugevus $R_m=500 \text{ N/mm}^2$, mis on 2,5 korda suurem kui parimal turbiinilabade valmistamiseks kasutataval sulamil – nimonikil – temperatuuril 750 °C.

4.2.2. Dispersioontugevdatud metallkomposiidid

Alumiiniumi baasil komposiidid

Pulbermetallurgia meetodil valmistatud *pulberalumiinium* (*Sintered Aluminium Powder, SAP*) kujutab endast alumiiniumi, mis on tugevdatud alumiiniumoksiidi disperssete osakestega. Kõigepealt alumiinium sulatatakse ja pihustatakse. Seejärel jahvatatakse graanulid kuulveskis pulbriks osakeste suurusega 1 µm. Pulber oksüdeerub seda rohkem, mida peenem ta on. Tavaliselt on alumiiniumoksiidi (Al₂O₃) sisaldus pulbris 5...20 mahuprotsenti. Pulbri edasine töötlemine seisneb selle külmpressimises, eelpaagutamises, toorikute järempressimises ning ekstrudeerimises või valtsimises temperatuuril 550 °C. Lõpptulemusena saadakse materjal poorsusega 4...5%.

Pulberalumiiniumi omadused sõltuvad tooriku deformatsiooniastmest ja oksiidisisaldusest. Kasutatakse sulameid SAP 930, SAP 895 ja SAP 865, mis sisaldavad vastavalt 6...9, 9...13 või 13...18 % alumiiniumoksiidi. Nendest valmistatakse lehtmaterjali ja siledaid või ribistatud torusid seinapaksusega kuni 0,4 mm. Nimetatud materjale kasutatakse peamiselt lennukitööstuses, keemiatööstuses, tuumaenergeetikas ja valdkondades, kus detailid töötavad temperatuuril 300...500 °C.

Tabel 4.4 näitab temperatuuri mõju paagutatud Al baasil sulamitele. Kui toatemperatuuril on karastatud ja vanandatud duralumiiniumi omadused ($R_{p0,2} = 240 \text{ N/mm}^2$, $R_m = 450 \text{ N/mm}^2$, $A = 20\%$) kõrgemad, võrreldes pulberalumiiniumi omaga, siis temperatuuril üle 250...300 °C duralumiinium täiesti kaotab tugevust, kuid paagutatud SAP-tüüpi sulamitel isegi 500 °C juures on tugevus 80...100 N/mm².

Tabel 4.4

Alumiiniumsulami SAP mehaaniliste omaduste sõltuvus temperatuurist

Materjal	R _m , N/mm ²			R _{p0,2} , N/mm ²			A, %		
	20 °C	300 °C	500 °C	20 °C	300 °C	500 °C	20 °C	300 °C	500 °C
SAP 930	250	115	70	175	95	65	14	8	3
SAP 895	310	150	90	215	120	85	10	5	2
SAP 865	380	175	105	265	155	105	7	3	–

Teisi dispersioontugevdatud komposiite

Peale alumiiniumi on ka teiste maatriksite korral võimalik dispersne tugevdamine. Kasutamist on leidnud sulamid hõbeda, nikli ja volframi baasil.

Hõbeda baasil komposiidi tugevdavaks faasiks on kaadmiumoksiidi (CdO) osakesed. Materjali kasutatakse kesktugevooluga (100...300 A) elektrikontaktide valmistamiseks – tavaliste kolmefaasiliste elektrimootorite lülitamine. Teatavasti tekib elektriahela lülitamise momendil (kommuteerimisel) kontaktide vahel elektrikaar, toimub nende elektroerosioonkulumine ja kontaktid võivad isegi kokku keevituda. Kaadmiumoksiidi (10...15 mahuprotsent) mõju hõbemaatriksis seisneb selles, et kommuteerimisel kõrge temperatuuri toimel kaadmiumoksiid aurustub, mistõttu kontaktide vahel tõuseb gaasirõhk järsult ja kaar kustub. Seega on hõbekontaktis tagatud kõrge soojus- ja elektrijuhtivus koos erosioonikindlusega. Mehaanilised omadused (tõmbe- ja roometugevus jt) on aga antud juhul teisejärgulised.

Teised selle rühma sulamid on **nikli ja volframi baasil sulamid, mis on tugevdatud ThO₂-ga**. Tabelist 4.2 nähtub, et tooriumoksiid on üks inertsemaid okside (entalpia 293 kkal/mol jääb alla ainult Al₂O₃-le). Ni baasil dispersioontugevdatud sulamid säilitavad sulatustemperatuuri (1455 °C), soojus- ja elektrijuhtivuse puhta nikli tasemel, kuid erinevalt

puhtast niklist võivad töötada kuni 800 °C-ni (puhas Ni mitte üle 500 °C). Volframi baasil sulameid (kuni 5% ThO₂) kasutatakse laialdaselt elektrotehnikas, elektrovaakumtehnikas ja metallurgias kuumustugeva materjalina küttekehadeks, emitteriteks, soojusekraanide jne valmistamiseks. Inertne ja peen toorium kõrgetel temperatuuridel oksiidi karkassis pidurdab terade kasvu ja roomeprotsesside kulgu.

4.2.3. Pseudosulamid

Pseudosulamid (pseudoalloy) on isotroopsed heterosulamid teineteises lahustumatute metallide baasil. Pseudosulami faaside omaduste suure erinevuse tõttu on neil kõrge vastupidavus intensiivsetes soojusvoogudes, vibratsiooni summutavus, isemäärivus kuivhõõrdumise tingimuses, elektroerosioonkulumiskindlus jm.

Pseudosulameid toodetakse pulbermetallurgia meetodil, kasutades kas vedelfaasis paagutamist või karkassi immutamist sulametallidega. Viimane variant on eelistatum. Sellistes tehnoloogilistes protsessides on tähtis faasidevaheline märgumisnurk: mida väiksem see on, seda suurem tihedus ja paremad omadused saavutatakse.

Tähtsamad pseudosulamid on **vasega immutatud raud**, mida kasutatakse masinaosade valmistamisel, ja **vasega immutatud volfram või molübdeen**, mida kasutatakse elektri-kontaktmaterjalina.

Raua lahustuvus vases on 4%, vase lahustuvus rauas aga kaks korda suurem – 8,5%, märgumisnurk on 0°. Immutamine viiakse läbi temperatuuril 1150...1200 °C. Rauapulbrist valmistatud karkassi poorsust reguleeritakse selliselt, et pärast immutamist moodustaks vask pseudosulamis 30...50 mahuprotsenti. Kuna vask difundeerub raua kiiremini kui raud vaske, võib tekkida vase faasis nn difusioonpoorsus. Selle vältimiseks kasutatakse võimalikult lühiajalist immutamist või puhta vase asemel 4 %-list vase ja raua sulamit.

Pseudosulami tõmbetugevus ($V_{Cu}=40\%$) $R_m = 500 \text{ N/mm}^2$, plastsus $A = 10\%$. Kui rauale lisada 1% süsinikku, kasvab tugevus 1200...1300 N/mm²-ni. Fe-Cu-pseudosulam neelab vibratsioone paremini kui traditsiooniliselt selleks eesmärgiks kasutatav hall- või tempermalm. Selliseid sulameid kasutatakse ka kompressorilabade, auruturbiinide tihendusrõngaste (4 korda vastupidavam kui malmist rõngad) ja lõiketööriistade kehade (freesid, puuriotsikud, lõiketerad) valmistamiseks.

W- ja Mo-pseudosulamid vasega on asendamatud kõrgepingeelektrikontaktide materjalid. Elektri jaamade generaatorite, võimsate alajaamade lülitamisel võivad voolutugevused kontaktides ulatuda mitme tuhande amprini. Rasksulav W ja Mo annavad kontaktile kuumustugevuse, vask elektrijuhtivuse. Elektri kaare temperatuuril 5000...6000 °C vask keeb ($T_K = 2582 \text{ °C}$) ja aurustub, ning sellega hoiab kontakti temperatuuri ja materjali tugevuse lubatud piirides. Sama pseudosulami omadus – jahtumine vase aurustamisel – leiab kasutamist plasmatronide düüside valmistamisel. Nendes komposiitmaterjalides võib W- või Mo-sisaldus olla 10...90 mahuprotsent. Sulamid, kus W on alla 50%, valmistatakse immutamise teel, üle 50% W-sisaldusega sulameid – paagutamisega temperatuuril 1200...1300 °C.

5. KERAAMIKAMAATRIKSKOMPOSIITMATERJALID (KMKM)

Keraamikakomposiitide maatriksiks võib olla kristalne keraamika, klaaskeraamika e sitall või klaas. Käesolevas raamatus käsitletakse ainult neid KMKM, mille maatriksiks on kristalse struktuuriga keraamika.

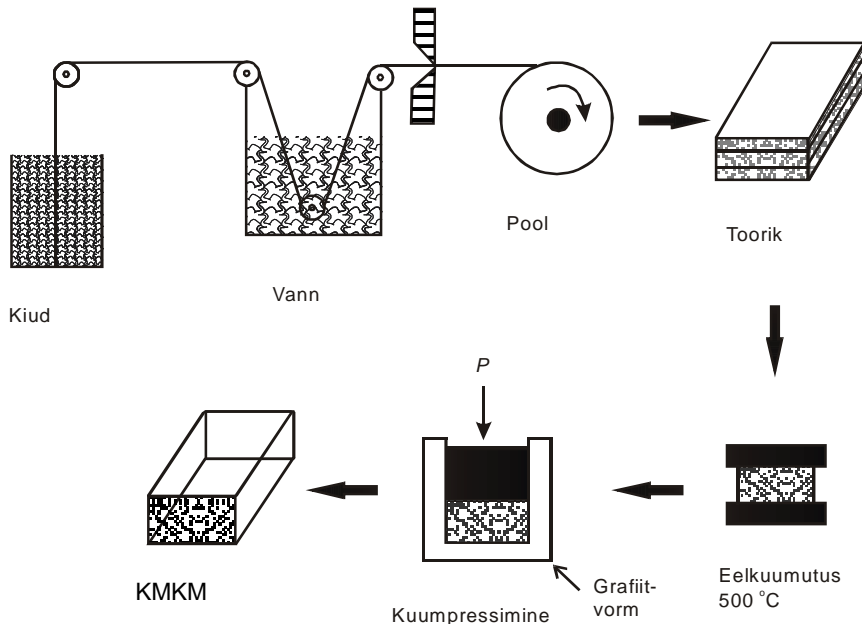
5.1. KMKM tehnoloogia

Keraamiliste komposiitide valmistamiseks kasutatakse järgmisi viise:

- 1) külmpressimine järgneva paagutamisega,
- 2) kuumpressimine,
- 3) reaktsioonpaagutamine,
- 4) sulametalliga immutamine,
- 5) sadestamine aurufaasist,
- 6) sol-geel-tehnoloogia,
- 7) kõrgetemperatuurne iselevisüntees,
- 8) pürolüüs,
- 9) elektrofooresimmutamine.

Külmpressimist kasutatakse komposiitide valmistamiseks juhul, kui maatriks ja armatuur koosnevad pulbriosakestest või lühikestest kiududest, mis enne pressimist segatakse või jahvatatakse, plastifitseeritakse, pressitakse külmalt pressvormis ja siis paagutatakse normaalrõhul. Protsess ei erine oluliselt tavalisest pulbermetallurgia tehnoloogiast, see on lihtsaim ja odavam KMKM saamisviis. Protsessi puudus on oht mikropragude tekkeks ja suur jääkpoorsus, kuna armatuuri osakesed takistavad maatriksi paakumist. Maatriksi ja armatuuri erinevate joonpaisumistegurite tõttu võivad tekkida mikropraod tugevdavate osakeste piiridel.

Kuumpressimine on enam kasutatav meetod poorideta lihtsa kujuga detailide saamiseks, joonis 5.1. Selle meetodi puhul ühildatakse pressimine ja paagutamine, mis võimaldab saada kompaktsed materjale ka kõige raskemini valmistatavast materjalist. Näiteks valmistatakse sellisel meetodil alumiiniumoksiidist (Al_2O_3) löikeplaadid, mis on armeeritud ränikarbiidsete (SiC) kiududega. Kuumpressimist kasutatakse nii pidev- kui diskreetsete kiududega armeeritud KMKM saamiseks. Pidevkiudude korral immutatakse eelnev kiuline karkass läbi Al_2O_3 suspensiooniga, immutatud toorik kuivatatakse ja kuumpressitakse. Kuumpressimisel võivad kiud suurte survete puhul katkeda, mis viib toote tugevuse vähenemisele. Pressimise temperatuur peab olema võimalikult madal, et takistada keemilist reaktsiooni komposiidi faaside vahel, kuid samas piisav poorsuse likvideerimiseks. Tavaliselt toimub pressimine temperatuuril 1500...1900 °C ja surve 20...40 MPa (200...400 atm).



Joonis 5.1. KMKM valmistamine immutamise ja kuumpressimise teel

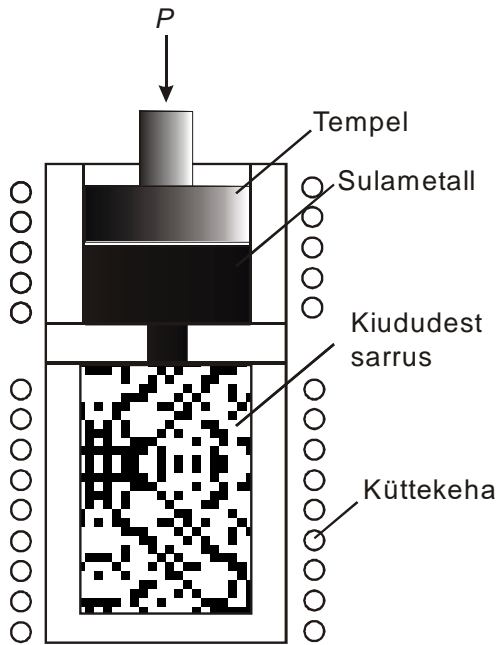
Reaktsioonpaagutamist kasutatakse peamiselt Si_3N_4 ja SiC baasil komposiitide valmistamisel. Grafiitkiud immutatakse sularäniga temperatuuril $1700\text{ }^\circ\text{C}$ mõne tunni jooksul. Sularäni, reageerides grafiidiga, moodustab ränikarbiidi. Kiudude esialgne geometria säilib SiC-Si -komposiidis. Selle suur eelis on SiC ja Si joonpaisumistegurite sarnasus. Tüüpiline SiC-Si -komposiit sisaldab 30...50% räni, mis piirab selle komposiidi kasutustemperatuuri umbes $1400\text{ }^\circ\text{C}$ -ga. Meetodi eelised on:

- paagutamisel peaaegu puudub kahanemine;
- võib kasutada suurt kogust kiude;
- võib kasutada kiude etteantud orientatsiooniga ja saada vajalike omaduste anisotroopiaga materjale;
- reaktsioonpaagutuse temperatuur on reeglina madalam tavapaagutuse temperatuuriga võrreldes;

Protsessi puudus on suur jääkoorsus (kuni 20%), kuna paagutuse käigus kõik sisemised poorid ei täitu. Seepärast kasutatakse viimasel ajal reaktsioonpaagutust koos järgneva kuumpressimisega.

