



TALLINNA TEHNIKAKÕRGKOO

Fiona Voolaine

**INFOMATERJAL
ETRA BALTI AS-LE
PLASTMAATRIKSIGA
KOMPOSIITMATERJALIDEST**

LÕPUTÖÖ

Mehaanikateaduskond
Tehnomaterjalide ja turunduse eriala

Tallinn 2013

SISUKORD

Lühendite loetelu	5
Sissejuhatus	6
1. Komposiitmaterjalid	8
1.1. Komposiitmaterjalide liigitamine.....	8
2. Polümeerkomposiidid	10
2.1. PMKM eelised.....	10
2.2. PMKM puudused	10
2.3. Levinud plastmaatriksid	10
3. PMKM toodete valmistamisprotsessid	14
3.1. Survevormimine	16
3.2. Pultrusioonmeetod.....	16
3.3. Mähkimine	17
3.3.1. Pikiringmähkimine	18
3.3.2. Tangentsiaalringmähkimine	18
3.3.3. Spiraalristimähkimine	19
3.3.4. Spiraalringmähkimine	19
3.4. Kontaktvormimine	19
3.5. Vaakumvormimine.....	21
4. PMKM mehaaniliste näitajate määramine.....	23

4.1.	Tõmbeteim	23
4.2.	Kõvadusteim.....	26
4.3.	Paindeteim.....	27
5.	PMKM kvaliteedi kontroll	28
6.	PMKM koostis ja omadused.....	29
6.1.	Klaasplastid	29
6.2.	Süsinikplastid	30
6.3.	Boor- ja organoplastid.....	31
7.	Plastmaatriksiga komposiitmaterjalide kasutusvaldkonnad	33
8.	Töös kajastamist leidnud materjalid	38
8.1.	Calaumid 1200 (PA 12 G).....	38
8.2.	Oilamid (PA 6G +õli).....	39
8.3.	Lubramid 600 T (PA 6 G + tahked määrdeained).....	42
8.4.	Nylatron (PA 6+molübdeensulfiidi pulber)	44
8.5.	PVC-C	46
8.6.	PTFE+grafiit.....	48
8.7.	EP GC (epoksü+kootud klaaskiud riie).....	50
8.8.	Nyrim	52
	Kokkuvõte	55
	Summary	56
	Viidatud allikad	57
	Lisa 1. Nylatroni tõmbegraafik.....	59
	Lisa 2. Oilamidi tõmbegraafik.....	60

LÜHENDITE LOETELU

MMKM- metallmaatriksiga komposiitmaterjal

PMKM- plastmaatriksiga komposiitmaterjal

SMKM- süsinikmaatriksiga komposiitmaterjal

KMKM- keraamilise maatriksiga komposiitmaterjal

EP- epoksüvaik

EP-GC- epoksüvaik; kootud klaaskiud riie

PF- fenool(aldehüüd)vaik

PA- polüamiid

PE- polüetüleen

POM-C- polüatsetaal

PVC- polüvinüülkloriid

PVC-U- polüvinüülkloriid; plastifitseerimata

PVC-C- polüvinüülkloriid; kloreeritud

PTFE- polümetüülmetakrülaad

PMC- plastic matrix composite materials/plastmaatriks komposiitmaterjalid

SISSEJUHATUS

Tänapäeva kiire tööstuse arenguga on kasvanud ka tootmisprotsesside keerukus ning suurenenud nõudmised materjalidele. Enam ei piisa tavalistest ja enimlevinud tööstusplastidest, vaid kasutatakse uusi efektiivsemaid komposiitmaterjale, mida võib pidada suurimaks läbimurdeks materjalide ajaloos. Komposiitmaterjalid on multifunktsionaalsed materjalid, millel on enneolematud mehaanilised ja füüsikalised omadused, mida saab muuta vastavalt kasutatava valdkonna nõudmistele. Paljud komposiitmaterjalid omavad head vastupidavust kõrgetele temperatuuridele, korrosioonile, oküdeerumisele ja kulumisele. Just need unikaalsed omadused pakuvad mehaanikainsenerile enneolematuid disaini võimalusi, mis pole tavaliste monoliitmaterjalidega võimalik. Lisaks paljud komposiitmaterjalide tootmisprotsessid on hästi kohandatavad, tootmaks suuri ja keerukaid ehitisi, mis lubab osade tugevdamist, vähendades tootmiskulusid.

Kuna komposiitmaterjale kasutatakse üha rohkem, suurenevad sellega ka erinevad kasutamismõisted ja tootmise tehnoloogiad ning hea ülevaate omamine parimatest komposiitmaterjalidest ning nende omadustest, on tänapäeval igale mehaanikainsenerile kohustuslik. Sellest tingitult tekkis vajadus luua Etra Balti AS-le kaasaegne ja koondatud koolitusmaterjal komposiitmaterjalidest, mida kasutades on müügiinseneridele võimalik anda kiire ja selge ülevaade erinevatest komposiitmaterjalidest ning nende omadustest ja tootmiseripäradest. Etra Balti AS on tööstuslike kaupu müüv ettevõtte, mille üheks suurimaks artiklikaks on just plastid. Kuna komposiitmaterjalid on tänapäeval aina populaarsemad siis selle materjali abil on müügiinseneridel mugav ja lihtne anda klientidele ülevaade plastmaatriksiga komposiitmaterjalidest ning vastavalt kliendi vajadusele sobivad materjali soovitada.

Komposiitmaterjalid jagunevad neljaks: metallmaatriksiga komposiitmaterjalid (MMKM), plastmaatriksiga komposiitmaterjalid (PMKM), süsinikkiudmaatriksiga komposiitmaterjalid (SMKM)

ja keraamilise maatriksiga komposiitmaterjalid (KMKM). Teema koondamiseks ja parema ülevaate saamiseks uurib antud töö ainult plastmaatriksiga komposiitmaterjale, nende valmistamisprotsesse, tehnilisi näitajaid, koostist ja omadusi ning rakendusvaldkondi. Lisaks teoreetilisele tööle on loodud 8 PMKM materjali täpsem kirjeldus näidistahvlile, mille eesmärk on müügiinseneridele anda veel paremat arusaama ja ülevaadet plastmaatriksiga komposiitmaterjalidest.

1. KOMPOSIITMATERJALID

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

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

Maatriks annab materjalile vormi, monoliitsuse ning tagab koormuse ümberjaotumise armatuuri elementide (kiudude) vahel. [1:9]

1.1. Komposiitmaterjalide liigitamine

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

Komposiitmaterjalide liigitamine valmistamisviisi alusel

Komposiitmaterjalide valmistamisviise on kolm:

1. Valamine
2. Pressimine
3. Mähkimine

Mõningaid komposiitmaterjale saab valmistada kõigi kolme meetodiga (polümeeride baasil), mõningaid aga kahe või isegi ühe meetodiga (grafiidi või keraamika baasil).

Komposiitmaterjalide liigitamine kasutamisvaldkonna järgi

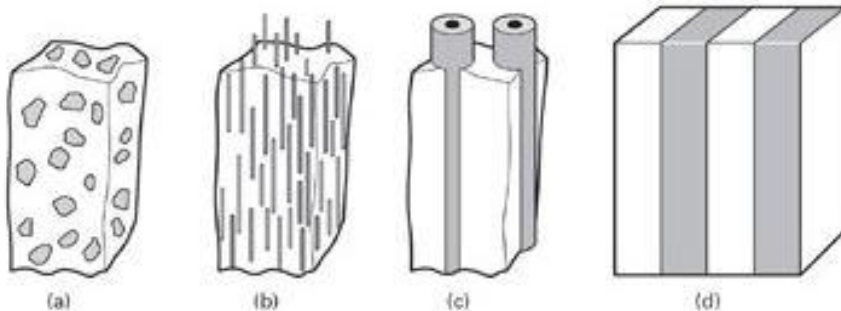
1. Üldkonstruktiivsed komposiitmaterjalid (masinaelemendid)
2. Kuumuskindlad komposiitmaterjalid (turbiinide labad)
3. Kuumuspüsivad komposiitmaterjalid (põlemiskambrid)
4. Erihõõrdeomadustega komposiitmaterjalid (liuglaagrid, piduriklotsid)
5. Löögikindlad komposiitmaterjalid (soomusvestid, kaitseriided, sporditarbed)
6. Soojuslike eriomadustega komposiitmaterjalid (tulekindlad, soojusisoleerivad)

Komposiitmaterjalide liigitamine maatriksi koostise järgi

1. Metallmaatriksiga komposiitmaterjalid (MMKM)
2. Keraamilise maatriksiga komposiitmaterjalid (KMKM)
3. Plastmaatriksiga komposiitmaterjalid (PMKM)
4. Süsinikmaatriksiga komposiitmaterjalid (SMKM)

Komposiitmaterjalide liigitus armeeritavate elementide kuju järgi

1. Pulbrilise armatuuriga komposiitmaterjalid (joonis 1.1a)
2. Diskreetse või pideva kiudarmatuuriga komposiitmaterjalid (joonis 1.1b,c)
3. Kihtstruktuuriga komposiitmaterjalid (joonis 1.1d) [1:9]



Joonis 1.1 Komposiitmaterjalide armatuurid a-pulbriline armatuur, b – diskreetne kiudarmatuur, c- pidev kiudarmatuur, d- kihtstruktuuriga armatuur [2]

2. POLÜMEERKOMPOSIIDID

Tänapäeval valmistatakse tööstuslikult väga laias valikus PMKM tooteid: suruõhu ballooneid, raketimootorite korpused, auto- ja raudteetsisternid, torud, spordiinventar jne.

2.1.PMKM eelised

PMKM eelisteks 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.

2.2.PMKM puudused

PMKM puudused on suhteliselt väike jäikus, madal soojus- ja kiirguspüsivus, hügroskoopsus, füüsikalise-mehaaniliste omaduste muutumine vananedes ja keskkonnategurite mõjul. Enamik puudusi on tingitud polümeersest maatriksist. [1:89]

2.3. Levinud plastmaatriksid

Polümeerplastkomposiitide peamine eelis võrreldes teiste komposiitmaterjalidega on valmistamise lihtsus, tehnoloogilisus, odavus ja madal tihedus.

Epoksüvaigud (EP) moodustavad üle 90% kõikidest plastkomposiitide sideaineks kasutatavatest vaikutest. Nende eelis on hea töödeldavus, neist saab valmistada eelimpregneeritud materjale, millest hiljem valmistatakse plastkomposiittooteid. Samuti saab epoksüvaiku kasutada näiteks spordisaalide ja tööruumide põranda katmiseks, kate talub tihedat käimist ning on vastupidav (joonis 2.1).

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°C. Nende kõvenemisel ei ole vaja kasutada suuri surveid, mis võiks vigastada habrast armatuuri. Teatud puuduseks võib lugeda epoksüvaikude teistest vaikudest mõnevõrra väiksemat töötemperatuuri. Võrreldes polüester- ja fenoolvaikudega on neil paremad tehnoloogilised- ja talitusomadused. Seetõttu on plastkomposiitides epoksüvaikude kasutamine laialdaselt levinud. [1:11]



Joonis 2.1 Epoksüvaiguga kaetud põrand [3]

Polüestervaikudest valmistatakse peamiselt kergkoormatud detaile (mööbel, kerged vaheseinad laevaehituses jne.). Näiteks joonisel 2.2 on kujutatud polüestervaiguga kaetud paati. 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 siduvaid aineid. Tabelis 2.1 näete epoksü- ja polüester vaikude omaduste võrdlust. [1:12]



Joonis 2.2 Polüestervaiguga kaetud paat [4]

Tabel 2.1

Võrdlus epoksü- ja polüester vaigude omadustest [1:11,12]

	Epoksüvaigud	Polüestervaigud
Tihedus	1100...1200 kg/m ³	1100...1200 kg/m ³
Tõmbetugevus	30...100 N/mm ²	35...70 N/mm ²
Survetugevus	80...140 N/mm ²	70...250 N/mm ²
Elastsusmoodul	2400...4200 N/mm ²	2100...4600 N/mm ²
Katkevenivus	2...9%	1...5%
Kahanemine kõvenemisel	2...9%	15...20%

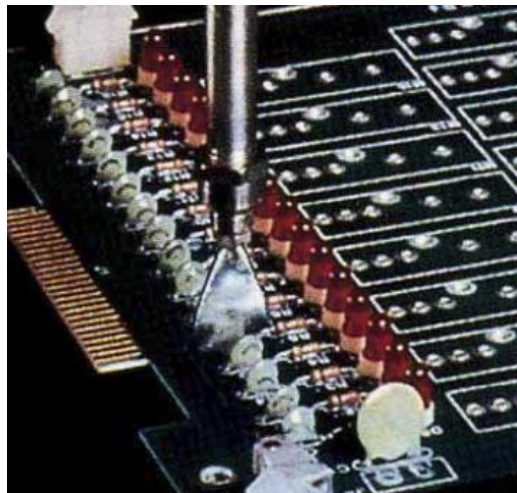
Fenool(aldehüüd)vaigud (PF) on fenoolide ja aldehüüdide polükondensatsiooni produktid. Need vaigud olid esimesed, millest valmistati konstruktsiooniplastidena nn. fenoplaste (getinaks, tekstoliit, bakeliit, puitplast). Fenoolvaigu kõvenemine toimub kolmes järgus: esimeses tekib resool, milles puuduvad molekulide ristsidemed. Resool lahustub hästi piirituses või atsetonis. Teises järgus tekib resitool, mis on osaliselt kõvenenud vaig, 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 (Joonis 2.3). Tänapäeval kasutatakse fenoolvaike peamiselt elektrotehniliste detailide ja kergkoormatud masinaosade valmistamiseks. [1:12]



Joonis 2.3 Resiit ehk täiesti kõvenenud termoreaktiivvaik [5]

Silikoonvaigud sisaldavad peale traditsiooniliste süsivesinike orgaaniliste rühmade ka räni ja hapniku lülisid, mistõttu silikoonvaikudel on head elektriisolatsiooni- ja hüdrofoobsed omadused, samuti korrosiooni-, elektrikaare- ja termopüsivus ning soojusjuhtivus. Silikoonvaikudest plastkomposiitide omadused toatemperatuuril on madalamad võrreldes epoksü-, polüester- või fenoolvaikudest komposiitidega. Joonisel 2.4 on kujutatud silikoonvaiguga elektriskeem plaadi katmist. Silikoonsideainega plastkomposiite kasutatakse näiteks konstruktsioonidetailide kaitsmiseks lühiajalise kõrge temperatuuri toime eest. [1:12]

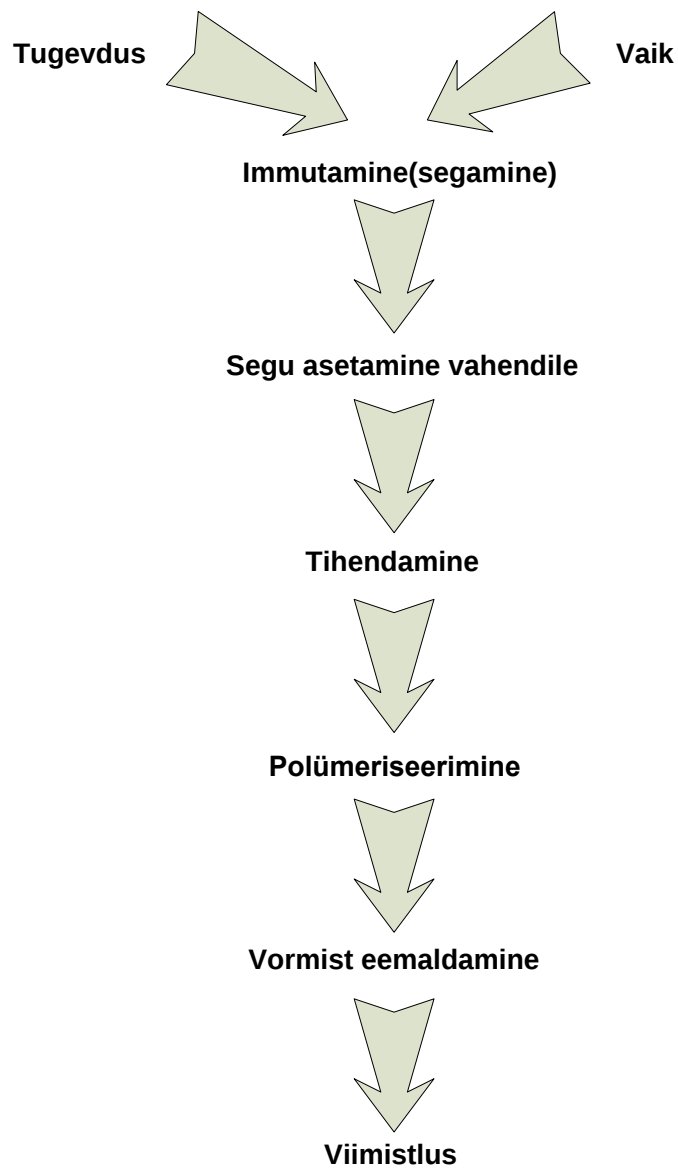


Joonis 2.4 Elektriskeemi plaadi katmine silikoonvaiguga [6]

3. 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 [1:69]

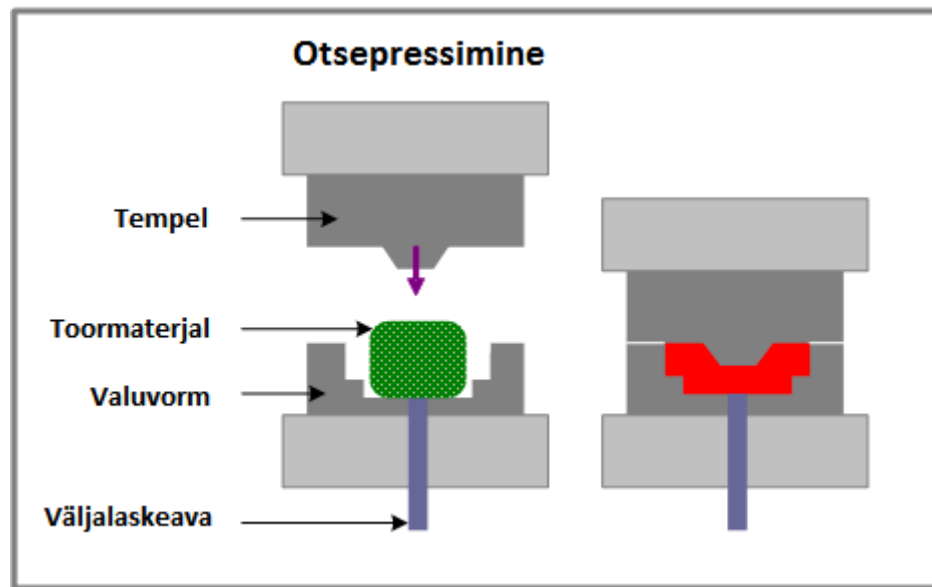
- Survevormimine – lühikesed kiud ja vaigugraanulid eeltootevormi
- Pultrusioon – kuivad kiud ja vedel vaik eeltoodete valmistamiseks
- Kuivmähkimine – eeltoode
- Märkmähkimine – kuiv kiud ja vedel vaik
- Kontaktvormimine – kangas või matt, vedel vaik
- Vaakumvormimine – tavalised eeltooted
- Termosurvevormimine – eeltoode



Joonis 3.1 PMKM valmistamisprotsessi lihtsustatud mudel

3.1. Survevormimine

Survevormimisel kasutatakse kolme vormimise moodust: otse- ja valupressimist ning survevalu (joonis 3.1).