Sulametalliga immutamine on üks võimalik meetod poorideta KMKM saamiseks. Selleks kasutatakse erinevaid viise. Üks variant seisneb pidevkiudude katmises keraamilise suspensiooniga, mis seejärel kuivatatakse, põletatakse välja plastifikaator ja siis kuumpressitatakse. Teises variandis eelnevalt vormitud kiud immutatakse surve all sulametalliga (joonis 5.2). Meetodi eelis seisneb homogeense ja poorideta maatriksi saamiseks, puudusteks aga on:

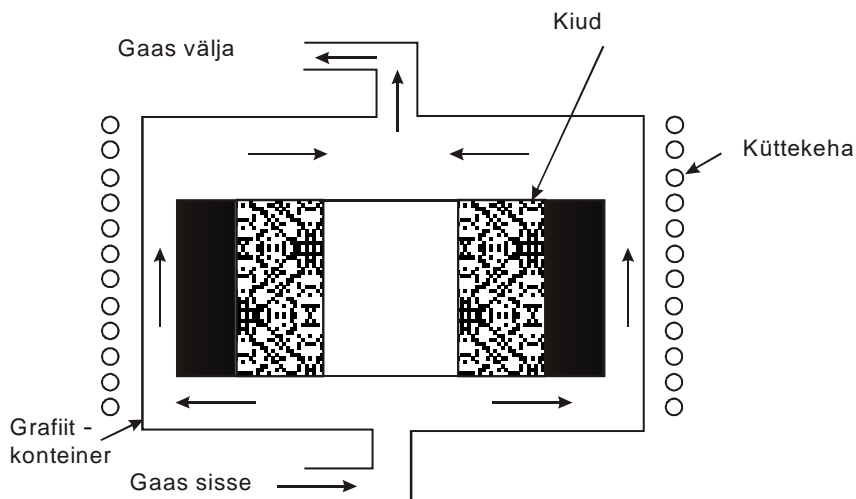
- a) keraamilise maatriksi kõrge sulamistemperatuur, mille tulemusena on aktiivne faasidevaheline reaktsioon komposiidis;
- b) sulakeraamika viskoossus on suur, mistõttu kiudude vahed ei pruugi täituda materjaliga, ja tulemuseks võib olla suur poorsus;
- c) põhifaaside erinevate joonpaisumistegurite tõttu võivad maatriksis jahtumisel tekkida mikropraod.



Joonis 5.2. KMKM valmistamine immutamisel rõhu all sulametalliga

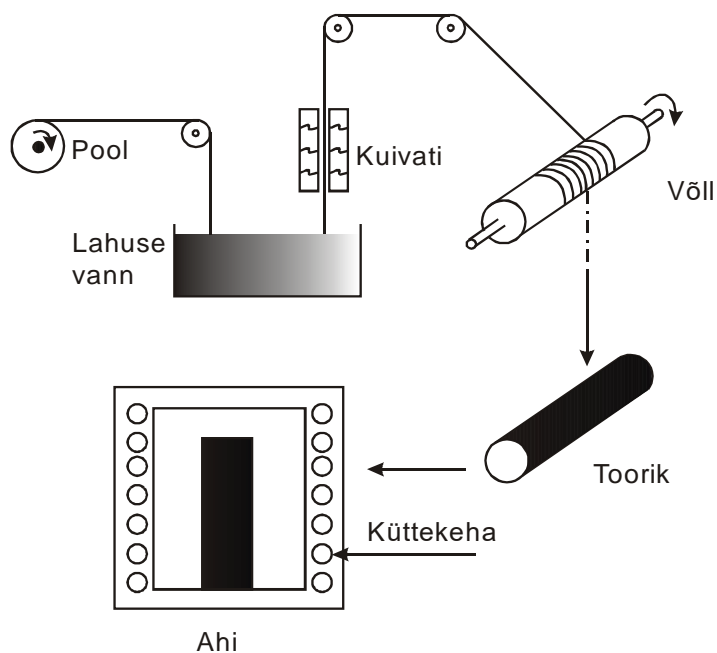
Auru- või gaasifaasist sadestamist kasutatakse ränikarbiidi (SiC), ränioksikarbiidi (SiC-O), ränikarbiidi-titaanoksiidi (SiC-TiO) kiududega komposiitide valmistamisel. Selleks eelnevalt vormitud kiud immutatakse gaasikujulise dikloorsilaaniga (SiCl_2) vesiniku keskkonnas temperatuuril $900\text{...}1100\text{ }^\circ\text{C}$ rõhul $1\text{...}100\text{ kPa}$ ($0,1\text{...}10\text{ atm}$), vastav skeem on toodud joonisel 5.3. Gaas täidab kiulise karkassi, reageerib sellega, moodustades keraamilise maatriksi. Paremaks pooride täitumiseks eemaldatakse immutatav toorik grafiitkonteinerist, pööratakse teisele küljele ja korratakse immutust. Jääkpoorsus südamikus on tavaliselt $10\text{...}15\%$. Protsessi puudus on selle pikaajalisus, eelised aga:

- head mehaanilised omadused kõrgetel temperatuuridel;
- suurte, keeruka kujuga detailide valmistamise võimalus;
- võrreldes kuumpressimisega väike kasutatav surve ja temperatuur.



Joonis 5.3. KMKM valmistamine gaasifaasist sadestamise teel

Sol-geel-protsess on üks kiulise karkassi immutamise variant, milles kasutatakse soolalahust, mis sisaldab metalliioone. Eelnevalt muudetakse soolalahus erilisandite abil geeliks (želeetaoliseks massiks). Edasine immutatud tooriku töötlemine on põhimõtteliselt sama, mis teistes immutusvariantides ja lõpeb kuumpressimisega (joonis 5.4). Tänu geeli heale immutusvõimele teostatakse protsess toatemperatuuril, ja toorik on tihe. Puuduseks võib nimetada suurt kahanemist tooriku kuivatamisel ja paagutamisel, mis moonutab valmistoodet.



Joonis 5.4. KMKM valmistamine sol-geel-meetodiga

Kõrgetemperatuurne iselevisüntees (SHS-protsess), (*Self-propagated High-temperature Synthesis*) seisneb keraamilise ühendi moodustamises lähtekomponentidest (nt Si ja C või Ti ja C pulbersegudest), milles energiaallikaks on eksotermiline reaktsioon komponentide vahel. Lähtepulbrid segatakse, pressitakse toorik ja süüdatakse, alanud keemiline reaktsioon käib soojuse arvelt, mis tekib komponentide omavahelisel reageerimisel. SHS-protsessi eelised on:

- energia kokkuhoid;
- lihtne, odav seadmestik;
- keemilise koostise kerge juhitavus;
- protsessi suur tootlikkus.

Puuduseks on aga, et SHS-protsessiga saadud komposiitides on maatriks nõrgalt seotud armatuuriga ja on poorne. Sellepärast kasutatakse protsessi peamiselt keraamiliste pulbrite saamiseks, mille lähtekomposiidid valmistatakse mõne teise meetodiga.

Pürolüüs on keraamilise maatriksi moodustamise meetod, mis seisneb ränisisaldavate polümeeride kõrgetemperatuurises töötlemises. Näiteks metüülkloorsilaan CH_4SiCl_2 laguneb kuumutamisel 1100...1200 °C juures reaktsiooni järgi:



moodustades ränikarbiidi. Komposiidi saamiseks immutatakse vastava struktuuriga kiuline või pulbriline karkass vedela ränisisaldava polümeeriga ja kuumutatakse kõrgel temperatuuril. Kuna ühekordsel immutamisel saadud tooriku poorsus on suhteliselt suur – 20...30%, siis seda korratakse, kasutades väiksema viskoossusega polümeere. Paremad tulemused annab kuumutamine 1...2 ööpäeva jooksul lämmastiku keskkonnas.

Elektroforeesimmutamine on suhteliselt lihtne, kuid kallis protsess. Selle põhimõtte seisneb selles, et suspensioonis või kolloidlahuses olevad nanomeetrilised keraamilised osakesed liiguvad elektriväljas ja sadestuvad katoodile. Protsess meenutab galvaanilist pindamist, kuid suurema kiirusega. Galvaanikas on see 0,1 µm/min, elektroforeesis – 1mm/min. Armatuuri pindamisele järgneb paagutus, tavaliselt kuumpressimise teel.

5.2. KMKM armeerimise põhimõtted

KMKM on maatriksina tänapäeval enam kasutatavad Al_2O_3 , MgO , SiO_2 , SiC , Si_3N_4 , mulliid ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) jt. Armeerivate materjalidena kasutatakse rasksulavate metallide (W, Mo, Th jt) kiude või osakesi, aga samuti süsinik-, boor- või keraamilisi (SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2 , BN, SiC , Si_3N_4 jt) kiude.

Keraamilise maatriksi ülesanne on:

- anda välisjõud üle armatuurile,
- takistada kiudude omavahel kokkupuutumist,
- kaitsta kiude keskkonna kahjuliku mõju eest.

Armatuuri ülesanne on tugevdada keraamilist maatriksit, takistada keraamilises maatriksis tekkivate (või olevate) pragude levikut ja KMKM katastroofilist (habrast) purunemist. Armatuur võib olla osakeste, diskreetsete või pidevate kiudude kujul.

Armatuuri kuju järgi liigitatakse KMKM kahte rühma:

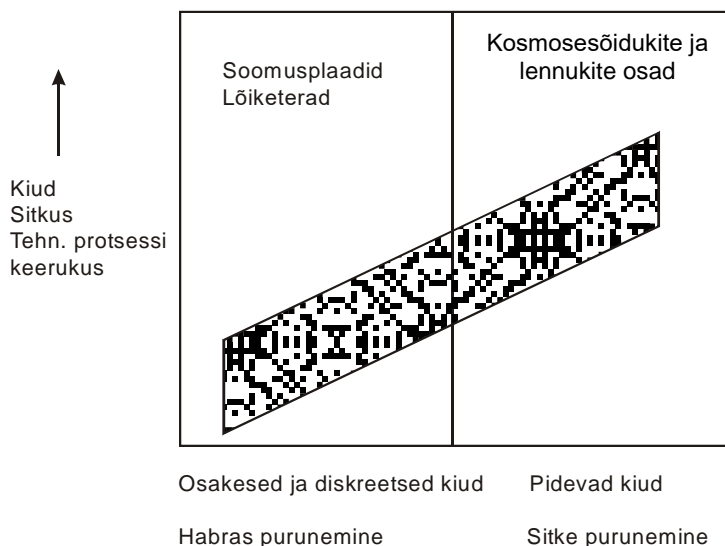
- osakeste (pulbriga), lühikeste kiududega või niitkristallidega armeeritud komposiidid;
- pidevkiududega armeeritud komposiidid.

Keraamikamaatriksiga komposiidid, mis saadakse osakeste või lühikeste kiududega armeerimisega, purunevad hapralt, kuid on siiski suurema tugevusega ja sitkusega, võrreldes monoliitse keraamikaga. Osakeste ja lühikeste kiududega armeeritud keraamikat on suhteliselt lihtne valmistada ja nad on hinnalt odavamad. Sellise KMKM eelised on:

- tehnoloogilise protsessi lihtsus (sama, mis monoliitsel keraamikal);
- mehaanilised ja füüsikalised omadused on ligilähedaselt isotroopsed;
- löögisitkus on tavaliselt 25...100% kõrgem, kui vastaval monoliitsel keraamikal.

Diskreetsete kiududega KMKM kasutatakse lõiketerade, pressvormide, nüüdisaegsete gaasiturbiinide, soojusvahetite, survetihendite ja kulumiskindla materjalina.

Pidevate kiududega KMKM on tehnoloogiliselt märksa raskem valmistada ja nad on hinnalt kallimad, kuid, võrreldes osakeste või diskreetsete kiududega, on pidevkiudude tugevdav efekt palju suurem. Ettekujutust sellest annab joonis 5.5, mis näitab, et pidevarmeerimisega KMKM purunevad sitkelt s.t et nende deformatsioon enne purunemist on mitte ainult elastne, nagu diskreetselt armeeritud keraamikal, vaid osaliselt ka plastne. Just see asjaolu lubab nimetada neid “sitkeiks” või “tehnokeraamikaks”. Pidevarmeeritud keraamika puruneb astmeliselt (mitte katastroofiliselt), kui kiudude koestruktuur ja kiudude ning maatriksi vaheline side on nii optimeeritud, et domineerib kiudude purunemine.



Joonis 5.5. KMKM jagunemine purunemislgi järgi

Oluliselt mõjutab keraamiliste komposiitide omadusi nende faaside soojuspaisumine ja elastsusmoodul. Positiivselt mõjutab keraamilise maatriksi sitkust ja tugevust järgmine faaside omaduste kombinatsioon:

- armatuur, mille materjali elastsusmoodul on suurem maatriksi omast (soovitavalt 2 korda),
- armatuur, mille joonpaisumistegur on suurem kui maatriksi oma.

Esimesel juhul võtab deformeerumisel jäigem ja tugevam armatuur vastu väliskoormuse, mistõttu KMKM tugevus ja jäikus on suurem, kui monoliitsel keraamikal. Näitena võib tuua volframtraadist armatuuri keraamilises maatriksis, mille koostis on 50% kaoliini, 30% ränioksiidi ja 20% päevakivi (kasutatakse elektriisolaatoriteks). Volframkiud (kuni 30% mahust) selles komposiidis võtavad endale suurema osa tõmbekoormusest, sest nende jäikus (elastsusmoodul) on suurem kui maatriksil.

Teisel juhul tekivad valmistamise käigus (jahtumisel) keraamilises maatriksis survepinged tänu armatuuri suuremale kahanemisele. Keraamika töötab hästi survepingetele ja halvasti tõmbepingetele. Koormamisel tekib purunemine eelkõige tõmbepingete tagajärjel. Seega KMKM koormamise esimeses järgus toimub materjalise survepingete vähenemine ja alles teises järgus tekivad keraamilises maatriksis tõmbepinged. Näitena võib tuua keraamilised $6\text{ZrO}_2 \cdot \text{CeO}_2$, ZrSiO_4 või $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ – maatriksiga komposiidid, mis on armeeritud molübdeentraadiga; viimane on suurema joonpaisumisteguriga kui maatriksi oma.

KMKM tugevnemise mehhanism sõltub suurel määral ka armatuuri iseloomust – habras või plastne. Habraste kiudude korral on tegemist mittepurunevate diskreetsete kiududega, mis tõmmatakse maatriksist välja. Selleks vajalik energia on tunduvalt suurem, kui kulub iga komponendi purunemiseks eraldi, ning komposiidi purustustöö võrdub kiudude välja-tõmbamistööga. Kiudude väljatõmbamine haprast maatriksist realiseerub juhul, kui nende pikkus ja faasidevaheline tugevus on seotud valemiga :

$$L \leq (V_M/V_A) \cdot r \cdot \sigma_N / 2\tau \quad (5.2)$$

kus V_M , V_A – vastavalt maatriksi ja armatuuri mahuline koostis

r – kiu raadius,

τ – nihkepinge faasivahelisel kiud-maatriks piiril,

σ_N – normaalpinge komposiidis

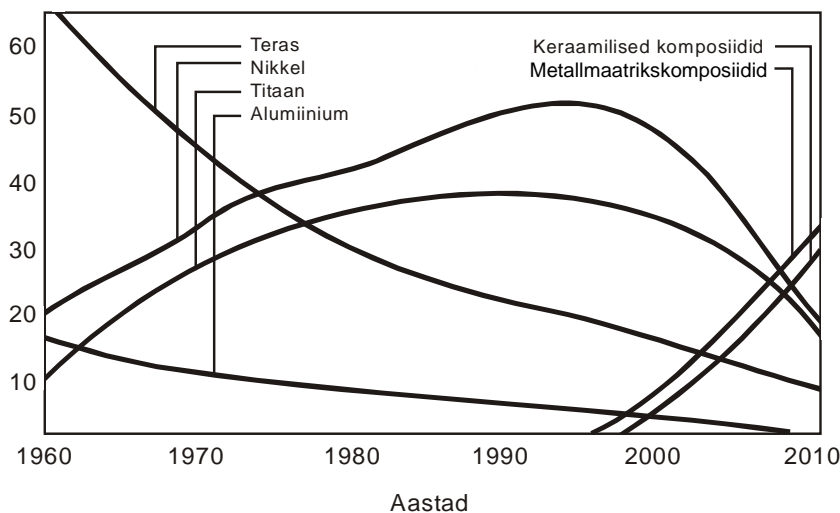
Tavaliselt on keraamilistes komposiitides armatuuri sisaldus alla 30 mahuprotsendi ja monokristallkiudude raadius ei ületa mõnda mikromeetrit (vt p 2.2.1), sellest tulenevalt diskreetsete kiudude tugevdav mõju sõltub peamiselt faasidevahelisest nihketugevusest. Sellest asjaolust võib teha paradoksaalse järelduse: hapra maatriksi ja armatuuri korral saab komposiidi sitkust parandada, vähendades nende omavaheliste sidemete tugevust. Selleks saab kasutada mitmeid tehnoloogilisi võtteid, nagu komponentide koostise muutmist, armatuuri pindamist, valmistamisprotsessi režiimi kontrolli jne.