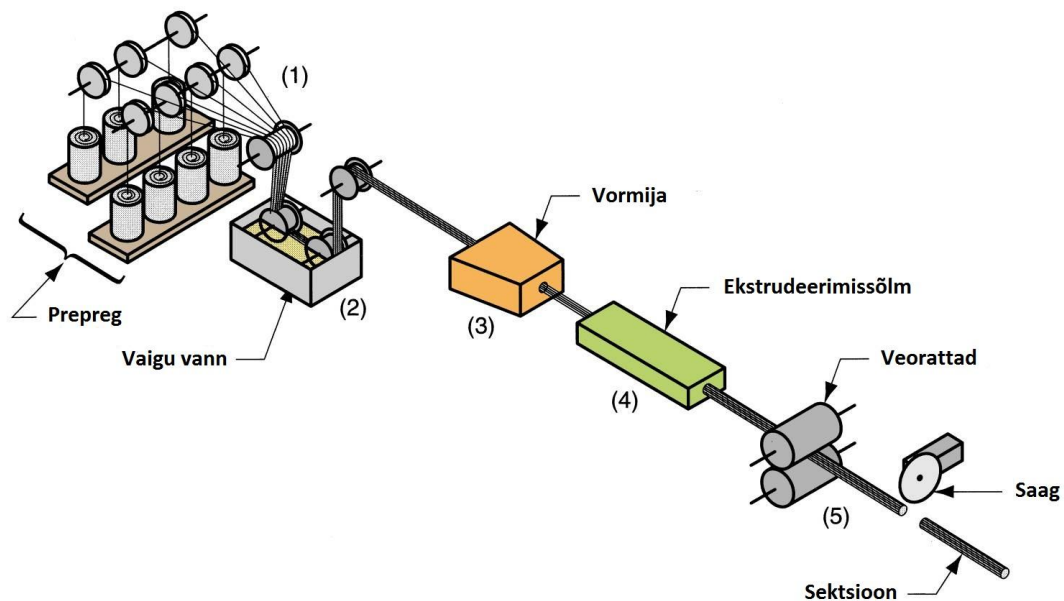
Joonis 3.2 PMKM vormimise otsepressimise skeem [7]

Otsepressimisega saadakse suurte mõõtmete ja massiga keskmise keerukusega detaile (joonis 3.2). Armatuurina võib kasutada kiude, kangast või prepreg'e. Pressvormid on keerulised ja kallid.

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. [1:70]

3.2. Pultrusioonmeetod

Pultrusioonmeetodit kasutatakse kindla ristlõikega ühes suunas armeeritud lihtsa kujuga detailide valmistamiseks (joonis 3.3), sagedamini aga pooltoorikute (prepreg'ide) saamisel. Prepeg on vaiguga immutatud, kuid mittekövendatud riie, lint, vilt või muu, mida saab kasutada toodete tegemiseks muude meetoditega ja üldiselt ka muudes ettevõtetes.

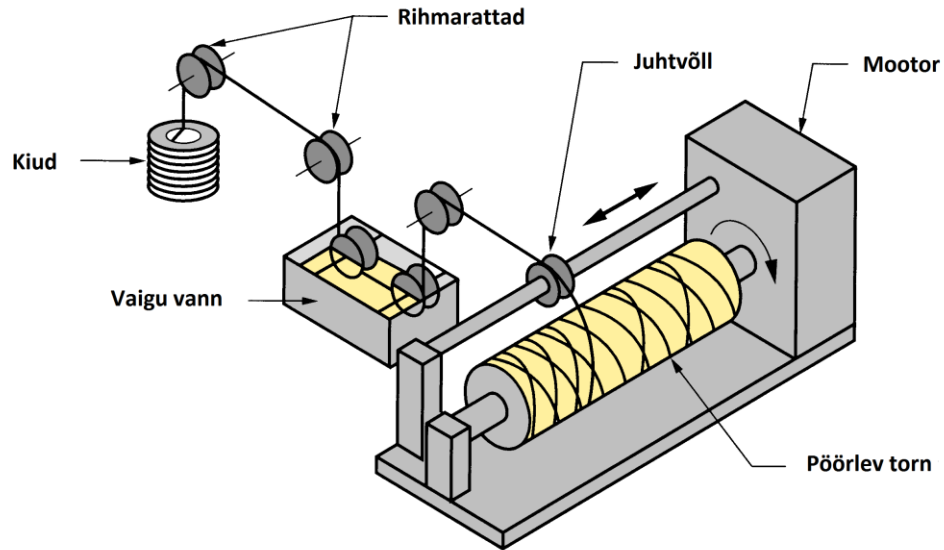


Joonis 3.3 Ühesuunaliste profiilide valmistamine pultrusiooni teel [7]

3.3.Mähkimine

Mähkimine on levinuim meetod suure tugevusega pidevkiududega suure armatuuriprotsendiga toodete valmistamiseks. Selle meetodi korral immutatakse niitidest või riidest lintpolümeere sideainega, keritakse pöörlevale tornile, mille kuju vastab toote sisekujule. Pärast vajaliku paksuse saavutamist materjal kõvendatakse ja torn eemaldatakse. See meetod võimaldab saada mitmesuguseid keerulisi pöördkujuga ning 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 keerulise kujuga koorikute valmistamiseks. Joonisel 3.4 on kujutatud komposiitmaterjali valmistamist mähkimise teel. [1:70]



Joonis 3.4 KM valmistamine mähkimise meetodiga [7]

3.3.1. Pikiringmähkimine

Pikiringmähkimist kasutatakse siis, kui kooriku pikkus on lühem mähitava kanga laiupest või vastupidi (tunduvalt pikem kanga laiupest). 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.

3.3.2. Tangentsiaalringmähkimine

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 või mitmekihiliste detailide saamiseks. Esimesel juhul lint mähitakse keeru kõrvale, teisel juhul – lindi pikietteanne on väiksem lindi laiupest ja seega lindi keerud katavad üksteist, mida iseloomustatakse parameetriga K:

$$K=B/S*\cos\beta \quad (1)$$

kus, B – lindi laius

S – ettenihe mm/pöördele

β – nurk torni ja pooli telgede vahel

Seda meetodit kasutatakse ka surve all töötavate metallanumate tugevdamiseks erineva läbimõõduga torude, kahuri- ja teiste relvade torude, gaasiballoonide jms valmistamiseks. [1:71-72]

3.3.3. Spiraalristimähkimine

Spiraalristimähkimist kasutatakse laialdaselt, kuna see võimaldab realiseerida väga erinevaid armatuuri paigaldamise viise, sõltuvalt jõudude mõjumise suunast. Muutes mähkimisnurka võib saada erineva radikaal- ja pikisuunalise tugevuse. See võimaldab maksimaalselt ära kasutada lähtekiudude tugevust tooteis.

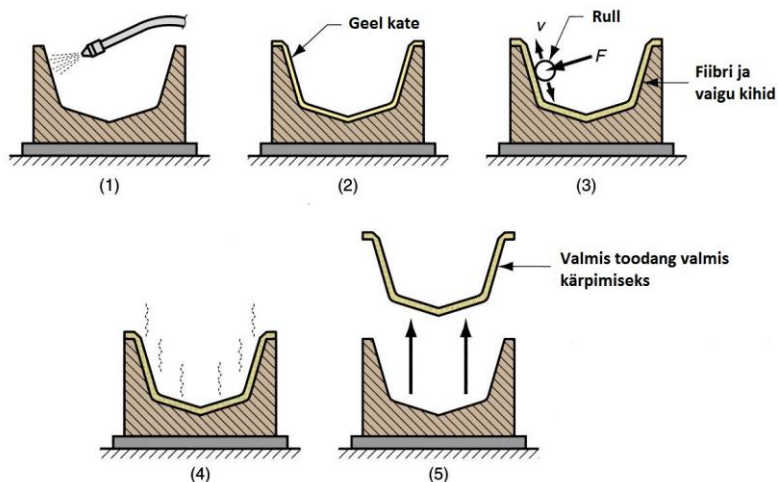
3.3.4. Spiraalringmähkimine

Spiraalringmähkimine 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 mähhib spiraalselt teatud nurga all. Seda meetodit kasutatakse suuremõõtmeliste silindriliste ja kooniliste (koonilisusega mitte üle 20°) mahutite (nt raudteesisternid) valmistamiseks. [7]

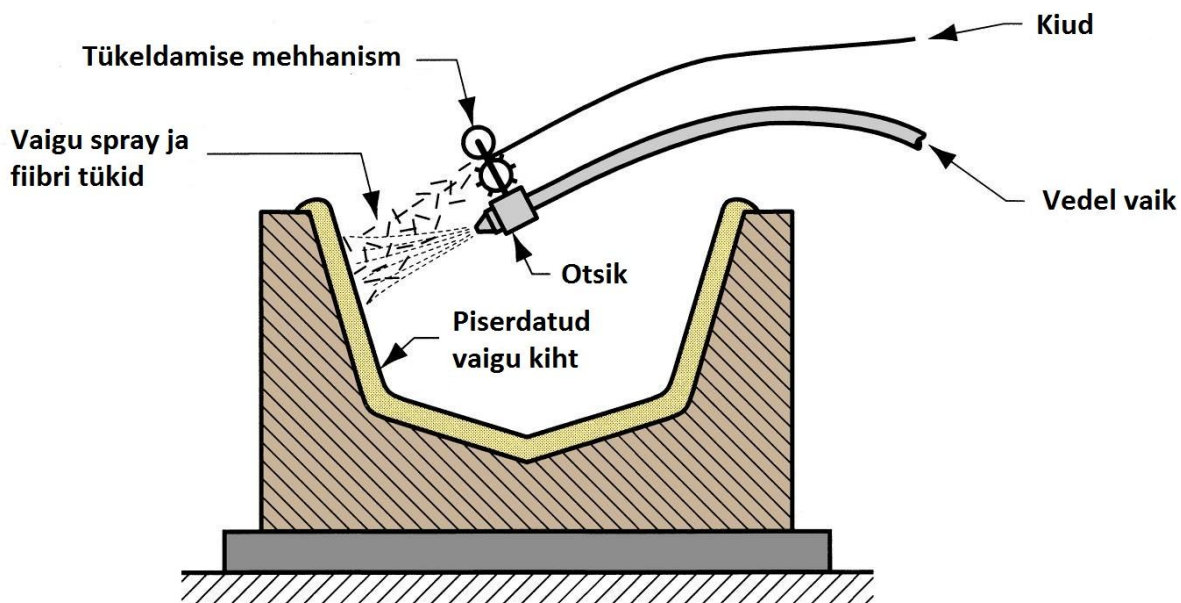
3.4. Kontaktvormimine

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 armeeritav riie ja immutatakse siduva vaiguga, mida seejärel kõvendatakse (joonis 3.5). Mudeli võib valmistada ükskõik millisest odavast materjalist, mis säilitab oma vormi (nt. betoon, savi, vineer jne). Kõige tootlikum on meetod, kus lühikesed kiud segatakse vaiguga ja pihustatakse suruõhuga mudeli pinnale (joonis 3.6). Kontaktvormimismeetod on lihtne, pole vaja eriseadmeid, võimaldab kergesti muuta toote konstruktsiooni, mis on eriti oluline katsenäidiste väljatöötamisel. Meetodi puuduseks on väike tootlikkus, raske on saavutada armatuuri ja sideaine ühtlast jagunemist, mistõttu on raske tagada toote ühtlast kvaliteeti. Peale selle kaasneb tootmisega palju tervist kahjustavaid mõjureid:

toksiline tolm, kahjulike gaaside ja aurude (vaigud, lahustid, värvid jt) eraldumine. 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 toorikule atmosfääri rõhu.[7]



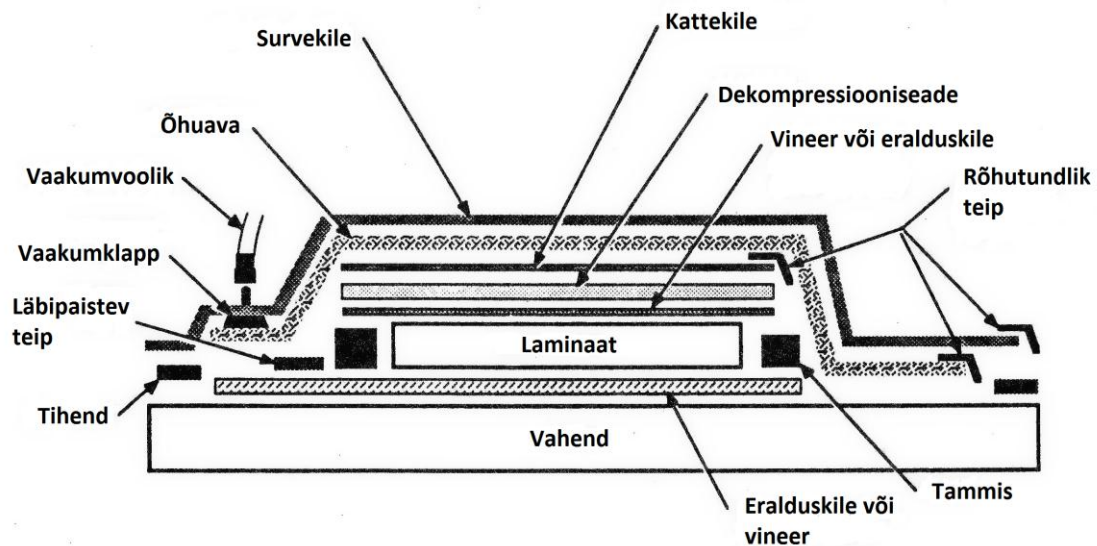
Joonis 3.5 Kontaktvormimine [7]



Joonis 3.6 Kontaktvormimine sprayga [7]

3.5. Vaakumvormimine

Vaakumvormimine on polümeermaatriksiga koorikute tootmise viis, milles kasutatakse atmosfääriõhu ja sisemise rõhnduse vahet. Eelnevalt immutatud armatuur kaetakse õhukese metallist või plastist kaanega, mille kuju vastab täpselt valmistatava toote kujule. See kaas takistab kortsude teket toote pinnal. Pakett kaetakse elastse kummi- või polüeteenkilekotiga, mis hermeetiliselt surutakse vastu vormi. Kotist pumbatakse õhk välja misjärel atmosfääri rõhk tihendab kogu paketi. Vajaduse korral kuumutatakse vaigu kõvendamiseks kogu pakett täiendavalt – selleks võetakse see vormist välja ja kuumutatakse ahjus.

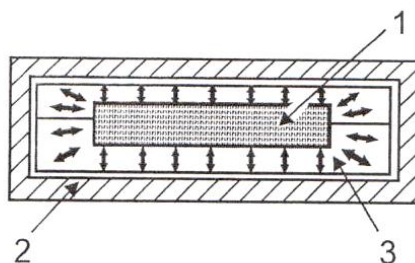


Joonis 3.8 Vaakumvormimine [7]

Vaakumvormimise eripära on injektorvormimine (joonis 3.8), mille korral vormi asetatud kuiv armatuur immutatatakse 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 termosurvevormimiseks. Meetod on küllaltki lihtne, kuid nõuab keerukat sisseseadet. 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.

Plastmaatsiksiga komposiitmaterjali valmistamismeetodite mitmekesisus on tingitud armatuuri ja maatriksi omadustest, aga ka valmistatavate toodete iseärasusest: mõõtmetest, kuju keerukusest, vajalikest omadustest, kogusest mida kasutatakse. [8]



Joonis 3.9 Termokompressorvormimine: 1-eeltoorik, 2-jäik ja tugev vorm, 3-kautšukist vorm [1]

4. PMKM MEHAANILISTE NÄITAJATE MÄÄRAMINE

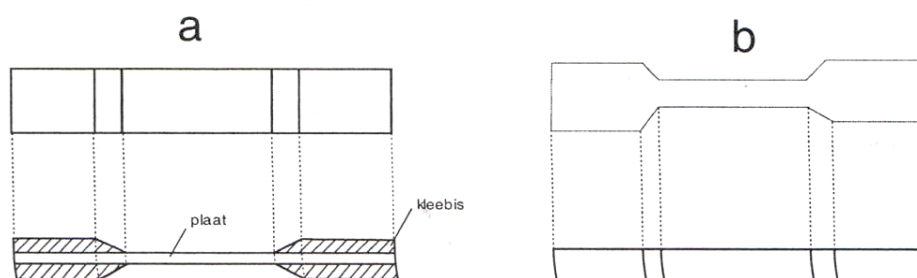
Erinevalt tavaliste isotroopsete materjalide omadustest sõltuvad PMKM omadused oluliselt valmistamise tehnoloogiast, jõu rakendamise suunast ja teimiku kujust. Selle tõttu on vaja omaduste testimiseks katsetusi, mis pole omased isotroopsete materjalide katsetamisele, nagu näiteks metallid. Näiteks kiududega armeeritud materjalil tuleb määrata kihtidevaheline nihketugevus, mille ebapiisav väärtus põhjustab materjali kihistumise.

Töös uuritavate plastmaatriksiga komposiitmaterjalide mehaaniliste omaduste määramise kirjeldamiseks on kajastatud tõmbeteimi, kõvadusteimi ja paindeteimi. Töö autor valmistas materjalidest katsekehad tõmbeteimiks mõõtudega 5X4X40mm. Katsekehad tehti lubramidist, oilamidist (joonis 4.2), nylatronist, PTFE + grafiit ning EP GC-st. Lisaks valmistati katsekehad ka tavalisest nailonist ehk PA 6-G eesmärgiga võrrelda nailonit nailoni baasil komposiitmaterjalidega. Katsekehade valmistamiseks kasutati lintsaagi, freesid ning käia.

4.1. 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 pingekontsentraatorite mõjule. Tõmbeteimiks kasutatakse lamedaid või torukujulisi teimikuid. Lamedad teimikud on tavaliselt plaadi- või labidakujulised, nende mõõtmed on normitud. Plaadikujulisi teimikuid (joonis 4.1a) 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 4.1b)

purunevad reeglina tööosas ja neid kasutatakse ristisuunas armeetitud kiududega komposiitmaterjalide katsetamisel.



Joonis 4.1 Tõmbeteimide kujud [1:54]



Joonis 4.2 Katsekehade kujud Lubramidist ja Oilamidist

Kõik katsed sooritati Tallinna Tehnikakõrgkoolis asuvas laboris tõmbeteimi masinal (joonis 4.3). Katse sooritamiseks kinnitati katsekeha tugevalt kinnituskohdadesse ning seejärel asuti kangi keerama seni, kuni katsekeha purunes.



Joonis 4.3 Tõmbeteimi katse masin

Iga materjaliga sooritati kolm katset, mille tulemuse näete tabelis 4.1.

Tabel 4.1

Tõmbeteimi katsete tulemused

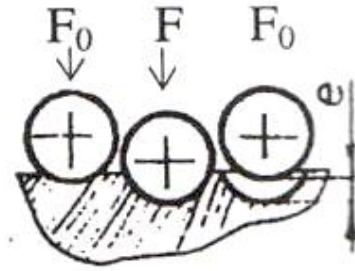
Materjal	Katse nr.	Ristlõike pindala A, mm^2	Purustav jõud F, KN	Tõmbetugevus $R_m, \text{N/mm}^2$	Keskmine tõmbetugevus $R_m, \text{N/mm}^2$
Lubramid	1	14,1	1,5	110	70
	2	18,2	1	50	
	3	22,1	1,26	60	
Oilamid	1	21,4	1,31	60	50
	2	17,1	0,83	50	
	3	16,6	0,7	40	
Nailon	1	17,9	1,3	70	70
	2	20,2	1,51	70	
	3	20,4	1,49	70	
Nylatron	1	11,8	0,65	60	60
	2	17,2	1,04	60	
	3	14,2	0,86	60	

	1	19,9	0,31	20	
PTFE+grafiit	2	23,1	0,35	20	20
	3	17,7	0,29	20	
	1	10,3	2,95	290	
EP GC	2	10,8	2,7	250	250
	3	14,4	3	210	

Nagu tabelis 4.1 välja toodud tulemustest võib näha, siis on kõige väiksem tõmbetugevus PTFE + grafiit materjalil. Antud materjali puhul oli ka katseid tehes näha, et materjal on väga pehme võrreldes teiste plastmaatriksiga komposiitmaterjalidega. Lubramidi ja nailoni tõmbetugevused on samaväärsed ning sellest võime järeldada, et lubramidi'le lisatud tahked määrdeained ei ole suurendanud tema tõmbetugevust võrreldes tavalise nailoniga. Samuti ei ole tugevamad nailoni baasil komposiitmaterjalid nylatron ja oilamid, kuna mõlema keskmine tõmbetugevus jäi nailoni tõmbetugevusele alla. Kõige suurema tõmbetugevusega materjal töös kasutatud komposiitmaterjalidest on EP GC. Nende katsekehade ristlõike pindalad olid kõige väiksemad, kuid siiski tuli antud katsekehadele rakendada kõige suuremat jõudu. Materjalile annab suure tõmbetugevuse klaaskiud. Nylatroni ja oilamidi tõmbegraafikud on välja toodud antud töö lisades.