Vastupidine situatsioon tekib, kui habras keraamiline maatriks armeeritatakse plastsete metallkiududega (W, Mo jt). Sel juhul ei läbi maatriksis tekkiv pragu plastset kiudu, mis venib, vaid seiskub kiu ees. Kui maatriks on väga tugevasti seotud kiuga, võib maatriksi purunemine põhjustada prao levimist läbi kiu. Antud juhul soodustab komposiidi sitkust kaks asjaolu:

- tugeva armatuuri ja maatriksi korral on hea, kui kiu ja maatriksi vahel on vahekiht, mis takistab prao levimist kiule;
- nõrga faasidevahelise sideme korral levib maatriksis tekkinud pragu piki kiude, sellisel juhul on KMKM sitkus suurem, kuna järsult suureneb murdepind.

5.3. Keraamiliste komposiitide koostis ja omadused

Konstruksioonimaterjalina kasutakse keraamilisi komposiite veel suhteliselt vähe, kuid siiski umbes 1995. aastast suureneb nende kasutus sõja-, lennuki- ja kosmosetehnikas, kus nad tõrjuvad välja selliseid traditsioonilisi materjale nagu alumiiniumi- ja titaanisulamid. Ettekujutuse sellest annab joonis 5.6, mis näitab Rolls-Royce'i firma lennukimootorites kasutatavate materjalide trendi alates 1960. aastast. Tüüpilised konstruktsioonikomposiidid on järgmised:



Joonis 5.6. Materjalide osakaal Rolls-Royce'i lennukimootorite kaalus

1. SiC-kiududega SiC-keraamika, mis saadakse aurufaasist sadestamisega, on toatemperatuuril tugevusega 520 ja 1000 °C juures 280 N/mm². Kuumpressimise teel saadud komposiidil on tugevus 750 N/mm² ja purunemissitkus K_{IC} 25 N/mm²·m^{0.5}. Komposiidi sama koostisega armatuur ja maatriks tõstavad selle termokindlust tsükliliselt temperatuuri muutumisel.

2. SiC-kiududega Al₂O₃-keraamikal, mis on saadud kuumpressimise teel, on tõmbetugevus 290 N/mm² katmata SiC-kiudude korral ja 570 N/mm² kiududega, mis on kaetud alumiiniumoksiidiga. Purunemissitkus K_{1C} on kuni 8 N/mm²·m^{0,5} temperatuuril 1100 °C.

3. Kuumpressitud SiC-kiududega tugevdatud Si₃N₄ purenemissitkus on kuni 56 N/mm²·m^{0,5}, mis on ligi 10 korda suurem kui monoliitsel Si₃N₄. Materjali kasutatakse gaasiturbiinlabidate valmistamiseks, mis töötavad 1250 °C juures. Nende tugevus toatemperatuuril on 414 N/mm² ja 1200 °C juures veel 310 N/mm². Monoliitne SiC-keraamika, mis saadakse pulbermetallurgia tehnoloogiaga, on hea oksüdatsiooni- ja korrosiooni-kindlusega ja kõva, kuid habras materjal.

Tunduvalt suurem on keraamiliste komposiitide kasutus **lõiketeradena**, kusjuures lõikekiirused kasvavad tunduvalt, võrreldes senikasutatavate kõvasulamitega. Lõikamisel tekkiv soojus kontsentreerub väikesele ruumalale – tera tipule, kus temperatuur ulatub 1000 °C-ni. Peale soojusefekti on ka mehaaniline koormus väga suur. Lõikematerjal peab olema kõva ja tugev kõrgetel temperatuuridel (punapüsiv), hea vastupanuga mehaanilistele ja termilistele löökidele, keemiliselt stabiilne kuumutamisel, minimaalse kulumisega lõikamisel. Tähtis on ka lõikematerjali soojusjuhtivus, sest sellest sõltub jahutusvedeliku kasutuse tõhusus. Tuletame siinjuures meelde, et lõikekiirus kasvab sõltuvalt lõikematerjali punapüsivusest peaaegu eksponentsiaalselt. Keraamilised komposiidid vastavad nendele nõuetele paremini, kui paagutatud kõvasulamid, eriti siis, kui jutt on rasktöödeldavate materjalide lõikamisest: karastatud terased, kõrglegeeritud sulamid, armeeritud plastid jne. Peamine lõikekeraamika valmistamisviis on kuumpressimine, sest ta annab minimaalse poorsusega materjali, mis on ülimalt tähtis lõikeriista omadustele. Tüüpiliste nüüdisaegsete keraamiliste lõikematerjalidena võib nimetada:

1. ZrO₂+SiC kiududega armeeritud Al₂O₃, mis on sitke ja keemiliselt stabiilne, hea soojusjuhtivusega lõikematerjal.

2. CrO₃-kiududega armeeritud Al₂O₃, mis on suure kõvadusega kulumiskindel materjal.

3. TiB₂-kiududega armeeritud Al₂O₃ on peeneteraline, suure paindetugevusega ja tööriista elueaga materjal. Kõvadus on 94 HRA ja tihedus 4050 kg/m³.

4. TiC-kiududega armeeritud Si₃N₄, mis on uus nitriidkeraamika klass, suure punapüsivusega. Komposiidi matriksiks on 92% Si₃N₄+6% Y₂O₃+2% Al₂O₃ ja armatuuriks 30% TiC kiud. Kõvadus on 93,5 HRA, purunemissitkus K_{1C} 4,3 N/mm²·m^{0,5}.

5. Si₃N₄-BN-komposiit, mis on dispersioonstruktuuriga materjal, kus räninitriidi terad on ümbritsetud peente kuubilise boornitriidi osakestega. Kuubiline boornitriid, mille kõvadus on 9,5 HM, jääb alla ainult teemantist –10 HM (Mohsi skaala järgi). Komposiidi kõvadus on 1400 HV.

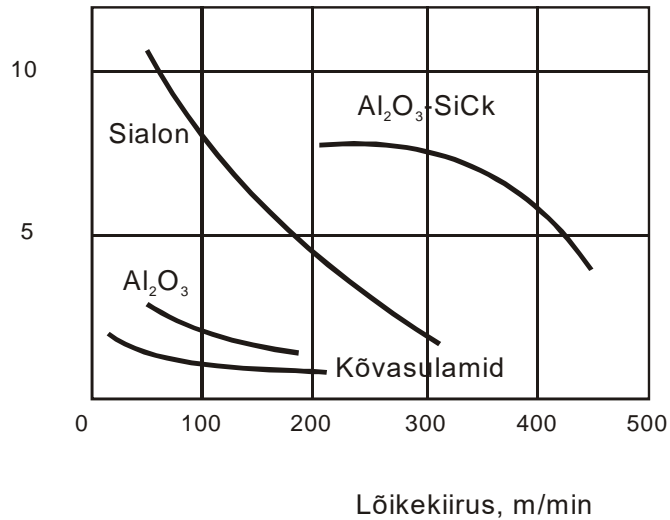
6. TiN-TiC-BN-komposiit, mis sisaldab 5...10% TiN/TiC ja 90...95% BN, ta on dispersioonstruktuuriga ja kõvadusega 3000...4500 HV toatemperatuuril ja 1800 HV 1000 °C juures, see on üks kõvemaid nüüdisaegseid lõikematerjale.

7. Al₂O₃+ZrO₂ komposiit (ZTA), mida valmistatakse tööstuslikult lõikeplaatidena. ZrO₂ lisamine Al₂O₃-le suurendab materjali sitkust. Lõiketera kulumiskindlus on tingitud tsirkooniumoksiidi kristallivõre muutusest temperatuuri mõjul töö käigus. Positiivselt mõjub ka materjali inertsus FeO suhtes kõrgetel temperatuuridel. Paagutatakse temperatuuril 1650 °C 2 tundi.

8. TiB₂- või TiC-matriksiga SiC-kiududega tugevdatud komposiit on üks vähestest kiulise struktuuriga lõiketera komposiitidest. Ränikarbiidkiud diameetriga 1...3 µm lisatakse mahuliselt 10% TiB₂ pulbrile ja jahvatatakse kuulveskis. Segu kuumpressitakse survele 335 MPa argoonis või vaakumis temperatuuril 1700...1900 °C, suhteline tihedus pärast paagutamist on 96%. Paagutustemperatuuri vähendamiseks lisatakse segule 5% räniboriidi SiB₆, mis ühtlasi parandab ka materjali mehaanilisi omadusi.

Mõnede lõikekomposiitide omadused tuuakse joonisel 5.7, millest on näha, et suuritel lõikekiirustel ja vastavalt kõrgematel töötemperatuuridel ületavad komposiitlõikematerjalid kaugelt traditsioonilisi kõvasulamid. Siiski tuleb lisada, et lõikamiseks löögiga, mis on paljudel juhtudel tavaline, on ja jäävad paagutatud kõvasulamid asendamatuks lõikematerjalideks.

Tööiga, min



J₀

Erinevaist materjalidest lõiketerade tööiga

6. PLAST- JA SÜSINIKMAATRIKSKOMPOSIITMATERJALID

Ajalooliselt patenteeriti 1909. a. esimesena plastmaatrikskomposiitmaterjal (PMKM) – bakeliit. Bakeliit kujutab endast tselluloosarmatuuriga (paber, papp, kangas) tugevdatud fenoolvaiku. Tänapäeval valmistatakse tööstuslikult väga laias valikus PMKM tooteid: suruõhu balloonid, raketimootorite korpused, auto- ja raudteetsisternid, torud, spordiinventar jne.

PMKM eelised on suur eritugevus, vastupanu keemiliselt agressiivsetele keskkondadele, väike soojus- ja elektrijuhtivus, hea raadiolainete läbitavus; nad on tehnoloogilised – madalad temperatuurid ja väiksed surved tootmisel ning valmistamisviiside paljusus.

PMKM puudused on suhteliselt väike jäikus, madal soojus- ja kiirguspüsivus, hügrooskoopsus, füüsikalise-mehaaniliste omaduste muutumine vananedes ja keskkonnategurite mõjul. Enamik puudusi on tingitud polümeersest maatriksist. Jäikuse suurendamiseks on viimastel aastatel välja töötatud rida uusi armatuuriliike nagu suure elastsusmooduliga süsinikkiud, boorkiud, ränikarbiidkiud. Nende kasutamisega suureneb tunduvalt plastkomposiitide jäikus.

Uue kvaliteedi annab polümeermaatriksi karboniseerimine, mida kasutatakse süsinik-süsinikkomposiitmaterjalide (SSKM) puhul. SSKM kujutavad endast süsinikkiududega armeeritud süsinikmaatriksit. Süsinikmaatriks, mis on omadustelt lähedane süsinikkiududele, võimaldab kõige paremini realiseerida süsinikkiudude ainukordseid omadusi.

SSKM on terve rida hinnalisi omadusi: erakordselt suur kuumuspüsivus (kuni 2500 K inertsgaasi keskkonnas), hea termokindlus, väike joonpaisumistegur ja soojusjuhtivus, vastupanu keemilistele reaktiividele ning hea kättesaadavus.

6.1. PMKM toodete valmistamisprotsessid

Põhilised tehnoloogilised võtted, mida kasutatakse PMKM valmistamisel, erinevad armatuuri ja maatriksi sidumise poolest. Ühe või teise variandi valik sõltub paljudest mõjuritest, eelkõige detailide kuju ja mõõtmete ning valmistatava koguse poolest. Kasutatakse järgmisi valmistamisprotsesse ja lähtematerjale:

Survevormimine – lühikesed kiud ja vaigugraanulid eeltootevormi.

Pultrusioon – kuivad kiud ja vedel vaik eeltoote valmistamiseks.

Kuivmähkimine – eeltoode.

Märgmähkimine – kuiv kiud ja vedel vaik.

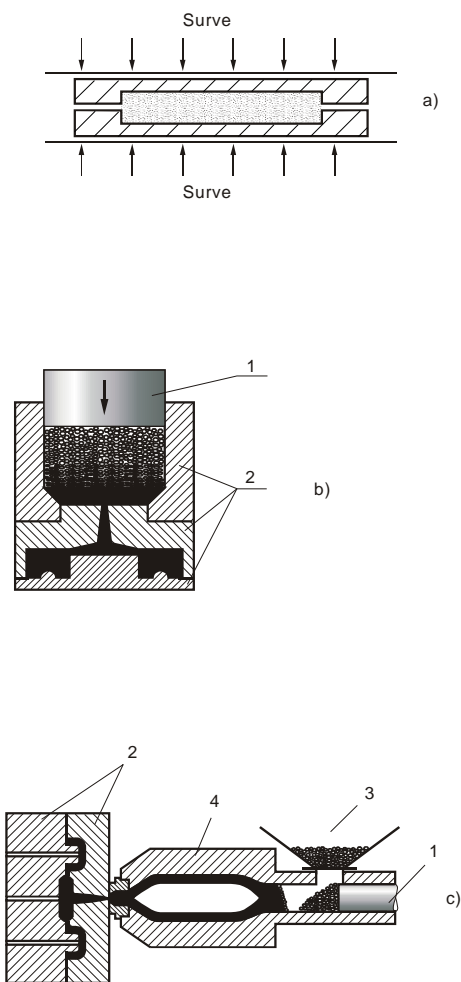
Kontaktvormimine – kangas või matt, vedel vaik

Vaakumvormimine – tavalised eeltooted.

Termosurvevormimine – eeltoode.

Järgnevalt antakse lühike ülevaade eeltoodud protsessidest.

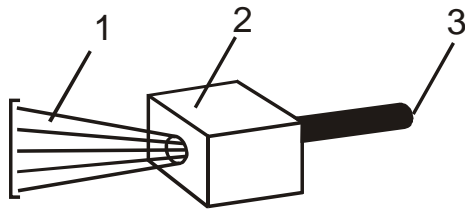
Survevormimisel kasutatakse kolme vormimise moodust: otse- ja valupressimist ning survevalu (joonis 6.1). Otsepressimisega saadakse suurte mõõtmete ja massiga keskmise keerukusega detaile (joonis 6.1a). Armatuurina võib kasutada kiude, kangast või prepreg'e. Pressvormid on keerulised ja kallid.



Joonis 6.1. PMKM vormimise skeemid: otsepressimine (a), valupressimine (b), survevalu (c):
 1 – tempel, 2 – valuvorm, 3 – punker, 4 – valusõlm

Valupressimist ja survevalu kasutatakse keskmise suurusega õhukeseseinaliste lühikeste kiududega armeeritud keeruliste toodete valmistamiseks. Maatriksina kasutatakse termoplaste. Armeerimise aste on madal ja kiud pole orienteeritud, mistõttu tugevus pole eriti suur.

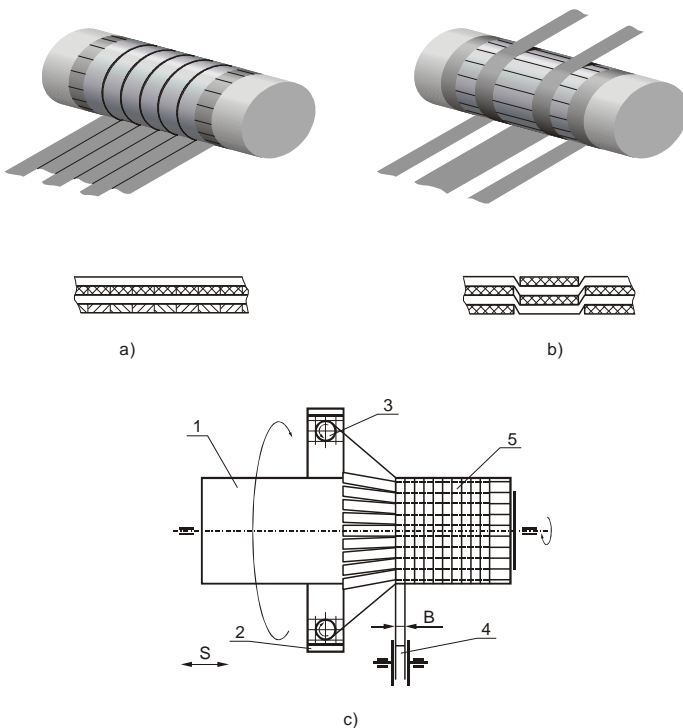
Pultrusioonmeetodit kasutatakse kindla ristlõikega ühes suunas armeeritud lihtsa kujuga detailide valmistamiseks (joonis 6.2), sagedamini aga pooltoorikute – prepreg'ide saamisel. Prepreg on vaiguga immutatud, kuid mittekõvendatud riie, lint, vilt või muu, mida saab kasutada toote tegemiseks muude meetoditega ja üldiselt ka muudes ettevõtetes.