4.2. Kõvadusteim

Komposiitide, v.a keraamiliste komposiitide kõvadust määratakse Rockwelli modifitseeritud meetodiga, mis erineb tavameetodist otsaku (teraskuuli) mõõtmete poolest. Töös käsitletud materjale on testitud Rockwelli meetodiga H358/30, mis tähendab, et 5mm läbimõõduga terasest palli suruti vähemalt 4mm paksusesse katseainesse 358 Newtoni suuruse jõuga ja jõudu rakendati 30 sekundit (joonis 4.4). [1:58]



Joonis 4.4 Kõvadusteimi mõõtmise kolm sammu [1:58]

4.3. Paindeteim

Töös kasutatavatele materjalidele on küll määratud paindetugevus, kuid kuna komposiitide katsetamine painetele annab raskesti interpreteeritavaid tulemusi, ei oma need väärtused tõsiseltvõetavat eesmärki. Paindetugevuste testimine kaotab komposiitides mõtte, kuna komposiidid on kihilised ning paindekoormus kutsub esile nii normaal- kui ka nihkepingeid, mille tõttu on komposiidid väga tundlikud paindetugevusele.[1:53-58]

5. PMKM 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, füüsikalismehaaniliste omaduste ja koostise määramisel proovikehadel, mis on tooteist välja lõigatud või spetsiaalse varuga valmistatud, sisemiste defektide määramises kontrollaparatuuri abil. [9]

PMKM kvaliteedikontrolli saab teostada järgnevate meetoditega:

- Materjalde mittepurustav kontroll röntgenograafi abil
- Liitejoonte boroskoopkontroll
- Pinnakõvaduse, polümerisatsiooniastme mõõtmine (duromeeter)
- Tõmbe/surve/löökpainde mõõtmine

6. PMKM KOOSTIS JA OMADUSED

Laialdane armatuuri- ja maatriksimaterjali valik koos võimalusega laias vahemikus reguleerida armatuuri mahulist sisaldust komposiidis võimaldab polümeerkomposiite mitmekülgsest kasutada.

Põhilised plastmaatriksiga komposiitmaterjalid, lähtuvalt armatuuri materjalist, on :

- Klaasplastid
- Süsinikplastid
- Boorplastid
- Metalloplastid
- Organoplastid

6.1.Klaasplastid

Klaasplastid kuuluvad levinuimate PMKM hulka, kuna nad on tugevad, hea vastupanuga vahelduvale koormusele, termolöökidele, kõrge raadiolainete läbitavus, korrosiooni- ja erosioonikindlus. Nad on odavamad kui teised komposiitmaterjalid, tehnoloogiliselt mugavad valmistamiseks ja ümbertöödeldavad. Armeerivad elemendid klaasplastides on pidevkiud niidi või nõöri, 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 nimetatakse klaastekstoliitideks. Sideaine valik klaasplastide korral on määratud valmistamise tehnoloogia ja töötingimustega. Laialdaselt kasutatakse termoreaktiivseid vaike (epoksü-, polüester- ja fenoolvaike) aga ka termoplaste. [1:99]

Orienteerimata kiududega klaasplastide tootmist on enam levinud survevalu ja ekstrusioon. Survevalu korral 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. Selle meetodiga jagunevad kiud ühtlasemalt.

Orienteeritud armatuuriga klaasplaste valmistatakse piki- ja ristikiudu armatuuriga. Tugevus ja elastsusmoodul on maksimaalsed orienteeritud kiududega PMKMs, mis sisaldab 65..66% sideainet. E-klaaskiude kasutades on PMKM tugevus kiudude pikisuunas 1600..2100 N/mm². Armeeritud klaasplastide tugevust ja elastsusmoodulit saab reguleerida kihtide arvuga erinevates suundades. [1:99-101,3]

Tabel 6.1

Klaasplastide omadused [1:99]

Kiu materjal	Tihedus ρ , kg/m ³	Tõmbetugevus R_m , N/mm ²	Elastsusmoodul E , 10 ³ N/mm ²	Eritugevus 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	-

6.2.Süsinikplastid

Süsinikplastides kasutatakse kõrgelastsusmooduliga ($E > 150 \cdot 10^3$ N/mm²) ja kõrgtugevaid ($R_m > 2500$ N/mm²) kiude. Madalaelastsusmooduliga kiude konstruktsioonimaterjalides ei kasutata. Nendest valmistatakse voolu juhtivaid, soojust kaitsvaid, antifriktioonseid 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 juures 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, apreteerimist (tärglist sisaldavate orgaaniliste pinnete pealekandmine) jne. Süsinikplastidel on omaduste anisotroopia palju rohkem väljendunud kui klaasplastidel, kuna armatuuri ja sideaine elastsusmoodulite suhe on süsinikplastidel 100:1 ja enam, klaasplastidel aga 20-30:1. Süsinikplastide üheks parimaks omaduseks on nende suur väsimustugevus ja vibratsioonikindlus, sest süsinikkiud summutavad mehaanilised võnkumised. Kuna süsinikkiududel on suurem elastsusmoodul (kuni $400 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$) võrreldes klaaskiududega (kuni $200 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$) siis koormamisel deformeeruvad süsinikkiud vähem ja seega deformeerub vähem ka polümeermaatriks. Ka ühikulise massi vastupidavuspiir on süsinikplastidel märgatavalt kõrgem kui klaasplastidel, mis teeb nad headeks materjalideks töötamaks vibratsioonitingimustes (kopterite propeller, reaktiivmootorite ventilaatorilabad jne.) Tänu heale soojus- (võrdne titaani ja roostevaba terasega) ja elektrijuhtivusele kasutatakse süsinikplaste ka elektriküttekehade materjalidena. [1:100]

Tabel 6.2

Süsinikkiudude omadused [1:100]

Kiu materjal	Tihedus ρ , kg/m ³	Tõmbetugevus R_m , N/mm ²	Elastsus-moodul E , 10^3 N/mm^2	Survetugevus R_{ms} , N/mm ²	Nihketugevus τ , N/mm ²	Eritugevus R_m/ρ , km	Eri-jäikus E/ρ , km
Kõrgelastsus-mooduliga süsinikkiud	1500	1000	180	800	50	67	12000
Kõrgtugev süsinikkiud	1500	1500	110	900	80	100	7300

6.3.Boor- ja organoplastid

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°C . Boorplastidele on omane hea survetugevus 30..40%, mis on suurem kui tõmbetugevus. Teiste PMKM puhul on see vastupidi. See on tingitud eelkõige boorkiudude suuremast läbimõõdust. Boorplastide puudus on väiksem plastsus ja löögisitkus, kuid neid omadusi saab tõsta kui lisaks boorkiududele kasutada teisi kiude (nt klaas- ja süsinikkiude).

Enamik boorplaste toodetakse *preg*'idest, mis on läbi immutatud epoksüvaiguga. Selleks, et tagada nende pikaajalised omadused säilitatakse ja toimetatakse *preg*'e tarbijale külmutatud olekus.

Kõige rohkem kasutatakse epoksüvaigust sideainet, mis talub temperatuuri kuni 180 °C. Kõrgemate temperatuuride korral kasutatakse ränioorgaanilisi ja teisi sideaineid. Boorplastide kasutamisel survekoormusel töötavate raamide valmistamiseks lennukiehituses saab raami massi vähendada kuni 20..30% võrreldes alumiiniumsulamist raamidega.

Organoplastid on vanimad PMKM, kus armatuurina kasutatakse mitmesuguseid orgaanilisi kiude. Kaua kasutati armatuurina naturaalkiude (puuvilla-, lina- ja tselluloosikiude).

Praegu valmistatakse suurem osa organoplaste tugevatest ja jäikadest kevlar-tüüpi aramiidkiududest. See võimaldab organoplastide sideaineks kasutada kõrgema polümerisatsioonitemperatuuriga vaike (nt.silikoonvaik). Parimad omadused saadakse aga kiududega analoogse koostisega aramiidvaike kasutades. Normaalingimustes kasutatakse siiski epoksüvaiku, mis on palju tehnoloogilisem ja odavam. Ühesuunaliselt orienteeritud 60%-se kevlarikiudude kontsentratsiooniga epoksüvaigust sideainega organoplasti tõmbetugevus ulatub pikikiudu 1400 N/mm² ja ristikiudu ainult 28 N/mm², elastsusmoodul survel pikikiudu kuni 85*10³ N/mm² ja ristikiudu kuni 5,6*10³ N/mm². Organoplastidel on suur löögisitkus (0,5..2,0 MJ/m²), mistõttu saab neid kasutada dünaamilistel koormustel töötavate detailide valmistamiseks. Organoplasti puudus on madal survetugevus, mille kompenseerimiseks kasutatakse sageli jäigemaid klaas-, boorsüsinik- ja teisi kiude.[1:101, 10:58]

Tabel 6.3

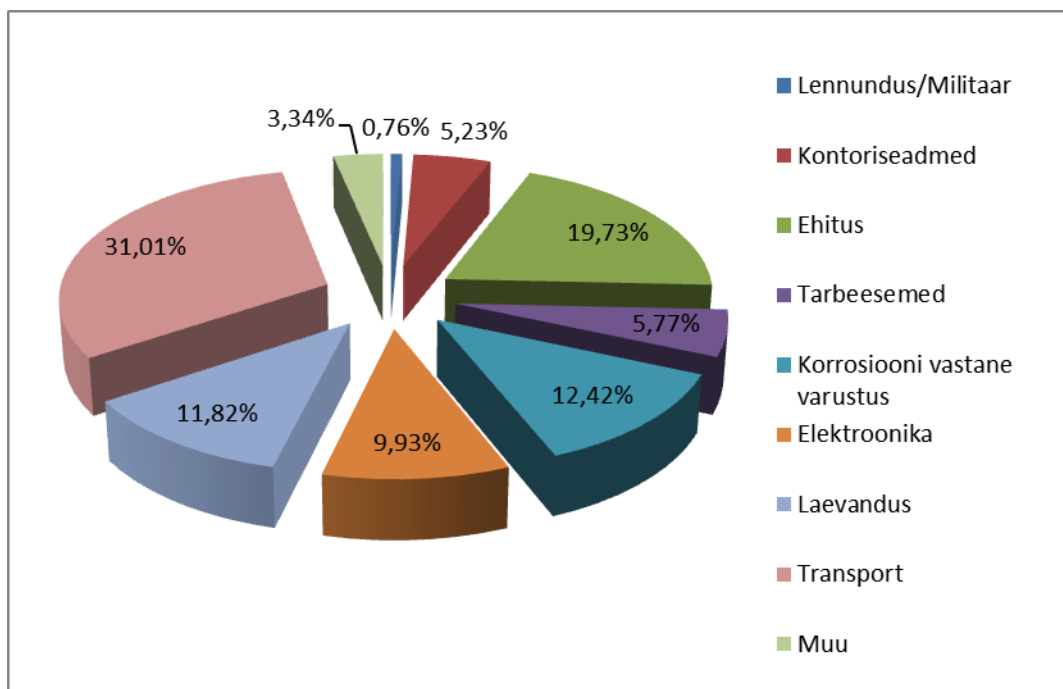
Boor- ja organokiudude omadused [1:101]

Armatuur	Tihedus ρ , kg/m ³	Tõmbe- tugevus R_m , N/mm ²	Elastsus- moodul E , 10 ³ N/mm ²	Surve- tugevus R_{ms} , N/mm ²	Nihke- tugevus τ , N/mm ²	Eri- tugevus R_m/ρ , km	Eri- jäikus E/ρ , km
Aramiidkevlarkiud	1330	517	31	170	1950	39	2300
Boorkiud, $R_m=2000..2800$ N/mm ²	2000..2200	1200	250	1500	84	60	12500

7. PLASTMAATRIKSIGA KOMPOSIITMATERJALIDE KASUTUSVALDKONNAD

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 näiteks lennukites, kosmoseaparaatides, tuumaenergeetika seadmetes jne. Tulenevalt 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 teisi tegureid näiteks ökoloogilisust, vastupidavust, turvalisust jne. [10:60]

USA näitel on erinevate plastmaatriksiga komposiitmaterjalide tootmine suuruselt kolmas tööstusvaldkond, mis pakub tööd enam kui 900 000 töötajale ja mille ekspordikäive ületab 380 miljardit USA dollarit. Viimased kakskümmend aastat on plastikutööstus kasvanud USA's keskmiselt 2,4 % aastas, mis on kiireim kõigist teistest tööstusvaldkondadest. Joonisel 7.1 on kujutatud USA näitel erinevate plastmaatriksiga komposiitmaterjalide kasutusvaldkondi ja nende valdkondade osakaalu kogu tootmises. [11]



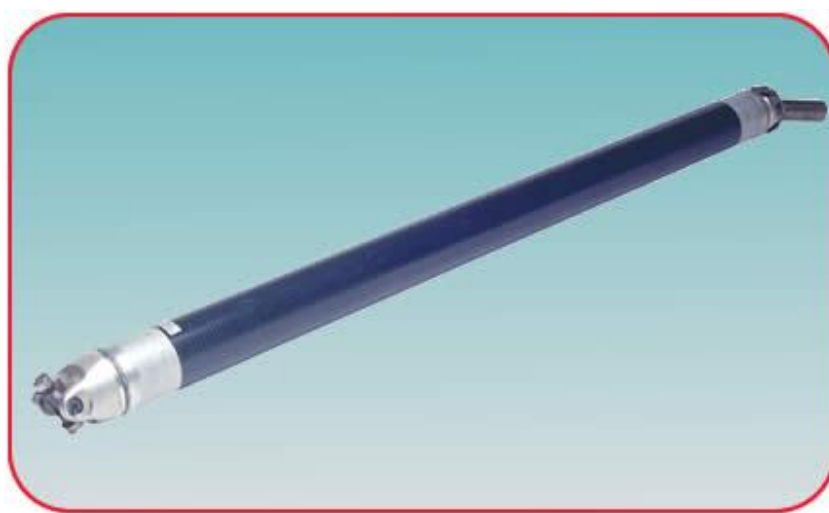
Joonis 7.1 PMKM kasutus erinevates valdkondades [11]

Kuna plastmaatriksiga komposiitmaterjale kasutatakse väga laialdaselt, alustades tennisereketist ja lõpetades kosmosesüstikuga, siis ei saa kindlalt piiritleda valdkondi, kus neid kasutatakse. Seetõttu on mõistlik välja tuua ainult mõned huvitavamad näited, kus plastmaatriksiga komposiitmaterjalid on asendamatud.

Komposiitmaterjalid õigustavad ennast autotööstuses hea korrosioonikindluse, müra- ja vibratsioonisummutavuse tõttu. Üha enam luuakse auto väliseid keredetaile plastmaatriksiga komposiitmaterjalidest, kuna nende vormimine on lihtne ning nad on vastupidavamad ilmastikutingimustele. Kuigi autotööstuses ei ole auto mass nii tähtis kui lennunduses, püüdlevad insenerid ikkagi kaalukaotamise ja sellest tingitud kütusekasutuse efektiivsuse poole. Selle tõttu leiavad ka plastmaatriksiga komposiitmaterjalid laialdast kasutust, olles kergemad mistahes metallkonstruktsioonidest. Lisaks kere detailidele kasutatakse autode juures ka plastkomposiitidest tehtud veermiku juppe, nagu näiteks lehtvedru (joonisel 7.2) ning veovõlle (joonisel 7.3). [11]



Joonis 7.2 PMKM lehtvedru [12]



Joonis7.3 PMKM auto veovõll [12]

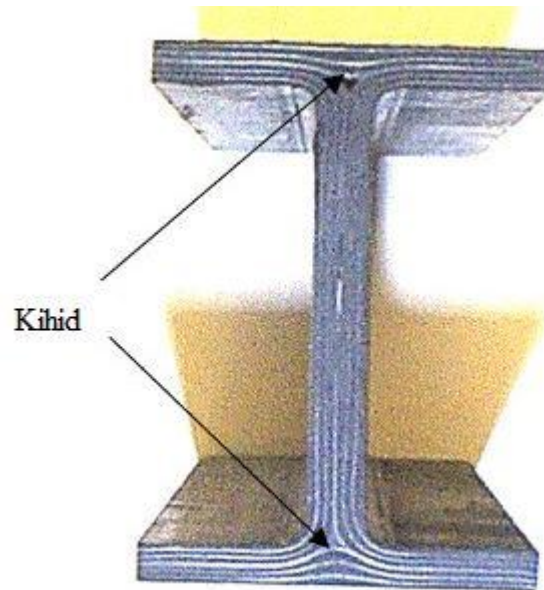
Reisilennukite kasutusaeg on väga pikk, seetõttu on lennukite puhul väga olulised väsimus- ja korrosiooniprobleemid. Massi piirangud (mitte rohkem kui 50% lennuki kandevõust) teevad komposiitmaterjalid väga perspektiivseks lennukitööstuses esmajoones nende eritugevuse ja erijäikuse tõttu. Klaasplastist valmistatakse praktiliselt kõiki väikelennukite keredetaile (plaaner, tiivad, saba, propeller). Suurtes lennukites valmistatakse klaasplastist vähekoormatud detaile (müraisolatsioon, vaheseinad). Lennuki kandekonstruktsioonis kasutatakse aga boorplaste, mis on jäigad ja vastupidavad

suurtele survekoormusele, olles ise kordades kergem mistahes metallist. Joonisel 7.4 on kujutatud väikelennukit, mille kere on valmistatud täielikult plastmaatriksiga komposiidist, millele on lisatud süsinikfiibri kiud.