Joonis 6.2. Ühesuunaliste profiilide valmistamine pultrusiooni teel: 1 – “märjad” ja “kuivad” eltoorikud (prepreg), 2 – kuum ekstrudeerimissõlm, 3 – kõvendatud profiil

Mähkimine on levinuim meetod suure tugevusega pidevkiududega suure armatuuri-protsendiga toodete valmistamiseks. Selle meetodi korral immutatakse niitidest või riidest lint polümeerse sideainega, keritakse pöörlevale tornile, mille kuju vastab toote sisekujule (joonis 6.3a). Pärast vajaliku paksuse saavutamist materjal kõvendatakse ja torn eemaldatakse. See meetod võimaldab saada mitmesuguseid keerulisi pöördkujuga, kuid täpsete mõõtmetega detaile.

Sideaine ja armatuuri sisseviimise viisi järgi jaotatakse mähkimismeetodid “kuivaks” ja “märjaks”. Esimesel juhul kasutatakse prepreg’e, ning armatuuri immutamine viiakse läbi enne vormimist eri mähkimismasinatel. Teisel juhul on armatuuri mähkimisprotsess asendatud selle sideainega segamisega. Kuigi immutusprotsess on sel juhul raskemini kontrollitav, on “märja” immutamise eelis väiksemates kontaktpingetes, mis võimaldab kasutada väiksema võimsusega seadmeid. Seepärast kasutatakse “märja” meetodit suuremõõtmeliste gabariitsete keerulise kujuga koorikute valmistamiseks. Põhilised mähkimise variandid on toodud joonisel 6.3.



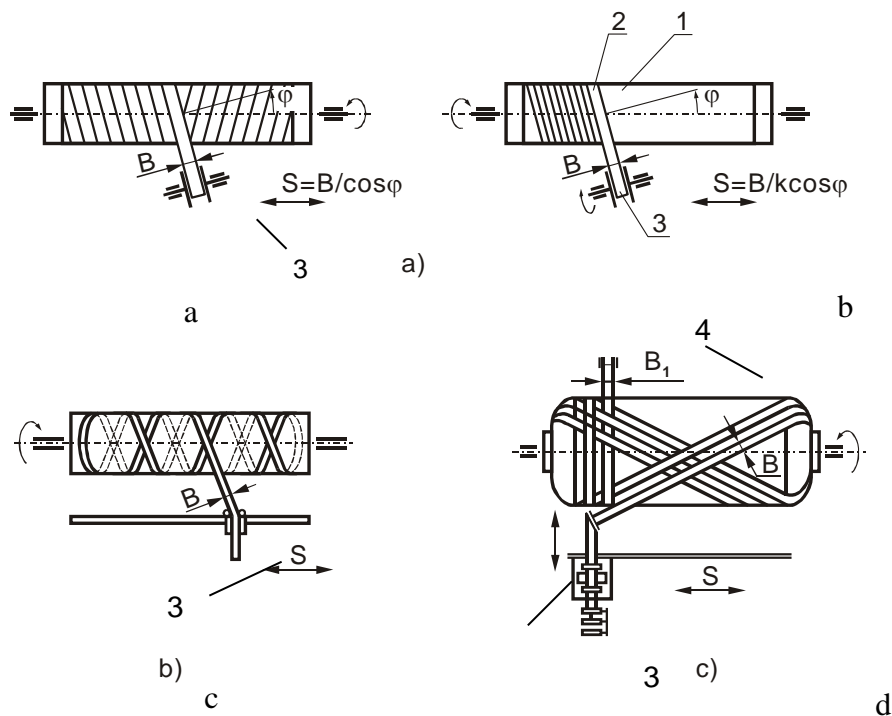
Joonis 6.3. KM mähkimise põhilised moodused: ringmähkimine (a), pikiringmähkimine (b), 1 – kärn, 2, 3 – pikilindi pool, 4 – ringlindi pool, 5 – mähitud koorik

Pikiringmähkimist kasutatakse siis, kui kooriku pikkus on lühem mähitava kanga laiusest või vastupidi, tunduvalt pikem kanga laiusest, siis on sobivam kanda mähkimisel tornile samaaegselt mitu lindikihti 90° nurga all toote telje suhtes. Koonilisus ei tohi olla sel juhul rohkem kui 30° “kuival” mähkimisel ja 20° “märjal” mähkimisel. Pikiringmähkimise puhul kantakse täisnurga all mähitava lindiga tornile ka pikiteljega lint, mis antakse eraldi trumlilt ja mis pöörleb sünkroonselt torniga (joonis 6.3b).

Tangentsiaalringmähkimine on kõige levinum mähkimismeetod komposiitmaterjalist pöördkujuga detailide valmistamiseks. Kasutatakse erinevaid mähkimise viise. Kõigi viiside ühine tunnus on armeeritava lindi mähkimine nurga all pöörleva torni telje suhtes. Lindi spiraalmähkimist kasutatakse ühekihiliste (joonis 6.4a) või mitmekihiliste (joonis 6.4b) detailide saamiseks; esimesel juhul lint mähitakse keerd-keeru kõrvale, teisel juhul – lindi pikietteanne on väiksem lindi laiusest ja seega lindi keerud katavad üksteist, mida iseloomustatakse parameetriga

$$K=B/S \cdot \cos\beta, \quad (6.1)$$

kus B – lindi laius,
 S – ettenihe mm/pöördele,
 β – nurk torni ja pooli teljede vahel.



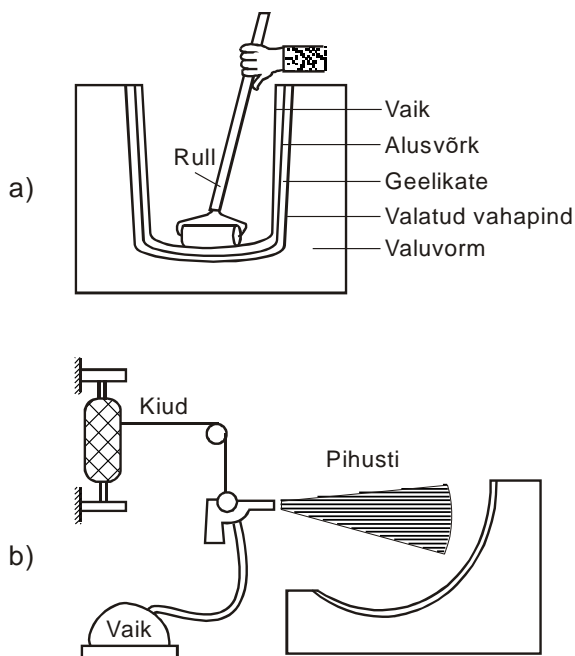
Joonis 6.4. Spiraalmähkimise põhilised skeemid: ühekihiline spiraalvint (a); mitmekihiline spiraalvint (b); spiraal-ristmähkimine (c); ühildatud spiraal-ringmähkimine (d).
 1 – kärn, 2 – lint, 3 – ristmähkimise poolid, 4 – ringkihtide pool

Seda meetodit kasutatakse ka surve all töötavate metallanumate tugevdamiseks erineva läbimõõduga torude, kahuri- ja teiste relvade torude, gaasiballoonide jms valmistamiseks.

Spiraalristmähkimist kasutatakse laialdaselt, kuna see võimaldab realiseerida väga erinevaid armatuuri paigaldamise viise, sõltuvalt jõudude mõjumise suunast (joon 6.4c). Muutes mähkimisnurka, võib saada erineva radiaal- ja pikisuunalise tugevuse. See võimaldab maksimaalselt ära kasutada lähtekiudude tugevust tooteis.

Spiraalringmähkimine (joonis 6.4d) sisaldab kahte eelmist mähkimisviisi ja annab seetõttu palju paremaid tulemusi, kuid nõuab palju keerukamat programmeeritavat seadet. Selle meetodi puhul toimub armatuuri mähkimine samaaegselt kahe seadmega. Seejuures üks seadmetest teostab ringmähkimist 90° nurga all detaili teljega, teine seade mähib spiraalselt teatud nurga all. Seda meetodit kasutatakse suuremõtmeliste silindriliste ja kooniliste (koonilisusega mitte üle 20°) mahutite (nt raudteesisternid) valmistamiseks.

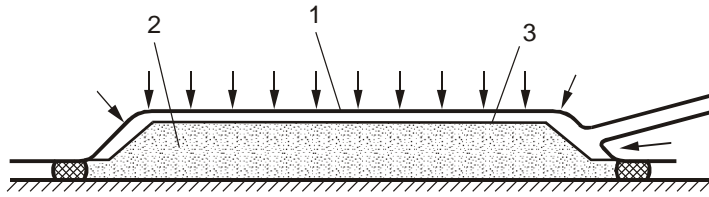
Väikeste partiide korral pole õigustatud keerulise ja suure tootlikkusega seadmete kasutamine, ja seepärast kasutatakse **kontaktset koorikute vormimist** (veesõidukite kered, autokabiinid, mööbel, mitmesugused paagid jne). Selleks valmistatakse tulevase toote mudel, mille pinnale kantakse kihtide kaupa armeeriv riie ja immutatakse siduva vaiguga, mida seejärel kõvendatakse (joonis 6.5a). Mudeli võib valmistada suvalisest odavast materjalist, mis säilitab oma vormi: betoon, savi, vineer jne. Kõige tootlikum on meetod, kus lühikesed kiud segatakse vaiguga ja pihustatakse suruõhuga mudeli pinnale (joonis 6.5b). Kontaktvormimismeetod on lihtne, ei vaja eriseadmeid, võimaldab kergesti muuta toote konstruktsiooni, mis on eriti oluline katsenäidiste väljatöötamisel. Meetodi puudus on väike tootlikkus, raske on saavutada armatuuri ja sideaine ühtlast jagunemist, mistõttu on raske tagada toodete ühtlast kvaliteeti. Peale selle kaasneb tootmisega palju tervistkahjustavaid mõjureid: toksiline tolm, kahjulike gaaside ja aurude (vaigud, lahustid, värvid jt) eraldumine. See nõuab suurt tähelepanu töökaitsele, mis aga alati ei taga positiivseid tulemusi. Üks põhiline operatsioon on armatuuri pealerullimine rulli abil käsitsi. Kuna sellest sõltub toote kvaliteet, siis on välja töötatud mitmeid tihendamise variante, kus kasutatakse vaakumit, mis omakorda tekitab koorikule atmosfääri rõhu.



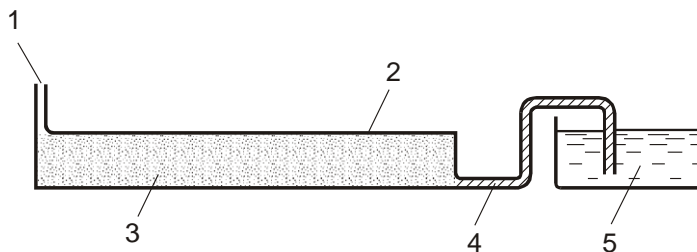
Joonis 6.5. Kontaktvormimise skeem: käsitsi väljapanek (a), pihustiga pindamine (b)

Vaakumvormimine on polümeermaatriksiga koorikute tootmise viis, milles kasutatakse atmosfäärirõhu ja sisemise hõrenduse vahet (joon 6.6). Eelnevalt immutatud armatuur kaetakse õhukese metallist või plastist kaanega, mille kuju vastab täpselt valmistatava toote kujule. See kaas takistab kortside teket toote pinnal. Pakett kaetakse elastse kummi- või polüetüleenkilekotiga, mis hermeetiliselt surutakse vastu vormi. Kotist pumbatakse õhk välja, misjärel atmosfääri rõhk tihendab kogu paketi. Vajaduse korral kuumutatakse vaigu

kõvendamiseks kogu paketti täiendavalt – selleks võetakse see vormist välja ja kuumutatakse ahjus.

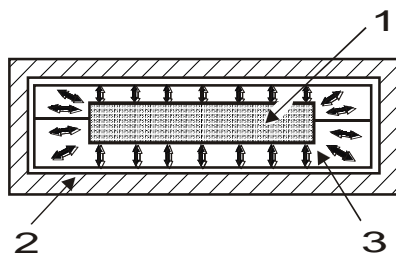


Joonis 6.6. Vaakumvormimise skeem kummümbrise kasutamisega: 1 – kummümbris, 2 – immutatud riide pakett (prepreg), 3 – vorm, 4 – õhuke survekile



Joonis 6.7. Vaigu injektioon: 1 – vaakum, 2 – vorm, 3 – esialgne kuiv riie, 4 – vaik, 5 – vaigureservuaar

Vaakumvormimise eripära on **injektorvormimine** (joonis 6.7), mille korral vormi asetatud kuiv armatuur immutatakse vaiguga. Kui vorm on suletud, pumbatakse sellest õhk eelnevalt välja; teisest anumast lastakse sisse vaik, millel lastakse seejärel kõveneda. Kui sideainena kasutada kuumuskindlat kautšukit, mis kannatab temperatuuri 150...250 °C, siis võib kõvenemise ühildada kooriku tihendamise. Seda protsessi nimetatakse **termo-survevormimiseks**. Meetod on küllaltki lihtne, kuid nõuab keerukat sisseasetet (joonis 6.8). Meetod erineb eelnevast selle poolest, et vorm pannakse tugevasse konteinerisse, mis asetatakse ahju kõvenema. Kautšukist vorm projekteeritakse nii, et kõvendamisel soojuspaisumise tulemusena saavutatakse rõhk, mis on vajalik tiheda toote saamiseks.



Joonis 6.8. Termokompressorvormimine:
1 – eeltoorik, 2 – jääk ja tugev vorm, 3 – kautšukist vorm

Plastmaatriksiga KM valmistamismeetodite mitmekesisus on tingitud armatuuri ja maatriksi omadustest, aga ka valmistatavate toodete iseärasustest: mõõtmetest, kuju keerukusest, vajalikest omadustest, kogusest jne., mida kasutatakse. Klaas-, süsinik-, boor-, organoplastide või metallmaatriksiga KM valmistamise meetodite valikukriteeriumid on toodud erialases kirjanduses [8, 9, 15, 20].

Järgnevalt on toodud tehnilis-majanduslikud näitajad erineval viisil valmistatud PMKM toodete kohta kümnepallises hindamissüsteemis (1 – madal, väike; 10 – kõrge, suur) [8-II, lk. 20].