Joonis 7.4 PMKM väikelennuki kere [13]

Ehituses õigustavad komposiitmaterjalid ennast oma kerguse, hoolduskulude ja vastupidavusega. Märkimisväärsim ehitusalaseks saavutuseks võib pidada sildade ehitamist (joonis 7.6), kasutades peamisteks materjalideks erinevaid plastmaatriksiga komposiite. Sildade maksumus küll suureneb, kui tänu komposiitide kergele kaalule on võimalik ehitada pikemaid sildasid ning sildade kandevõime suureneb, kuna silla omakaal on väike, kuid vastupidavus sama hea kui betoonist ja terasest tehtud sildadel. Vastupidavuse ja väikeste hoolduskulude õigustab sild ka oma kallimat ehitusmaksumust. Muidugi toodetakse ka igasugu ehitistele vajalikke detaile, millest märkimisväärsimaks võib pidada joonisel 7.5 kujutatud I-tala, mida kasutatakse kõiksugu kandevkonstruktsioonide loomisel.[11]



Joonis 7.5 Lamineeritud süsinik epoksü I-tala [14]



Joonis 7.6 Fibriga tugevdatud plastmaatriksiga komposiitmaterjalist loodud sild [11]

8. TÖÖS KAJASTAMIST LEIDNUD MATERJALID

8.1. Calaumid 1200 (PA 12 G)

Calaumid 1200 toodetakse survevaba valamisprotsessi käigus läbi anioonse reaktsiooni. Selle meetodiga saavutatakse kõrgmolekulaarne, kõrge kistallisatsiooniastmega materjal suhteliselt kerge vaevaga. Calaumid 1200 on hea kulumiskindlusega ning mõõtmised on stabiilsed. Calaumid 1200 on eriline oma tähelepanuväärselt väikese niiskuseimavusega. Samuti on materjal ülimalt täpsete ning stabiilsete mõõtetudega, mis jäävad samaks isegi madalatel temperatuuridel. [15:15]

Materjali omadused:

- Hea kulumiskindlus
- Hea keemikaalide taluvusega
- Ei kaota oma omadusi veega kokkupuutel
- Täpsed ja stabiilsed mõõtmised
- Väike niiskuseimavus
- Värvuselt kas naturaalne, must või kollane

Tabel 8.1

Calaumid 1200 (PA 12 G) tehnilised näitajad [15:16]

Mehaanilised väärtused		
Tihedus	1,03	g/cm ³
Voolavuspiir	60	MPa
Tõmbetugevuse elastsusmoodul	2.100	MPa
Kõvadus (Rockwell H358/30)	100	MPa
Paindetugevus	90	MPa
Termilised väärtused		

Sulamistemperatuur	+190	°C
Soojusjuhtivus	0,23	W/(K*m)
Kasutamistemperatuur	-60/+110	°C

Elektrilised väärtused		
Dielektriline läbitavus	3,7	
Dielektriline tugevus	50	KV/mm
Pinnatakistus	10^{13}	Ω

Rakendusvaldkonnad:

- Puksid, laagrid
- Rullikud
- Rattad (joonis 8.1)
- Erinevad detailid, mis kannatavad koormust ning mille juures on tähtis, et materjali mõõdud ei muutuks kokkupuutel veega (joonis 8.1)



Joonis 8.1 Calamidist valmistatud detailid ja rattad [15:14]

8.2.Oilamid (PA 6G +õli)

Oilamid on kõrgkristalliline modifikatsioon PA 6 G-st, mida toodetakse valamisprotsessiga , kus lisatakse õli ja stabilisaatorid. Tänu stabilisaatorite ja õli lisamisele sobib oilamid kohtadesse, kus on

vajalik materjali libedus (näiteks tõstuki hüdraulilise kaela puksid). Vastupidiselt standardkvaliteediga PA 6 G-le, on oilamidil väga palju häid omadusi. Näiteks kui tavaline PA 6 G võib töötamisel kinni kiiluda ning hõõrdumisel tekkinud temperatuur materjali kergesti sulatada, siis oilamidiga sellist probleemi ei teki, kuna materjal on libe ning kinnikiilumist ei toimu.

Suurepärased libisemisomadused teevad oilamidist materjali, mis sobib kõrge koormusega masinaosadele ja seadmete detailidele, kus toimub pidev hõõrdumine. Oilamidi hea libisemise efekt saavutatakse tänu libestile ning teistele lisatud ainetele. Oilamidil ei ole libe mitte ainult pealmine pind, vaid kogu materjal, mis tagab detailide libeduse kogu tööaja jooksul. Võrreldes PA 6 G-ga, saavutatakse kuni 50% hõõrdeteguri vähenemist, tootes tänu sellele vähem hõõrdesoojust ning suurendatakse märkimisväärselt tippkoormuse talumise võimet. Ühtlasi väheneb soovimatu kinnikiilumise võimalus. [15:12]

Materjali omadused:

- Suurepärane kulumiskindlus
- Väike hõõrdetegur
- Töötab hästi suurtel kiirustel
- Ei ima niiskust
- Stabiilsed mõõtmised
- Värvuselt on materjal must, kollane, roheline, naturaalne või hall

Tabel 8.2

Oilamidi tehnilised näitajad [15:12]

Mehaanilised väärtused		
Tihedus	1,14	g/cm ³
Voolavuspiir	80	MPa
Tõmbetugevuse elastsusmoodul	2,5	MPa
Kõvadus (Rockwell H358/30)	140	MPa
Paindetugevus	135	MPa
Tõmbetugevus	50	N/mm ²
Termilised väärtused		

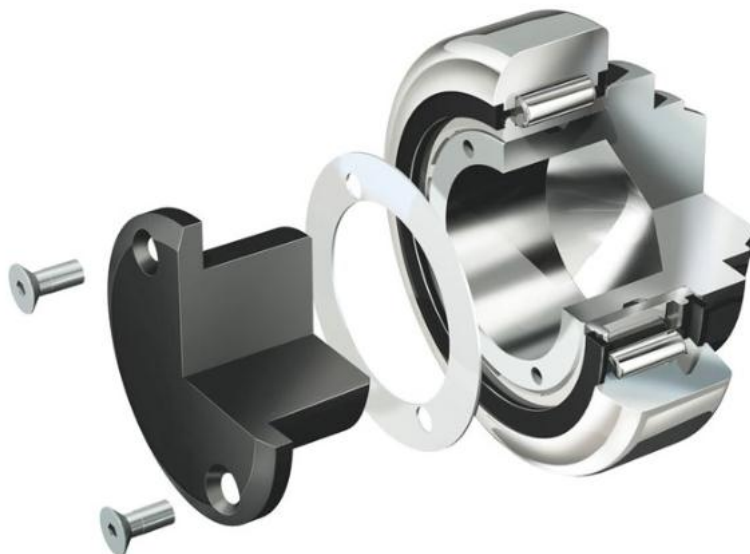
Sulamistemperatuur	220	°C
Soojusjuhtivus	0,23	W/(K*m)
Kasutamistemperatuur	-40/+105	°C
Elektrilised väärtused		
Dielektriline läbitavus	3,7	
Dielektriline tugevus	50	KV/mm
Pinnatakistus	10 ¹³	Ω

Rakendusvaldkonnad:

- Konveieri ja transpordi tehnoloogiad
- Masinatööstuses
- Ehituses ja autotööstuses
- Laagrid (joonis 8.3)
- Hammasrattad (joonis 8.2)
- Juhtsiinid, juhtrööpad



Joonis 8.2 Oilamidist valmistatud detailid [15:11]



Joonis 8.3 Oilamidist korrigeeriva otsaga winkel-laager [16]

8.3.Lubramid 600 T (PA 6 G + tahked määrdeained)

Kui lisada PA 6 G-le tahkeid määrdeaineid, siis saadakse selline komposiitmaterjal nagu Lubramid, millel on isemäärvad omadused ning materjalil on väga madal hõõrdumine teiste materjalide vastu. Lubramid 600 T valmistamisel on lisandid hoolikalt valitud ning põhirõhk on parandada materjali libisemisomadusi. Lisandite tasakaalustatud kombinatsioon võimaldab saavutada hõõrdeteguri $0,15\mu$, mis on erakordselt madal. Ühtlane määrdeainete ja lisandite pealevalgumine materjali struktuurist ja põhitoote täielik küllastus määrdeainega pakuvad unikaalseid võimalusi, võrreldes traditsiooniliste masinaehitus materjalidega. Näiteks nagu PA 6, PE 300;500;1000, POM-C. Spetsiaalsed lisandid kindlustavad materjali isemäärdumise ja libisemisomadused on pidevad ning püsivad kõrgel tasemel. Antud omadused on materjalil kasutushetke/töömomendi algushetkest kuni lõpuni ehk püsivad kogu operatsiooni vältel.

Õli, mis pressitakse või kulutatakse materjali pinnalt ära, asendatakse koheselt materjalist endast vallanduva värske määrdeainega. Seega jääb ära igasugune õlitamine ja määrimine. Lisaks tagab PA 6 ise suurepärase kulumiskindluse ja pakub head ning probleemivaba materjali kasutust. Lubramid 600T kombineeritud omadused teevad temast esimese valiku juhtudel, kus on raske või võimatu tavaline määrimine. Näiteks kohad, kuhu on raske ligi pääseda, et pidevalt määret lisada. [15:8]

Materjali omadused:

- Head libisemisomadused
- Suur kulumiskindlus
- Mehaaniline stabiilsus
- Isemäärimine
- Võimalik valmistada ka toiduainetööstuse kvaliteediga
- Materjali eluiga on pikem kui tavalisel nailonil
- Värvuselt on Lubramid hall, roheline või punane

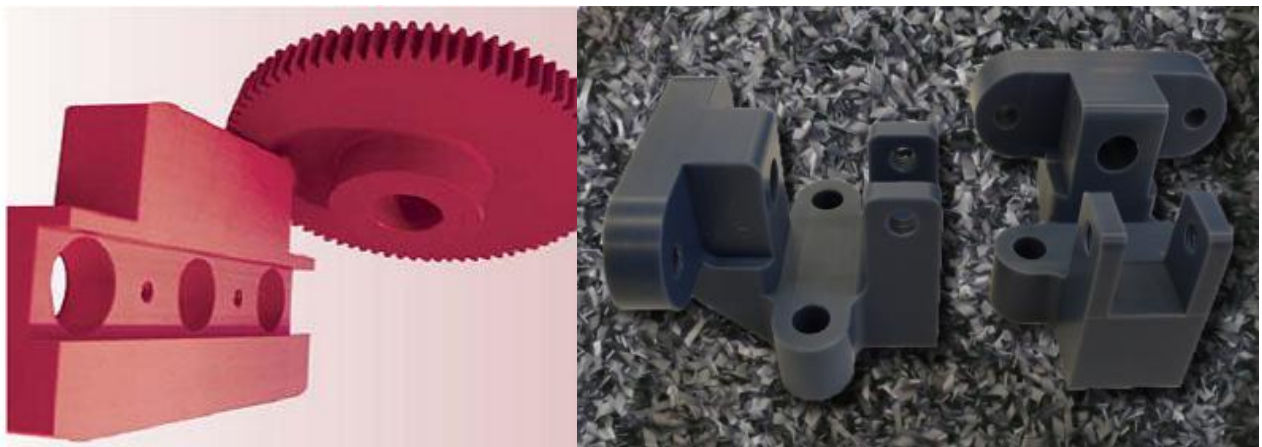
Tabel 8.3

Lubramidi tehnilised näitajad [15:8]