Tabel 6.1

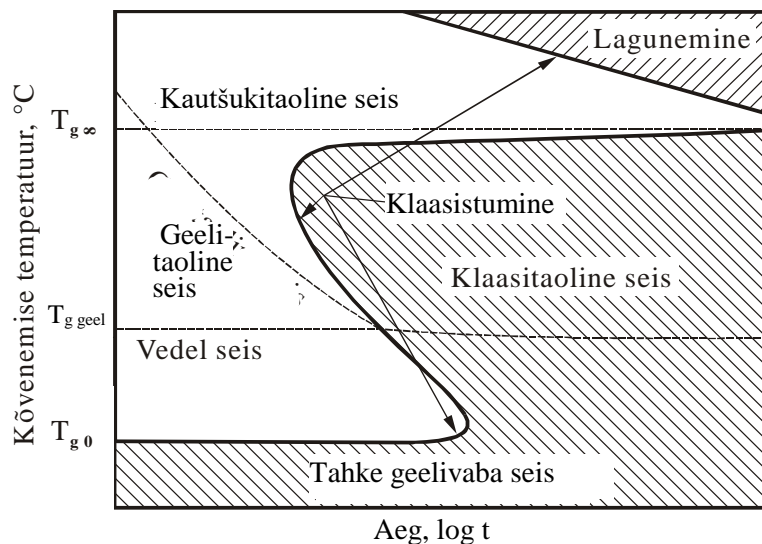
Erinevate meetoditega valmistatud PMKM tehnilis-majanduslikud näitajad

Vormimise viis	Seadmete maksumus	Tootlikkus	Tugevus	Vormija kvalifikatsioon	Toote maksumus	Toote homogeensus
Käsitsivormimine	1	3	3	10	9	1
Vaakumvormimine	2	2	4	10	9	3
Autoklaavis elastse kotiga vormimine	3	1	6	6	7	4
Pihustusvormimine	4	4	3	10	8	1
Riide mähkimine	6	6	10	2	4	9
Pultrusioon	7	9	9	2	2	10
Lehtstantsimine	10	8	7	4	9	10
Vaigu sissepritsimine	3	2	3	7	7	8
Survevalu	10	10	6	2	10	10

Kuigi survevalu ületab kümnepallises hindamissüsteemis summaarselt teisi PMKM valmistamismeetodeid, on tema tehnilised võimalused kihiliste plastide saamiseks piiratud väikeste ja lihtsate toodetega (tabelis puudub toote keerukusastme ja mõõtmete hinnang).

Teatud PMKM valmistamisoperatsioonid on iseloomulikud kõikidele valmistamisviisidele: need on sideaine kõvendamine, torni (mudeli) eemaldamine, kvaliteedikontroll, mehaaniline järeltöötlemine ja ühendamine teiste toodetega.

Kõvendamise käigus luuakse lõplik PMKM struktuur, kujundatakse tema omadused ja fikseeritakse toote kuju. Kõvendamise peamised parameetrid, millest oluliselt sõltuvad PMKM omadused, on temperatuur, kõvendamise aste ja aeg. Kõvendamine võib toimuda toatemperatuuril (**külmkõvendamine**) või kõrgendatud temperatuuridel (**kuumkõvendamine**) erinevat tüüpi ahjudes. Kõvendamist iseloomustab kaks staadiumi: algjärk (kuni polümeerse võrgu tekkimiseni) ja lõppjärk (mille käigus moodustub polümeerne võrk). Need kaks staadiumi on teineteisest eraldatud geelimoodustumise punktiga (joonis 6.9).



Joonis 6.9. Termoreaktiivvaigu faasidiagramm koordinaadistikus temperatuur-aeg.

Geelimumoodustumise punkt T_g vastab ajamomendile, mil sideaine kaotab võime üle minna voolavasse olekusse ja lahustuda, nii et tema esialgsed tehnoloogilised omadused täiesti kaovad, mis on üks tähtsamaid kõvenemisprotsessi parameetreid.

Teatud temperatuurivahemikus suureneb sideaine viskoossus aeglasemalt, mis vastab tahke keha viskoossusele. Sideaine omadused muutuvad järsult (väheneb erimaht, suureneb tugevus, kasvab vastupanu deformatsioonidele) ning vedel sideaine läheb üle klaasitaolisse olekusse. Temperatuuri, mil toimub selline muutus, nimetatakse *klaasistumistemperatuuriks* T_k . Need muutused toimuvad teatud temperatuurivahemikus (tavaliselt 10...20 °C), mistõttu klaasistumine pole mitte punkt, vaid mingi keskmine temperatuurivahemik. Klaasistumine ei ole faasiline üleminek, kuna sideaine on amorfses olekus ja termodünaamika seisukohalt võib seda vaadelda kui ülejähutatud vedelikku.

Kolmas iseloomulik temperatuur polümeerse materjalide juures on nende *lagunemis- e destruktsioonitemperatuur* T_d . Sel temperatuuril algab märgatav polümeeri lagunemine, mis seisneb molekulaarsidemete katkemises.

Lagunemine, nagu ka klaasistumine, toimub teatud temperatuurivahemikus, mida iseloomustab faasidiagramm (joonis 6.9). Temperatuuril T_{g0} on vaik tahkes olekus. Temperatuurivahemikus T_{g0} - $T_{g\text{-geel}}$ võib vedel sideaine aeglaselt klaasistuda, minna paksuks (ajaskaala on logaritmiline) ja aja jooksul kaotada võime edasiseks klaasistumiseks, s.t kõvenemata vaigu säilivusaeg on piiratud. Tuleb rõhutada, et see ei ole vaigu kuivamine, vaid tema reageerimisvõime kadumine molekulaarstruktuuri muutuse tõttu. Temperatuurivahemikus $T_{g\text{-geel}} < T_{k\text{öv}} < T_{g\text{-∞}}$ läheb geel üle klaasitaolisse olekusse ja lõpuks, kui temperatuur ületab vaigu klaasistumistemperatuuri $T_{g\text{-∞}}$, läheb ta algul üle geelitaolisse ning seejärel kõrgelastesse (kautšukitaolisse) olekusse. Kui polümeer ei lagune, siis klaasitaolisse olekusse üleminekut ei toimu. Madalamal temperatuuril kui $T_{g\text{-∞}}$ pole võimalik täielikku kõvenemist saavutada. Polümeeri jäävad reageerimata tsoonid (kuna klaasistumise tulemusena liikuvus kaob), ja toodete omadused tunduvalt halvenevad. Kui täielikult kõvenemata polümeerist sideainega KM töötab kõrgemal temperatuuril, siis kõvenemisprotsess võib jätkuda, kuid see võib moonutada toote kuju ja mõõtmeid ning võivad ilmnedavad täiendavad sisepinged.

Sideaine vastupanu lagunemisele iseloomustatakse *termopüsivusega* (termostabiilsusega). Seda mõistet tuleb eristada termopüsivusest, mis peegeldab polümeeri vastupanu pehmenemisele. Kõvenemisprotsess toimub lõpuni (kuni reaktsioonivõime täieliku kadumiseni), kui kõvenemistemperatuur on kõrgem sideaine klaasistumistemperatuurist $T_{k\text{-∞}}$. Kui kõvenemisreaktsiooniga kaasneb soojuse eraldumine (eksotermiline efekt), siis materjal kuumeneb iseenesest. Sel juhul võib ümbritsev temperatuur olla madalam, kuid materjali sees ületab temperatuur $T_{k\text{-∞}}$, ja sideaine kõveneb täielikult. Sellel põhineb termoreaktiivsete sideainete külmkõvenemine. Vastutusrikaste detailide puhul kasutatakse siiski termoreaktiivsete vaikude kuumkõvendamist. See on tehnoloogilisem meetod ja võimaldab saada palju paremate mehaaniliste omadustega PMKM.

Termoreaktiivsete vaikude põhitüübid, nende mehaanilised ja tehnoloogilised omadused on toodud p. 2.1.2. Täpsem ülevaade on esitatud kirjanduses [8, 9, 10].

Armatuur ja sideaine on komposiidis sisepingete all, mille tekkepõhjused jagunevad: armatuuri ja sideaine joonpaisumisest ja temperatuuri ebahürtlasest jagunemisest mahus tingitud pinged. Reeglina on polümeeride joonpaisumistegur oluliselt suurem kui kiududel. Jahtumisel kuni toatemperatuurini tekivad PMKM-is sama märki termopinged kui kahanemisel, s.o sideaine on tõmbepingete ja armatuur survepingete all. Termopingete suurus on proportsionaalne maatriksi ja armatuuri joonpaisumistegurite erinevusega ning temperatuurigradiendiga.

Reaalselt PMKM-is kõik vaadeldud pinged summeeruvad ja materjal on mõjuvate pingete all, mis ajaga relakseeruvad.

Torni (kärni) eemaldamine

Pärast komposiitkooriku saamist on vaja torn (kärn), millel ta on saadud, demonteerida. Kärnile esitatakse rida nõudmisi: piisav tugevus, jäikus, vajalik pinnasiledus ja mõõtmete täpsus ning võimalus eemaldada kärn peale kõvenemist. Konstruksioonilt jaotatakse kärnid *terviklikeks, koostatavateks, täispuhutavateks ja purustatavateks*.

Tervikkärne kasutatakse lihtsakujuliste toodete (silindrid, koonused, poolkerad) valmistamiseks, millest on neid kerge eemaldada. Väljavõtmise kergendamiseks kaetakse torni pind adhesioonivastase pindega või valmistatakse väikese tehnoloogilise kaldega.

Koostatavaid kärne kasutatakse toodete valmistamiseks, kus tervikkärne ei saa eemaldada (kerakujulised detailid, sfääri- ja silindriosad jt). Sel eesmärgil kasutatakse ka täispuhutavaid kärne. Neid kasutatakse ainult lihtsamate toodete valmistamiseks, kuna nad pole jäigad ja täpsed.

Kui toote kontuur on suletud, siis kasutatakse purustatavaid kärne. Neid valmistatakse lahustuvaist aineist või mehaaniliselt kergesti purustatavatest materjalidest. Pärast toote vormimist kärn purustatakse, lahustatakse vees või sulatatakse kuumutamise, ning eemaldatakse tehnoloogilise ava kaudu.

Kärnide materjaliks on tavaliselt kergtöödeldavad metallid (Al, teras), plastid, puit (vineer), sageli ka kips, savi või vahataolised ained (steariin, parafiin).

Toodete kvaliteedi kontroll

PMKM saamise ja temast toodete valmistamise iseärasus on nende protsesside ühildatavus. Seetõttu saab materjali omadusi kontrollida ainult valmistootel. Sellel põhineb PMKM valmistamise põhimõtteline erinevus metallmaterjalide valmistamisest. PMKM valmistamisel võib kontrollida ainult lähtematerjalide omadusi, mitte aga saadava toote kvaliteeti.

PMKM koostise ja omaduste kontroll seisneb toote välises vaatluses, et välja selgitada välised defektid (ebatasasused, praod, lohud, kiudude väljaulatumine pinnale); mõõtmete kontrollis; füüsikalise-mehaaniliste omaduste ja koostise määramisel proovikehadel, mis on tooteist välja lõigatud või spetsiaalse varuga valmistatud; sisemiste defektide määramises kontrollaparatuuri abil.

Täiendav mehaaniline töötlemine ja ühendamine teiste detailidega

Kõige tüüpilisem PMKM mehaanilise töötlemise operatsioon on äärte eraldamine, otspindade ületreimine, kinnitusavade puurimine, keermete lõikamine jne. Välispindade mehaanilist töötlemist püütakse vältida, kuna see rikub selle tihedust, tekitab mikropragusid ja vähendab tugevust. Seepärast välditakse ka jahutusvedelike kasutamist lihvimisel abrasiivkäiadega. Teiste toodetega liitmiseks asetatakse neile metallist vahetükid, nt äärikute kujul, mis kinnitatakse liimiga või keermega. Mõnikord metalläärikud asetatakse paigale juba vormimise käigus ja toode jahutatakse koos äärikuga. Mehaanilise töötlemise viise kirjeldatakse põhjalikult käsiraamatus [8, lk 380-421].

6.2. Ohutustehnika PMKM valmistamisel ja töötlemisel

PMKM-s kasutatav sideaine kuulub reeglina tervistkahjustavate, tule- ja plahvatusohtlike ainete kategooriasse. Klaasi-, grafiidi- või plastitolm, mis moodustub töötlemise käigus, võib, sattudes hingamisteedesse, esile kutsuda raskeid hingamisorganite haigusi. Epoksü-, polüester- ja teised vaigud, mida kasutatakse sideainena, põhjustavad aurudena sissehingamisel organismi mürgitust, nahale sattudes – põletikku. Enamik lahusteid – atsetoon, piiritus, stirool jt on kergsüttivad ja plahvatusohtlikud vedelikud. Nad on eriti

ohtlikud, kui neid kasutatakse eksotermilistes reaktsioonides, mis kaasnevad vaikudele kõvendamist kiirendavate ainete lisamisega. Rida keemilisi aineid, mida kasutatakse PMKM tehnoloogias, võivad omavahel kokku puutudes ise süttida ja isegi plahvatada. Näiteks bensoolülhape, mida kasutakse kiirendajana, plahvatab kokkupuutel mineraalhapetega. Järgnevalt on toodud kahjulike ainete lubatud kontsentratsioonide piirnormid PMKM tootmishooneis [2, lk 248], mg/m³

Etüülpiiritus	1000	Stiirool	5
Atsetoon	200	Klaas-, süsinik-, boorkiud	3
Toluool	50	Aniliin	3
Ammoniaak	20	Formaldehüüd	1
Fenool	5	Epikloorhüdriid	0,1

PMKM tootmise iseärasused nõuavad vastavate töökaitsemeetmete rakendamist. Konkreetseid soovitusi on toodud käsiraamatuis [8, 9].

6.3. Plastkomposiitide koostis ja omadused

Laialdane armatuuri- ja maatriksimaterjali valik koos võimalusega laias vahemikus reguleerida armatuuri mahulist sisaldust komposiidis võimaldab polümeerkomposiite mitmekülgsest kasutada. Põhilised PMKM on järgmised:

- klaasplastid,
- süsinikplastid (karboplastid),
- boorplastid,
- metalloplastid,
- organoplastid.

Klaasplastid kuuluvad levinuimate PMKM hulka, kuna neil on suur tugevus, hea vastupanu vahelduvale koormusele, termolöökidele, kõrge raadiolainete läbitavus, korrosiooni- ja erosioonikindlus. Nad on odavamad kui teised KM, tehnoloogiliselt mugavad valmistamiseks ja ümbertöödeldavad. Armeerivad elemendid klaasplastides on pidevkiud niidi või nõõri, aga ka erikoega riide kujul. Klaasplastid toodetakse orienteerimata (kaootilise) ja orienteeritud (ühesuunalise või ristsuunalise) kiudude asetusega. Esimesel juhul kasutatakse lühikesi (diskreetseid), teisel juhul aga pidevkiude. Kihilisi klaasriide baasil plaste nimetakse **klaastekstoliitideks**. Sideaine valik klaasplastide korral on määratud valmistamise tehnoloogia ja töötingimustega. Laialdaselt kasutatakse termoreaktiivseid vaike (epoksü-, polüester- ja fenoolvaike), aga ka termoplaste.

Orienteerimata kiududega klaasplastide tootmisest on enam levinud survevalu ja ekstrusioon. Esimesel juhul kasutatakse etteantud koostisega graanuleid, kus klaaskiud asuvad graanulite keskosas ja termoplastvaik ümber selle. Selliste graanulite saamine on eraldi operatsioon. Vormimise käigus vaigu viskoosel voolamisel kiud iseseadistuvad materjalis, mis muudab PMKM anisotroopseks. Seepärast leiab enam kasutamist ekstrusioon, kus kiudude ja vaigu segamine toimub vahetult ekstruuderis. See meetod on tootlikum, ja kiud jagunevad ühtlasemalt.

Orienteeritud armatuuriga klaasplaste valmistatakse *piki-* ja *ristikiudu armatuuriga*. Tugevus ja elastsusmoodul on maksimaalsed orienteeritud kiududega PMKM, mis sisaldab 65...66% sideainet. E-klaaskiude kasutades on PMKM tugevus kiudude pikisuunas 1600...2100 N/mm² ja erielastsusmoodul sama suur kui parematel alumiiniumsulamatel, kuigi ristikiudu on vastavad näitajad väikesed. Armeeritud klaasplastide tugevust ja elastsusmoodulit saab reguleerida kihtide arvuga erinevates suundades. Tabelis 6.2 on toodud ka ristikiudu armeeringuga plastide omadused kihtide suhtega 10:1, ning nende omadused on võrreldavad titaanisulamite ja duralumiiniumi omadustega. Nagu nähtub tabelist 6.2, on

klaasplastid eritugevuse ja erielastsusmooduli poolest võrdväärsed või isegi ületavad metallisulamiteid.

Tabel 6.2

Mõningate klaasplastide ja metallisulamite mehaanilised omadused

Materjal	Tihedus ρ , kg/m ³	Tõmbe- tugevus R_m , N/mm ²	Elastsus- moodul E , 10 ³ N/mm ²	Eri- tugevus R_m/ρ , km	Eri jäikus E/ρ , km
Ühesuunaliselt pikiarmeeritud klaasplast	2200	2100	70	96	3200
Kahesuunaliselt ristiarmeeritud klaasplast	1900	950	55	50	2840
Orienteerimata armatuuriga klaasplast	1700...1900	20...200	–	1,2...12	–
Titaanisulam	4500	700...950	110	15...20	2500
Madallegeerteras parendatult	7850	1600	210	21	2650
Duralumiinium	2800	450	72	17	2570

Süsinikplastides kasutatakse kõrgelastsusmooduliga (HM), ($E > 150 \cdot 10^3$ N/mm²) ja kõrgtugevaid ($R_m > 2500$ N/mm²) kiude. Madalelastsusmooduliga kiude konstruktsioonimaterjalides ei kasutata. Nendest valmistatakse voolu juhtivaid, soojust kaitsvaid, antifriktsioonseid ja teisi vähekoormatud detaile. Süsinikplastides kasutatakse sideainena mitmesuguseid vaike: temperatuuridel kuni 200 °C kasutatakse sageli epoksüvaike, pikaajalisel töötamisel 250 °C juures kasutatakse fenoolvaike, kuni 330 °C aga polüamiidvaike. Süsinikarmatuuri korral on probleemiks nõrk adhesioon (märgumine) polümeersete sideainetega ja palju väiksem tugevus kihtidevahelisel nihkel, võrreldes klaaskiududega. Märgumise parandamiseks töödeldakse süsinikkiude erinevate meetoditega. Kõige enam kasutatakse söövitamist hapetega, määrdeainete väljapõletamist, apreeterimist (tärglist sisaldavate orgaaniliste pinnete pealekandmine) jne. Süsinikplastidel on omaduste anisotroopia palju teravamini väljendunud kui klaasplastidel, kuna armatuuri ja sideaine elastsusmoodulite suhe on süsinikplastidel 100:1 ja enam, klaasplastidel aga (20...30):1. Teisest küljest on süsinikplastid väga heade omadustega. Üks kõige hinnalisem omadus on nende suur väsimustugevus ja vibratsioonikindlus, sest süsinikkiud summutavad mehaanilised võnkumised. Kuna süsinikkiududel on suurem elastsusmoodul (kuni $400 \cdot 10^3$ N/mm²), võrreldes klaaskiududega (kuni $200 \cdot 10^3$ N/mm²), siis koormamisel deformeeruvad süsinikkiud vähem ja seega deformeerub vähem ka polümeermaatriks. Ka ühikulise massi vastupidavuspiir on süsinikplastidel märgatavalt kõrgem kui klaasplastidel, mis teeb nad perspektiivseks materjaliks töötamiseks vibratsioonitingimustes (kopterite propeller, reaktiivmootori ventilaatorilabad jne). Tänu heale soojus- (võrdne titaani ja roostevaba terase omaga) ja elektrijuhtivusele kasutatakse süsinikplaste ka elektriküttekehade materjalidena. On ka teisi perspektiivseid kasutusalasid, mille täielik loetelu on toodud kirjanduses [8, 10, 18]. Süsinikplastide orienteeruvad omadused on toodud tabelis 6.3.

Süsinikplastide omadused

Kiu materjal	Tihedus ρ , kg/m^3	Tõmbetugevus R_m , N/mm^2	Elastsusmoodul E , 10^3N/mm^2	Survetugevus R_m^s , N/mm^2	Nihketugevus τ , N/mm^2	Eritugevus R_m/ρ , km	Erijäikus E/ρ , km
Kõrgelastsusmooduliga süsinikkiud	1500	1000	180	800	50	67	12000
Kõrgtugev süsinikkiud	1500	1500	110	900	80	100	7300

Boorplastides püütakse esmajoones realiseerida boorkiudude kõrget jäikust (E kuni $450 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$) ja tugevust ($R_m = 3500 \text{ N/mm}^2$) ning omaduste püsivust kuni $500 \text{ }^\circ\text{C}$. Boorplastidele on omane hea survetugevus, 30...40% suurem kui tõmbetugevus (teiste PMKM puhul on olukord vastupidine), mis on tingitud eelkõige boorkiudude suuremast läbimõõdust (90...150 μm , süsinikkiudude läbimõõt 5...7 μm). Boorplastide puudus on väiksem plastsus ja lõõgisitkus, kuid neid omadusi saab tõsta, kui lisaks boorkiududele kasutada teisi kiude (nt klaas- ja süsinikkiude).

Enamik boorplaste toodetakse prepreg'idest, mis on läbi immutatud epoksüvaiguga. Selleks, et tagada nende pikajalised omadused, säilitatakse ja toimetatakse prepreg'e tarbijale külmutatud olekus. Näiteks säilivad sellised boorepoksükomposiidid $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ juures aastaid [8-I, lk 238].

Kõige enam kasutatakse epoksüvaigust sideainet, mis talub temperatuuri kuni $180 \text{ }^\circ\text{C}$. Kõrgemate temperatuuride korral kasutatakse räniorgaanilisi ja teisi sideaineid [8-I, lk 246]. Boorkiudude põhiline puudus on nende kõrge hind (ca 220 USD/kg), kui nt SiC-kiudude hind on 85 USD/kg. Boorplastide kasutamisel survekoormusel töötavate raamide valmistamiseks lennukiehituses saab raami massi vähendada kuni 20...30%, võrreldes alumiiniumisulameist raamidega.

Organoplastid on vanimad PMKM, kus armatuurina kasutatakse mitmesuguseid orgaanilisi kiude. Kaua kasutati armatuurina naturaalkiude – puuvilla-, lina- ja tselluloosikiude. Nende vähese tugevuse ja jäikuse tõttu on naturaalkiud aegapidi asendatud mitmesuguste sünteetiliste kiududega, nagu kapron, lavsaan jt. Viimaste puudus on väiksem inertsus lahustite ja temperatuuri suhtes, võrreldes klaas-, grafiit- või boorkiududega.

Praegu valmistatakse suurem osa organoplaste tugevatest ja jäikadest kevlar-tüüpi aramiidkiududest. See võimaldab organoplastide sideaineks kasutada kõrgema polümerisatsioonitemperatuuriga vaike, nt silikoonvaike. Parimad omadused saadakse aga kiududega analoogse koostisega aramiidvaike kasutades. Normaalingimustes kasutatakse siiski epoksüvaiku, mis on palju tehnoloogilisem ja odavam. Ühesuunaliselt orienteeritud 60%-se kevlarkiudude kontsentratsiooniga epoksüvaigust sideainega organoplasti tõmbetugevus ulatub pikikiudu 1400 N/mm^2 ja ristikiudu ainult 28 N/mm^2 , elastsusmoodul survel pikikiudu – $85 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$ ja ristikiudu – $5,6 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$. Kuna sellise organoplasti tihedus on väike (1350 kg/m^3), siis eritugevus on suurem kui terastel, kuid jäikuse poolest jäävad nad viimastele alla (keskmine teraste elastsusmoodul on $200 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$). Organoplastidel on suur lõõgisitkus ($0,5...2,0 \text{ MJ/m}^2$), mistõttu saab neid kasutada dünaamilistel koormustel töötavate detailide valmistamiseks. Organoplasti puudus on madal survetugevus, mille kompenseerimiseks kasutatakse sageli jäigemaid klaas-, boorsüsinik- ja teisi kiude.

Mõningate boor- ja organoplastide omadused on toodud tabelis 6.4.

Epoksüvaigust sideainega boor- ja organoplastide omadused

Armatuur	Tihedus ρ , kg/m ³	Tõmbetugevus R_m , N/mm ²	Elastsusmoodul E , 10 ³ N/mm ²	Survetugevus R_m^s , N/mm ²	Löögisitkus KJ/m ²	Eritugevus R_m/ρ , km	Erijäikus E/ρ , km
Aramiidkevlarkiud	1330	517	31	170	1950	39	2300
Klaasriie	1670	323	17	300	577	19	1000
Boorkiud, $R_m = 2000 \dots 2800$ N/mm ²	2000...2200	1200	250	1500	84	60	12500

Eraldi rühma KM moodustavad **süsinikkiududega armeeritud süsinikmaatriksiga komposiitmaterjalid (SMKM, grafiitkomposiidid)**. Erinevalt süsinikplastidest ei valmistata grafiitkomposiitide koostisosi eraldi, vaid need moodustuvad üheaegselt valmistamise käigus. See annab materjalile rida eeliseid tavalise isotroopse struktuuriga grafiidiga võrreldes; grafiitkomposiitide kiuline struktuur suurendab eelkõige nende sitkust ja tugevust. SMKM tehnoloogia koosneb järgmistest operatsioonidest:

1. Armatuuri vormimine (mähkimine, kokkupressimine, tekstiiliks töötlemine jne). Selleks kasutatakse orgaanilisi materjale, mitte aga süsinikkiude. Ruumilise kiudude asetusega toorikute saamiseks kasutatakse tihti (samamoodi nagu PMKM puhul) prepegide mähkimist.
2. Orgaanilise karkassi immutamine kivisöe- või polümeervaiguga, vajaduse korral ka selle kõvendamine.
3. Tooriku kõrgetemperatuurne töötlemine kahes etapis:
 - karboniseerimine (koksistamine) temperatuuril 800...1500 °C inertgaasis või vaakumis,
 - grafitiseerimine temperatuuril 2300...3000 °C vaakumis.

Karboneerimisel laguneb orgaaniliste ainete struktuur, lenduvad gaasilised produktid ja tekib poorne ning termopüsiv koks amorfse struktuuriga. Süsinikusisaldus koksis on 60...90 %, sõltuvalt vaigu tüübist. Temperatuuri tõus karboniseerimisel peab olema aeglane – mõnikümmend kraadi tunnis, et vältida tooriku pragunemist. Mida suurem on toorik, seda aeglasemalt tuleb temperatuuri tõsta. Tavaliselt kestab karbonisatsioon 300 tundi ja enam. Karbonisatsiooni tulemuseks on nõrk ja poorne termoisolatsiooni tüüpi materjal. Poorsuse likvideerimiseks ja tiheduse tõstmiseks karboneeritud materjal immutatakse ja kuumutatakse korduvalt. Karboneerimiseks on vaja keerulist aparatuuri, mis tagaks stabiilsed omadused.

Koksi grafitiseerimisel temperatuuril kuni 3000 °C moodustub grafiitstruktuur, kusjuures süsinikusisaldus kasvab kuni 98 %. Selles olekus võib materjali pikka aega kasutada vaakumis või inertses (argoon, lämmastik, CO₂) keskkonnas temperatuuril 2500...3000 °C, õhus aga või teistes oksüdeerivates keskkondades umbes 400...700 °C-ni sõltuvalt gaasi niiskusest.

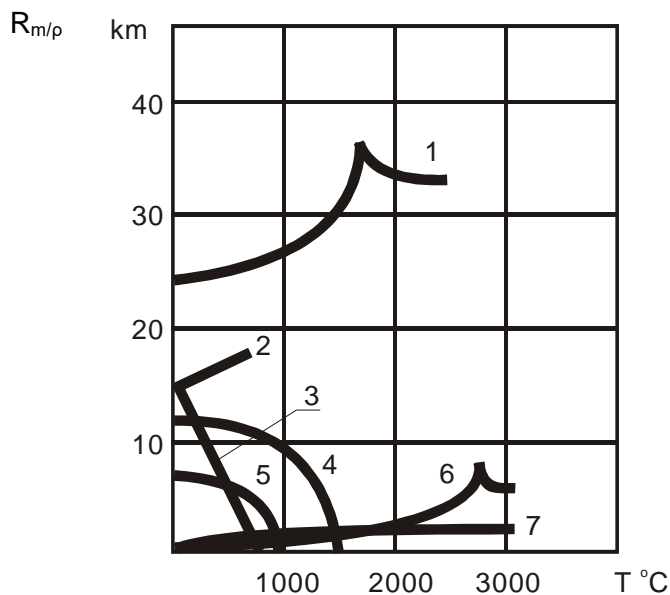
SMKM saamiseks gaasifaasist sadestamise teel kasutatakse gaasilisi süsivesikuid: metaan, atsetüleen, bensool jt, mis tungivad poorsesse toorikusse ja kõrge temperatuuri juures lagunevad, mille tulemusena süsinik sadestub kiudude pinnale, tihendades toorikut järkjärgult. Pürolüüssidestusprotsess toimub muhvelahjudes gaasi madalal rõhul või, vastupidi, gaasi kõrgel rõhul. Mõlemal juhul toimub sadestumine kiiremini kui normaalarhul. Meetodi

eelis on lihtsus, protsessi korratavus, maatriksi suur tihedus. Võrreldes immutamisega on see meetod aeglasema sadestumiskiiruse tõttu väiksema tootlikkusega.

Tavaliselt karboniseeritud SMKМ-I on madalad mehaanilised omadused: paindetugevus – $130/75 \text{ N/mm}^2$, elastsusmoodul – $15/8 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$ (lugejas on tulemus toatemperatuuril, nimetajas – $500 \text{ }^\circ\text{C}$ juures), tihedus – $1650 \dots 1700 \text{ kg/m}^3$, sõltuvalt sideaine vaigu liigist. Selles olekus materjali saab kasutada kõrgetemperatuurse isolatsiooni- (ahju ekraanid, vooder) või liugelaagrimaterjalidena.

Grafitiseerimisel materjal tiheneb, kuna poorne koks muutub tihegrafiidiks, mis “parandab” struktuuri defektid, nagu vakantsid, ja süsinikusisaldus tõuseb $95 \dots 98\%$ -ni. Selline SMKМ saavutab paindetugevuse 1000 N/mm^2 ja enam, elastsusmoodul $200 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$ ja tiheduse $2000 \cdot \text{kg/m}^3$.

SMKМ kui konstruktsioonimaterjali iseärasuseks on, et temperatuuri tõusuga kuni $2000 \dots 2200 \text{ }^\circ\text{C}$ -ni materjali tugevus ja elastsusmoodul ei vähene, vaid kasvavad (joonis 6.10). Nende materjalide kasutustemperatuur võib küündida $3200 \dots 3500 \text{ }^\circ\text{C}$ -ni, mil algab grafiidi intensiivne aurustumine. Oksüdeeruvas keskkonnas (nt õhus) algab sõe intensiivne oksüdeerumine sõltuvalt keskkonna niiskusest juba $350 \dots 500 \text{ }^\circ\text{C}$ juures. Selle vähendamiseks kaetakse SMKМ pind kaitsvate pinnetega (silitsiidid, boriidid jt). Seejuures tuleb silmas pidada, et kontaktpinnal ei tekiks kergsulav süsiniku ja metalli eutektikum; see tekitab teatud probleeme grafiitkomposiitide kasutamisel metallkonstruktsioonides.



Joonis 6.10. Konstruktsioonimaterjalide eritugevuse sõltuvus töötemperatuurist:

- 1 – ühesuunalise süsinikkomposiitmaterjali paindeproov, 2–7 – tõmbeproovid:
- 2 – ühesuunaline süsinikkomposiitmaterjal, 3 – tehniline titaan,
- 4 – kuumustugev niklisulam, 5 – roostevaba teras,
- 6 – isotroopne (kolmesuunaline) süsinikkomposiitmaterjal,
- 7 – tihe konstruktsioonigrafiit (tuumagrafiit)

7. KOMPOSIITMATERJALIDE KASUTUS

Kõrge maksumuse (100...200 korda kõrgem tavalistest metallisulamitest) ja keeruka valmistamistehnoloogia tõttu kasutatakse komposiitmaterjale tingimustes, milles klassikalised metallisulamid ei ole töövõimelised: ülikõrgetel ja -madalatel temperatuuridel, agressiivsetes keskkondades, tsüklilisel koormusel, vibratsioonitingimustes jne. Sellised tingimused on lennukites, kosmoseaparaatides, tuumaenergeetika seadmetes. Tulenevalt mõnest komposiitmaterjali spetsiifilisest omadusest on õigustatud selle kasutamine ka masinaehituses, raudteetranspordis, laevaehituses, keemiatööstuses, elektrotehnikas ja mujal. Kõik sõltub komposiitmaterjali tõhususest, mille all mõistetakse majanduslikku külge ja ka teisi tegureid, nt ökoloogilisust, turvalisust jt. Kui komposiitmaterjale kasutatakse autos, reisi- ja sõjalennukeis, tuleb silmas pidada nende masinate 1 kg hinda (suhe on 2:30:150), 1 kg kokkukõhitud lennuki massis on mitusada korda tõhusam kui auto puhul.

Enim kasutatakse komposiitmaterjale autotööstuses, sest autode saritootmine ja autotööstuse traditsiooniline huvi uute materjalide ja tehnoloogiate vastu soodustavad seda.

Sõiduauto kere valmistatakse peamiselt plekist külmstantsimise teel, kere vähekoormatud osad (kapott, poritiivad, logarid jt) aga klaasplastist. Veel enam tehakse klaasplastist keeruka kujuga kabiinidetaile.

Komposiitmaterjalid õigustavad ennast autotööstuses hea korrosioonikindluse, müra- ja vibratsioonisummutavuse tõttu. Kuna veoautomudelid vahetuvad harvemini kui sõiduautomudelid, ja veoautode toodang on väiksem (tavaliselt valmistavad Ameerika firmad ühte mudelit 10 000–30 000 tk aastas), siis on seal õigustatud keerukate detailide vähetootlik klaasplastist käsitsi vormimine. Nii valmistatakse näiteks suurte veoautode kabiine, mille eelis metallkabiiniga võrreldes on see, et neid saab teha tervikuna; kabiini seinte valmistamisel kombineeritakse vahtplastist vineeri või metalliga. Sama teed on mindud ka põllumajandusmasinate kabiinide valmistamisel, kus vibratsiooni- ja mürasummutavus, tolmu ja soojust isoleerivad omadused on vajalikud töötaja mitmetunniseks intensiivseks tööks.

Reisilennukeid kasutatakse vähemalt 15 aastat, tegelikult muidugi kauem, transpordilennukeid ekspluateeritakse keskmiselt 4000 tundi aastas. Seetõttu on lennukite puhul väga olulised väsimus- ja korrosiooniprobleemid. Massi piirangud (mitte rohkem kui 50% lennuki kandevõime) teevad komposiitmaterjalid väga perspektiivseks lennukitööstuses esmajoones nende eriomaduste (eritugevus ja -jäikus) tõttu.

Klaasplastist valmistatakse praktiliselt kõiki väikelennukite keredetaile (plaaner, tiivad, saba, propeller), kus nad on tõhusamad duralumiiniumist. Suurtes lennukites valmistatakse klaasplastist vähekoormatud detaile (mootori kapott, müraisolatsioon, vaheseinad).

Boorplastid on jäigad ja vastupidavad survekoormustele, neist tehakse profiile (nurk-, karp- jt profiile, torusid), mida kasutatakse lennuki kandekonstruktsioonis.

Üks vastutusrikkaim lennukidetail on reaktiivmootori laba. Mootori kompressori (ventilaatori) piirkonnas on laba temperatuur umbes 100...150 °C, kompressori tagaosas ulatub see juba 600...650 °C-ni. Veel kõrgem on temperatuur reaktiivmootori turbiinis, sest gaasiturbiini kasutegur sõltub oluliselt gaasi temperatuurist turbiini ees. Viimane on aga piiratud turbiinilabade materjali kuumustugevusega. Kõige paremad valatud niklisulamid töötavad temperatuurini 970...990 °C. Samal ajal on reaktiivmootori turbiini soovitud teoreetiline temperatuur 1200...1300 °C.

Lennuki DC10 ventilaatori labadel on metallsüdamik, mis tagab nende kindla kinnituse rootoriga, ja löögikindel süsinikplastist välisosa. Rootori ning mootori siseseina vaheline väike pilu tõstab ventilaatori surveastet; laba purunemisel ei vigasta kerged plastkillud mootorit.

Lennuki IL-62 mootori gaasiturbiinis on labadeks kasutatud Ni-Co baasil niidikujuliste Al_2O_3 monokristallidega armeeritud metallkomposiitmaterjale. See komposiit on võimaldanud vähendada lennuki IL-62 massi 17% ja suurendada lennukaugust 15%. Komposiitmaterjale on sõjalennukites kasutada lihtsam kui reisilennukites, kuna sõjatehnika kasutusaeg on lühem ning hinnaküsimus pole nii terav. Samal ajal on aga sõjatehnika koormused suuremad ja nendelt soovitakse lahingulist visadust, s.o tööfunktsioonide täitmist ka vigastuse korral. Näiteks ei tohi kütusepaagi leke põhjustada paagi täielikku tühjenemist.

Sõjalennukites kasutatakse komposiitmaterjale peamiselt massi vähendamiseks, neist ehitatakse tiibade karkasse ja vooderdusi, vaheseinu, roolisüsteemi osi. Tarvitatakse metalseid komposiitmaterjale: boorkiuga armeeritud alumiiniumi, SAP-tüüpi materjale või süsinikplaste. Viimastest valmistatakse peale reaktiivmootorite labade ka radarite keresid, kuna nad on läbipaistvad raadiosagedustele.

Raudteel on vagunitel ja veduritel suur mass, keskmiselt 500...700 kg ühe reisija kohta. See asjaolu ja transpordivahendite pikk kasutusiga (20 ja rohkem aastat) nõuab kergeid ja vastupidavaid konstruktsioonimaterjale. Erinõuded esitatakse külmutus-, kallur-, paak- jt erivagunitele. Kuigi peamine materjal vaguniehituses on ja ka jääb metall (teras, malm, alumiiniumisulamid), kasutatakse aastast aastasse üha laialdasemalt komposiitmaterjale.

Viimased 20...30 aastat on Prantsusmaal, Jaapanis, USA-s kasutusele võetud ülikiired rongid (250...300 km/h). Nende rongide vagunid pole ehitatud traditsioonilistest materjalidest, mis eeldavad veduri suurt veojõudu, raskendavad rongi kiirendamist ja teevad ohtlikuks rongi pidurdamise.

Vaguni konstruktsioonides kasutatakse peamiselt klaasplaste (vaguni vooderdus, istmed, ukсед) ja löögikindlaid süsinikplaste (aknaraamid, vaguni põrand ja katus). Plastid vähendavad vaguni massi kuni 30%. Laialt kasutatakse soojus-, müra- ja tolmuisolatsiooniks ka organoplaste. Asendamatud on organoplastid vedelgaasi, hapniku, lämmastiku, propaani jt paakvagunite ehitamisel.

Surveanumad ehitatakse aramiidkiuga armeeritud organoplastist. Kuna surveanumad töötavad tõmbepingetele, siis eriti tulemuslik on aramiidkevlarkiud. Nagu nähtub tabelist 6.4, on kevlari tõmbetugevus poolteist korda suurem kui klaaskiul, löögisitkuse poolest on aga kevlararmatuuriga plastid väljaspool konkurentsi. Kevlararmatuuri kasutatakse prepreg'i-lindina survemahutite mähkimisel.

Üha laialdasemalt kasutatakse komposiitmaterjale ka ehituses. Kui põhilised ehitusmaterjalid olid ja on ka tulevikus raudbetoon, tellis, metallkonstruktsioonid ja puit, siis nende kõrval kasutatakse ka mitmeid mittemetalseid komposiitmaterjale. Võib nimetada kolme ehituses kasutatavat tõhusat komposiitmaterjali. Need on:

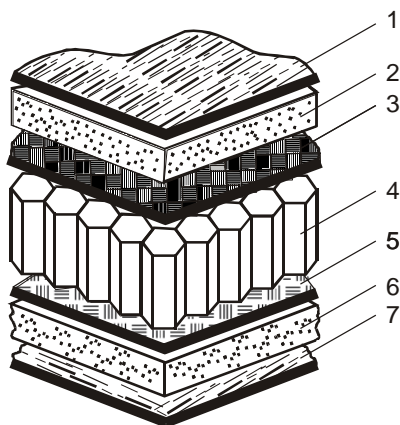
- puitlaastplaadid,
- katuse koorikkonstruktsioonid,
- sein ja lae kärgekstruktsioonid.

Puitlaastplaadid saadakse puitlaastude, saepuru ja sideaine (süntetilise vaigu) pressimise teel. Vaik tehakse vastavalt sellele, kas plaate kasutatakse ruumis või vabas õhus. Plaadid lamineeritakse väärispuidust spooniga või puitu imiteeriva paberiga ja neid kasutatakse lae ja seinte viimistlusmaterjalina ning mööbli, riulite jms valmistamisel, kus nad asendavad defitsiitset puitu.

Teine kasutusala on komposiitmaterjalidest koorikkatused, mis on tugevuselt võrreldavad metallkonstruktsioonidega. Plastkoorikkonstruktsioonid on aga metalsetest kergemad ja korrosioonikindlamad, neid saab valmistada tehases ja kohapeal ainult monterida (metallkonstruktsioone keevitatakse tavaliselt ehitusplatsil). Koorikute materjaliks kasutatakse enamasti polüestermatriksiga mitteorienteeritud armatuuriga klaasplasti paksusega kuni 10

mm. Kerguse tõttu saab koorikutega katta suuri pindu ilma toetuseta: näitusehalle, turu- ja spordihooneid.

Komposiitmaterjalide tõttu on saanud võimalikuks kokkupandavad, gofreeritud või täispuhutavad konstruktsioonid ja konteinerid. Need koosnevad lamedatest tehases kokkupandud sektsioonidest, mis laialitõmbamisel moodustavad võlvilise või sirge küljega mahulise konstruktsiooni, mida hoiavad koos pingul trossid või kerge õhu ülesurve siseruumis. Kärgekstruktsioonid on soojapidavad ja summutavad hästi müra, mistõttu neid kasutatakse seal, kus temperatuurikõikumised on suured. Tüüpiline kärkseina paneel on joonisel 7.1. Selle põhiosa on fenoolvaiguga immutatud paberist kärgtäidis, mille all ja ülal on klaasplasti kihid, mis koos kärkosaga moodustavad paneeli kandva osa. Tulekindluse ja akustiliste omaduste tagamiseks kaetakse paneel kipsplaadiga ja vajaduse korral ka viimistlus- või dekoratiivmaterjaliga. Lisaks tugevdatakse põrandapaneeli vineeriga.



Joonis 7.1. Komposiitkärkpaneeli ehitus: 1 – sisepind, orienteerimata klaasplast, 2, 6 – tulekindel kiht, kipsplaat, 3, 5 – kandev kiht, klaastekstiilplast, 4 – kärktäidis, immutatud paber, 7 – dekoratiivkate.

Toodud näited hõlmasid peamiselt üht komposiitmaterjalide klassi – plastkomposiitmaterjale, mida kasutatakse praegu kõige rohkem. Kuid tehnikas levivad üha laiemalt ka metallsed, keraamilised ja süsinikkomposiitmaterjalid.

Üks tähtsam metallkomposiitmaterjalide kasutusvaldkond on elektrotehnika, mille areng poleks võimalik ilma elektrikontaktideta. Kontaktid, mida kasutatakse elektriahelates, võivad olla väga erinevad: alates väikestest releedest kuni võimsate võrgulülititeni.

Nõrkvooluahelais (vool mikroamprites) on tähtis kontakti minimaaltakistus ja selle püsivus, et oleks tagatud elektroonikaseadme minimaalne häiritus ja töö stabiilsus. Selleks kaetakse kontaktid väärismetalliga või valmistatakse nad tervikuna väärismetallist.

Võimsates elektriahelates, kus voolud ulatuvad mitme tuhande amprini, on väikese elektritakistuse juures vaja säilitada kontakti kuumuspüsivus, kuna kontakti temperatuur tõuseb proportsionaalselt I^2R -ga. Seepärast peab kontaktmaterjal olema hea elektri- ja soojusjuhtivusega, rasksulav, mehaaniliselt tugev, erosiooni- ja korrosioonikindel jne. Mingi eheda metalliga on niisuguseid vastuolulisi omadusi võimatu tagada, seetõttu kasutatakse elektrikontaktides peamiselt komposiitmaterjalidest pseudosulameid.

Kõige rohkem on elektrikontakte keskvoolu- (15...20 A) ja tugevvooluahelates (≤ 100 A, ≤ 400 V). Need on elektrimootorite kontaktorid või madalpingeliinide lülitid. Nad koosnevad rasksulavast metalsest karkassist, mis tagab kontakti mehaanilise tugevuse ja erosioonikindluse, ja väikese elektritakistusega metalsest sideainest, mis parandavad pideva elektrit juhtiva faasi. Eriomaduste saamiseks kasutatakse lisandeid, mis parandavad kontaktide korrosioonikindlust, elektrikaare kustuvusvõimet, vähendavad hõõrdetegurit jne. Selle rühma

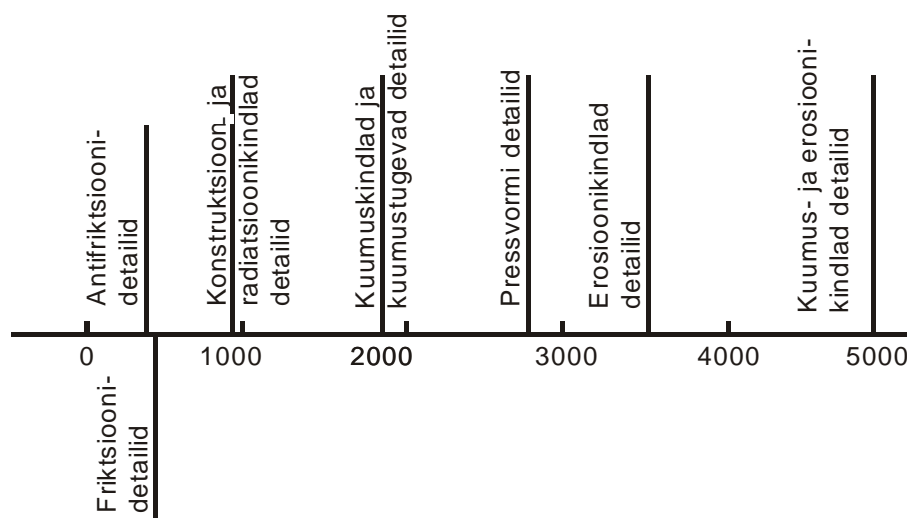
elektrikontakti materjali hulka kuuluvad pseudosulamid W-Cu, W-Cu-Ni, WC-Cu, W-Ag, Mo-Ag jt, aga ka kontaktid hõbeda ja kulla baasil Ag-Ni, Ag-CdO, Ag-CuO; erirühma moodustavad grafiidi alusel liugkontaktid.

W-Ag-kontaktid (30...50% Ag) on hea erosioonikindlusega ja stabiilse elektrijuhtivusega (eritakistus $\rho \leq 0,045 \mu\Omega \cdot m$), nad ei keevitu kokku tugevus elektrikaare. Korrosioonikindluse tõstmiseks viiakse kontaktimaterjali kuni 4% Ni. W-Cu-kontaktid ületavad W-Ag-kontakte kõikide omaduste poolest (v.a elektrijuhtivus, mis on poolteist korda väiksem), ja nad on odavamad.

Ka Ni ja Ag baasil kontaktid on head, kuid neil on kalduvus temperatuuril üle 1000 °C kokku keevituda. On kindlaks tehtud, et sellel temperatuuril kaadmiumoksiid aurustub (sublimeerub) aktiivselt, selle aurud on aga tugeva kaart kustutava omadusega. See asjaolu on võimaldanud luua pseudosulami AgCdO (10...15% CdO), mis on väga tõhus kesk- ja tugevvoolukontaktides (≤ 100 A). Elektriikaare toimel CdO aurustub ja kustutab kaare. See on levinud elektrikontakti materjal, mida kasutatakse elektrimootorite kontaktorites, auto-starterites, sulavkaitsmetes jne.

Liugkontaktidel peab peale kommuteerivatele kontaktidele esitatavate nõuete olema ka väike hõõrdetegur vasega. Seetõttu sisaldavad liugkontaktid tavaliselt grafiiti. Levinud liugkontaktid on elektrimootorite ja generaatorite harjad. Liugkontaktides kasutatakse tüüpilisi komposiitmaterjale, mis sisaldavad 10...70% grafiiti (vastavalt 20...30% vaske) ja metalseid lisandeid – seatina, tina jt. Vask moodustab materjalis pideva metallkarkassi, mille elektritakistus on kolm suurusjärku väiksem kui grafiidil (vastavalt 0,017 ja 40 $\mu\Omega \cdot m$). Kui grafiitmatriksis on poorsus üle 20...30%, immutatakse seda vasega, kui väiksem, siis grafiidi ja vase segu pressitakse ja paagutatakse. Heakvaliteetsed harjad tehakse grafiidist, mis on enne pressimist elektrolüütiliselt vasega kaetud.

Suhteliselt piiratud on keraamika- ja süsinikmaatriksiga komposiitmaterjali kasutus. Ülevaate süsinikkomposiitmaterjalide kasutamisest annab joonis 7.2.



Joonis 7.2. Süsinikkomposiitmaterjalidest detailide kasutusvaldkonnad

Süsinikkomposiitmaterjali kui antifriktsioonmaterjali kasutatakse jäätisemasina laagripuksides. Materjali eelis traditsiooniliste laagrimaterjalidega võrreldes on suur termokindlus. Töö käigus jahutatakse laagripukse perioodiliselt vedela süsihappega (-57 °C) ja soojendatakse kuuma veega (+80 °C). Peale heade antifriktsiooniliste omaduste ja termokindluse säilitavad süsinikkomposiitpuksid talitusomadused isegi pragunenuna materjali kiulise struktuuri tõttu.

Tuleb tähele panna, et süsinikkomposiitmaterjalid oksüdeeruvad kergesti õhus, eriti niiskes õhus temperatuuril 400...500 °C; kontaktis paljude metallidega moodustavad nad temperatuuril 900...1000 °C kergsulava eutektikumi, mistõttu saab süsinikkomposiite kasutada ainult vaakumis või neutraalses keskkonnas.

Seda puudust ei ole keraamilistel komposiitmaterjalidel, eriti oksiidmaatriksiga keraamilistel komposiitmaterjalidel. Neist kõige levinumad on tsirkoonium-, alumiinium-, kroom-, mangaanoksiidse maatriksiga ja keraamilise kiudarmatuuriga (mulliidiidist $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ja Al_2O_3 , Cr_2O_3) keraamilised komposiitmaterjalid, millest valmistatakse peamiselt tulekindlat vooderdist. Oksiidkeraamika puudus on suhteliselt madal termokindlus.

Selles mõttes on paremad räninitriidmaatriksiga (Si_3N_4) keraamilised komposiidid. Armeerimine mulliidi kiudkristallidega annab keraamilisele komposiitmaterjalile tulekindluse, mis on 6...7 korda suurem kui puhtal räninitriidil, mehaanilise tugevuse, mis pärast 200 termolööki langeb ainult 10...20% ja on mittemetalsete komposiitmaterjalide absoluutne rekord. Sellest komposiidist on tehtud kosmosesüstiku *Shuttle* esiosa.

Keraamiliste komposiitmaterjalide kasutamine koormatud masinaosades, mis ei tööta küll ekstreemsetes tingimustes, aga peavad olema pika tööeaga (seda ei nõuta kosmoseaparatuurilt) ja võimalikult odavad, on seotud tehnoloogiliste raskustega. Probleem on keraamiliste komposiitmaterjalide omaduste ebastabiilsus, mis on tingitud lähtepulbrite koostisest, struktuuri tundlikkusest tehnoloogiliste parameetrite suhtes, poorsusest ja paljudest teistest teguritest. Tehnoloogilistel teguritel on tehnokeraamika ja nende baasil komposiitide valmistamisel palju suurem osa kui teiste komposiitmaterjalide puhul. Just see asjaolu raskendab keraamiliste komposiitmaterjalide laialdast juurutamist. Näitena võib tuua jaapanlaste üldtuntud keraamilise plokiga jt osadega automootori saritootmisega seotud raskused. Põhi-probleemiks on materjali haprus laias temperatuurivahemikus (kuni 2000 °C). Uurimused näitavad, et seda tingib mitu tegurit, millest peamine on keraamilise materjali struktuuris teradele lisandite kogunemine. Mikroröntgenanalüüs näitab raua ja kaltsiumi, alumiiniumoksiidi, kroomi, nikli ja räni kompleksühendite – sialonide ja teiste habraste ühendite olemasolu teradel. Seetõttu on keraamiliste komposiitmaterjalide valmistamisel põhiülesanne saada puhtaid pulbreid. Samuti on senini probleemiks keraamika poorsus (ka kümnendiku protsendi tasemel) ja tehnoloogilised raskused keeruka kujuga detailide pressimisel.

Kuigi uurimusi keraamiliste komposiitmaterjalide valdkonnas tehakse nüüdisajal paljudes maades, on raske öelda, millal seda materjaliklassi hakatakse tehnikas laialdaselt kasutama.

Komposiitmaterjalid moodustavad väga “noore” konstruktsioonimaterjalide liigi. Nende kasutus aerokosmilises tehnikas e kõige jäigemates tingimustes sai alguse alles möödunud sajandi 50-ndatel aastatel. Kuid nende tootmine kasvab kiiremini, kui traditsiooniliste metalsete materjalide või mitteameritud plasti tootmine. Kahtlemata tehakse arenenud maades tõsiseid pingutusi ja peagi jõutakse selliste tulemusteni, et komposiitide hinnad vähenevad ja paljud neist muutuvad eksootilistest *advanced*-materjalide rühmast tavaliseks *basic*-materjalide rühmaks; nii on see tehnikas ikka olnud.

Suuri lootusi pannakse uue tehnokeraamika põlvkonna loomisele. Selle eeltingimus on avastused tugevusteooria ja hapra purunemise valdkonnas, samuti uued tehnoloogiad komposiitkeraamika saamisel. Nii põhjustab keraamika hapruse selle “mustus”, nt amorfse klaasi korral, mille vältimiseks on oluline tooraine puhtus ja tehnoloogiliste operatsioonide kontroll. Oluline on edasimineku süsinik- ja aramiidkiududega armeeritud materjalide osas. Seni jäävad nende kiudude head tugevusomadused suurel määral kasutamata sobilike maatriksvaikude puudumise tõttu.

Kuna erinevalt metallmaterjalidest on komposiitide omadused palju tihedamini seotud nende valmistamisviisiga, siis kindlasti täieneb ka tehnoloogia, kuid selle põhiprintsiibid vaevalt muutuvad.

8. KASUTATUD KIRJANDUS LÜHIKOKKUVÕTETEGA

1. **P. Mallick.** Fiber Reinforced Composites. Materials, Manufacturing and design. 1993. VB-71608.

Praegu üks paremaid väljaandeid komposiitidest, mis käsitleb tähtsamaid küsimusi nende valmistamistehnoloogiast, omadustest ja kasutusest. Kirjeldatakse kõiki peamisi KM klasse: metalseid, polümeerseid, keraamilisi ja grafiitseid. Raamat annab ülevaate KM põhilistest komponentidest, kaasa arvatud armatuuri eriliigid ja maatriksid, samuti on lühidalt kirjeldatud nende valmistamistehnoloogiat. Arusaadavalt ja ilma keerukate matemaatiliste arvutusteta käsitletakse komplitseeritud küsimusi KM tugevusest ja purunemisest. Üksikasjalikult on kirjeldatud mehaanilisi katsetusi ja neid mõjutavaid struktuuridefekte. Eraldi on raamatu lõpus käsitletud keraamiliste materjalide katsetamise omapära, mis on tingitud nende haprusest. Raamatu kaheldamatu väärtus on lahendustega harjutusülesanded iga peatüki lõpus. Just see osa näitab, et komposiidid on projekteeritavad, etteantud omadustega materjalid. Raamatut näitlikustavad veel ka suurepärased joonised, mis lihtsustavad arusaamist.

Eelmainitu teeb P. Mallicki raamatu vajalikuks mehhaanikatudengitele, kuid parem lahendus oleks selle täielik tõlge eesti keelde.

2. **Д. Карпинос, Л. Тучинский, Л. Вишняков.** Новые композиционные материалы. М., 1977. А-187482.

Üks esimesi kõrgkoolide õppevahendeid, kus esitatakse andmeid KM tehnoloogiast, omadustest ja kasutamisest. Raamat annab ülevaate komposiitide klassifikatsioonist, nende tugevuse ja purunemise mehhaanikast ja armeerimisviisidest. On käsitletud KM omaduste sõltuvust armatuuri ja koormuse suunast ja selle arvutamisest mõnede matemaatiliste mudelite abil. Kirjeldatakse peamiste armatuuriliikide saamise viise ja KM kui terviku valmistamist. Kuna komposiitmaterjalide klass areneb väga kiiresti, raamat aga ilmus juba üle 20 aasta tagasi, siis on selles käsitletud ainult kahte KM klassi – metalseid ja polümeerseid, kuid puuduvad andmed kõige uuemate keraamiliste- ja süsinikkomposiitide kohta. Raamatu kasutamine on ka praegu õigustatud, kuna komposiitide loomise ja kasutuse põhimõtted ei ole muutunud.

3. **E. Hornbogen.** Werkstoffe. Aufbau und Eigenschaften von Keramik-, Metall-, Polymer- und Verbundwerkstoffen, 1994. VB- 64453.

Saksakeelne materjaliõpetuse õpik kõrgkoolidele, kus on ülevaate komposiitide kasutamisest masinaehituses. On tudengitele kasulik ainetöö “Materjali- ja valmistustehnoloogia valik” tegemisel.

4. **W. Shatt.** Werkstoffe des Maschinen-, Anlagen- und Apparatenbaues. 7 Auflage. 1991. VB-59620.

Sisu poolest analoogne eeltooduga.

5. **Г. Фетисов, М. Карпман и др.** Материаловедение и технология металлов. Гл. 10. М., 2002.

6. **Ю. Солнцев, Е. Пряхин, Ф. Войткун.** Материаловедение. Гл. 9. М., 1999.

7. **Mel Schwartz.** Handbook of Structural Ceramics. 1992.

M. Schwartzi raamatu on kirjutanud tuntud tehnokeraamika spetsialist, kes on pikka aega töötanud USA aerokosmilistes firmades *Sikorsky Aircraft* ja *Martin Marietta* ja tehnolo-

keraamika aine õppejõuna San Diego ülikoolis. Raamat koosneb 9 peatükist: keraamiliste materjalide üldsätted, mehaanilised omadused, katsetusviisid ja standardimine, valmistamisviisid, lähtematerjalide iseloom, valmistamise kõrgetemperatuursed protsessid, löikematerjalid, konstruktsioonimaterjalid (tehnokeraamika), keraamiliste materjalide kasutamise perspektiivid. Nagu kõikides Ameerika väljaannetes uute materjalide kohta, on raamatus andmeid käsitletava probleemi kommertsüsimustest: materjalide ja tehnoloogia maksumusdest, marketingist, nende perspektiivist.

Tänapäeval on M. Schwartzi raamat üks ja põhjalikemaid trükiseid, mis käsitleb keraamiliste materjalide valmistamist, omadusi ja kasutamist. Kuid siiski on vähe tähelepanu pühendatud kiududega armeeritud komposiitidele. On ainult üks peatükk, kus arutletakse keraamiliste maatriksite armeerimise põhiprintsiipide üle.

8. **Г. Любин.** Справочник по композиционным материалам. Т. 1–2. М., 1988.

Venekeelne väljaanne on ingliskeelse raamatu *G. Lubin. Handbook of Composites* kaheköiteline tõlge. Esimeses köites tuuakse andmeid komposiitide lähtematerjalidest ja saamise viisidest: polümeervaikudest, klaas-, keraamilistest, boor-, süsinikkiududest. Üksikasjalikult kirjeldatakse uute kevlarikiudude saamise tehnoloogiat. Tuuakse eriliste komposiitide kasutuse näiteid mõnedes konstruktsioonides: kõrgsurveanumates, lennunduses, spordiinventaris, sõjatehnikas, kaitseriietuses jne (I peatükk). Teine köide käsitleb komposiitide valmistamistehnoloogia küsimusi: toodete konstrueerimise omapära, seadmestikku, pooltoodete (preg) saamist ja kasutamist. Vaadeldakse kõrgtootlikku mähkimismeetodit ja selle variante (II peatükk), materjali uurimismeetodeid (III peatükk), KM kasutuse kogemusi ja perspektiive (IV peatükk). Andmed metalse, keraamilise ja süsinikmaatriksiga komposiitidest raamatus puuduvad, mistõttu võib seda lugeda veidi vananenuks.

9. **В. Васильев, В. Протасов и др.** Композиционные материалы. М., 1990 (*tõlge inglise keelest*).

Väiksema mahuga, võrreldes eelneva käsiraamatuga. Põhitähelepanu, nagu seda autorid ka ise deklareerivad, on printsiibi “materjali omadustelt konstruktsiooni omadustele” realiseerimisel. Vastavalt sellele esitatakse raamatus hulgaliselt konstruktsioonide arvutamise näiteid: surugaaside balloonid, erikujudega talad, torud, koorikud, paneelid jne.

10. **D. Chung.** Carbon Fiber Composites. 1994. VB-71596.

Monograafia on uuem väljaanne, kus on terviklikult käsitletud süsinikkiudude valmistamist, omadusi ja kasutamist. Raamatu eelis on raskete küsimuste arutamine ilma keeruka matemaatilise põhjendusega. Käsitletakse süsinikkiududega materjale polümeer-, metall-, keraamilis-, süsinik- ja hübriidmaatriksitega. Iga mainitud materjali kohta on toodud nende kõige tähtsamad omadused, valmistamise tehnoloogia erinevus ja ratsionaalne kasutusala.

11. **M. Taya. R. Arsenault.** Metal Matrix Composites. 1989. VA-71550.

Raamatus käsitletakse KM tugevuse ja purunemise mehaanika küsimusi. Tekstist arusaamiseks peab lugejail olema hea matemaatiline ettevalmistus.

12. **L. Pilato.** Advanced Composite Materials. 1994. VB-77502.

Hästi illustreeritud populaarteaduslik raamat (ligi 200 lk), mis annab algteadmised eri liiki komposiitidest ja nende kasutamisest.

13. **R. Gibson.** Principles of Composite Materials Mechanics. 1994. VB-70461.

14. **T. Clyne.** An Introduction to Metal Matrix Composites. 1995. VB-70541.
15. **C. Harper.** Handbook of Plastics, Elastomers and Composites. 1996. VB-83661.
16. Ingenieur Werkstoffe. VDI-Berichte. 1995. VA-45054.
- Üks vähestest (lisaks 3 ja 4) TTÜ raamatukogus olevatest saksakeelsetest õpikutest, kus käsitletakse KM temaatikat.
17. Углеродные волокна и углекомпози́ты / Под ред. Э. Фитцер. М., 1988. (*tõlge inglise keelest*). А-251003.
18. Composite Materials. Fatigue and Fracture. 1995 (*artiklite kogumik*). VB-81007.
19. **R. Lowden.** Ceramic Matrix Composite. Advanced High Temperature Structural Materials. 1995. VB-81430.
20. **J. Reddy.** Mechanics of Laminated Composite Plates. Theory and Analysis. 1997. VB-77742.
21. **J. Mark, C. Lee, P. Bianconi.** Hybrid Organic-Inorganic Composites. *Artiklite kogumik*. 1994. VB-76553.
22. **A. Goldman.** Prediction of the Deformation Properties of Polymeric and Composite Materials. 1988. VB-71608.
23. **J. Hult, F. Rammerstorfer.** Engineering Mechanics of Fibre Reinforced Polymers and Composite Structures. 1994. VB-70840.
24. Композиционные материалы. Справочник в 8-ми томах / Под ред. Л. Браутман, Р. Крок. М., 1978 (*tõlge inglise keelest*).
25. **D. Arensburger, P. Kulu, J. Kübarsepp.** Metalliopetus ja metallide tehnoloogia, III osa. Materjali ja tehnoloogia valik, 1999.
26. **W. Callister** Materials Science and Engineering, I–V trükk. 1994–2000.