Mehaanilised väärtused		
Tihedus	1,14	g/cm ³
Voolavuspiir	80	MPa
Tõmbetugevuse elastsusmoodul	3,1	MPa
Kõvadus (Rockwell H358/30)	160	MPa
Paindetugevus	110	MPa
Tõmbetugevus	70	N/mm ²
Termilised väärtused		
Sulamistemperatuur	220	°C
Soojusjuhtivus	0,23	W/(K*m)
Kasutamistemperatuur	-40/+105	°C
Elektrilised väärtused		
Dielektriline läbitavus	3,7	
Dielektriline tugevus	50	KV/mm
Pinnatakistus	10 ¹³	Ω

Rakendusvaldkonnad:

- Konveieri ja transpordi tehnoloogiates
- Masina- ja autotööstuses
- Ehituses
- Liugpadjad, -ribad, -lehed
- Juhtpadjad
- Rattad, hammasrattad, võllid (joonis 8.4)



Joonis 8.4 Lubramidist detailid [17]

8.4. Nylatron (PA 6+molübdeensulfiidi pulber)

Nylatron on sinise värvusega komposiitmaterjal, mis on saadud nailonile molübdeensulfiidmäärde (MoS_2) pulbri lisamisega. Olemuselt on nylatron sarnane nailonile, kuid tal on kristallilisem struktuur tänu molübdeensulfiidi lisamisele. Tänu lisandile on suurenenud nailoni tugevus ja jäikus. [18]

Materjali omadused:

- Suur mehaaniline tugevus
- Suur jäikus ja kõvadus
- Hea väsimuskindlus
- Rahuldavad libisemisomadused
- Head elektriisolatsiooni omadused

- Värvuselt on materjal sinine
- Suurepärane kulumiskindlu

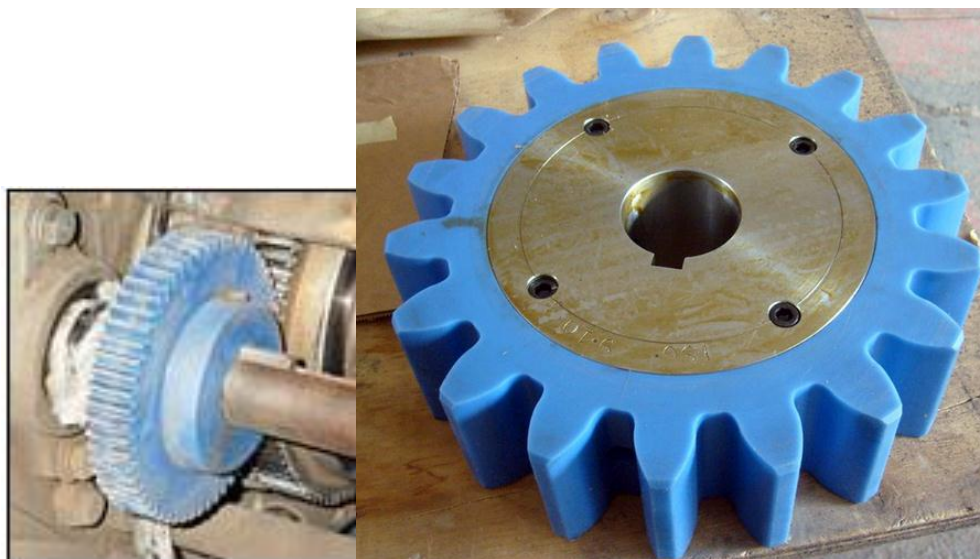
Tabel 8.4

Nylatroni tehnilised näitajad [15:122]

Mehaanilised väärtused		
Tihedus	1,15	g/cm ³
Voolavuspiir	85	MPa
Tõmbetugevuse elastsusmoodul	3,1	MPa
Kõvadus (Rockwell H358/30)	150	MPa
Paindetugevus	130	MPa
Tõmbetugevus	60	N/mm ²
Termilised väärtused		
Sulamistemperatuur	220	°C
Soojusjuhtivus	0,23	W/(K*m)
Kasutamistemperatuur	-40/+100	°C
Elektrilised väärtused		
Dielektriline läbitavus	3,7	
Dielektriline tugevus	40	KV/mm
Pinnatakistus	10 ¹³	Ω

Rakendusvaldkonnad:

- Tänu headele mehaanilistele omadustele ja kulumiskindlusele valatakse masinate plastosi
- Laagrid, mille eluiga on 10 korda pikem tavalisest nailonist
- Rullid ja rattad
- Kandepinnad
- Hammasrattad (joonis 8.5)



Joonis 8.5 Nylatronist hammasrattad [18]

8.5.PVC-C

PVC-C on klooriga töödeldud PVC, mida kasutatakse peamiselt keemiatööstuses. Materjal, mida tavaliselt kasutatakse tööstuslikes rakendustes, on PVC-U, PVC-C on komposiitmaterjal PVC-U-st. Teatud olukordades võib olla PVC-C-d raskem töödelda ja kasutada kui PVC-U-d. Kuid PVC-C-l on suurem temperatuuritaluvus, ligi 100 °C, ning ta on eriti vastupidav kloorile. Lisaks kõrgele sulamistemperatuurile on materjal peaaegu süttimatu, suurepärase löögikindlusega, keemilise vastupidavusega ning teda on väga hea töödelda.

PVC-C on keemiliselt vastupidav paljudele lahjendatud ja kontsentreeritud hapetele, leelistele ja sooladele. Sama kehtib alkoholi ja erinevate õlide kohta. PVC-C võib koguda endasse niiskust. Kui see juhtub tuleks materjal kuivatada avatud ahjus 55 °C juures. Kuivamisaeg sõltub niiskuse tasemest ning materjali paksusest.

PVC-C on saadaval nii lehtmaterjalina paksusega 3,2 kuni 25,4 mm, ümarmaterjalina diameetriga alates 8mm kuni 300mm. Materjali saab töödelda peaaegu kõigi töötlemis- ja vormismetoditega. PVC-C-d saab vaevata saagida, freesida, puurida, töödelda vesilõikusega, liimida ja vormida. [19]

Materjali omadused [19]:

- Kõrge sulamistemperatuur
- Hea löögikindlus
- Hea keemilise vastupidavusega
- Ei ole niiskuskindel
- Värvuselt on materjal hall

Tabel 8.5

PVC-C tehnilised näitajad [19]

Mehaanilised väärtused		
Tihedus	1,52	g/cm ³
Voolavuspiir	60	MPa
Tõmbetugevuse elastsusmoodul	2.400	MPa
Kõvadus (Rockwell H358/30)	110	MPa
Paindetugevus	76	MPa
Termilised väärtused		
Sulamistemperatuur	+114	°C
Soojusjuhtivus	0,14	W/(K*m)
Kasutamistemperatuur	-30/+102	°C
Elektrilised väärtused		
Dielektriline läbitavus	3	
Dielektriline tugevus	30	KV/mm
Pinnatakistus	10 ¹³	Ω

Rakendusvaldkonnad:

- Keemiatööstuses (joonis 8.7)
- Paberi ja tselluloosi töötlemine
- Farmaatsiatööstuses
- Tekstiilitööstuses
- Elektroonikatööstuses
- Kraanid, liitmikud (joonis 8.6)



Joonis 8.6 PVC-C liitmikud ja kraanid



Joonis 8.7 PVC-C profiiltorud [19]

8.6.PTFE+grafiit

Kui lisada teflonile, millel on juba head libisemisomadused, grafiiti, siis paranevad libisemisomadused veelgi. PTFE+grafiit talub kõrget survet ning materjal toimib ka väga kõrgetel temperatuuridel.

PTFE+grafiidi eelised tavalise tefloni ees on madal hõõrdetegur ning suurem pinnakõvadus kui modifitseerimata PTFE-l. Puudusteks võib pidada madalamat löögisitkust ja tõmbetugevust kui tavalisel PTFE-l. Materjal on sarnane topendi materjaliga (nt.grafiitpunutis) ning seda on võimalik töödelda.[20]

Materjali omadused [20]:

- Head libisemisomadused
- Kõrge keemiline vastupidavus
- Madal hõõrdetegur
- Suurem pinnakõvadus kui tavalisel PTFE-l
- Vastupidav veele, hapetele, alkoholile, lahustitele, õlidele
- Värvuselt on materjal must

Tabel 8.6

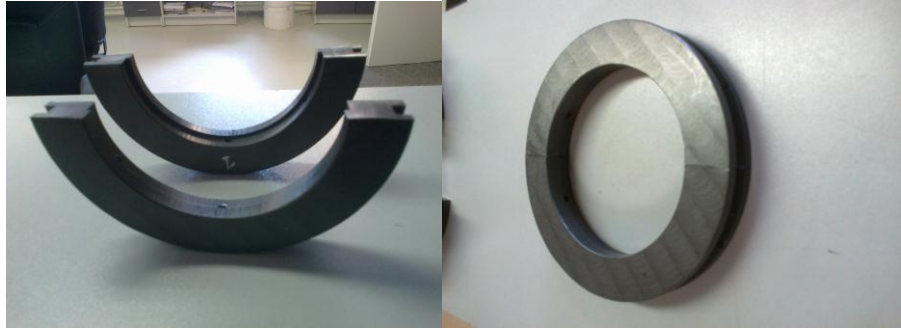
PTFE+grafiidi tehnilised näitajad [20]

Mehaanilised väärtused		
Tihedus	2,12	g/cm ³
Voolavuspiir	15	MPa
Tõmbetugevuse elastsusmoodul	1.275	MPa
Kõvadus (Rockwell H358/30)	38	MPa
Paindetugevus	9	MPa
Tõmbetugevus	20	N/mm ²
Termilised väärtused		
Sulamistemperatuur	+327	°C
Soojusjuhtivus	0,70	W/(K*m)
Kasutamistemperatuur	-200/+260	°C
Elektrilised väärtused		
Dielektriline läbitavus	-	
Dielektriline tugevus	2,8	KV/mm
Pinnatakistus	10 ³	Ω

Rakendusvaldkonnad:

- Sobib kõrget koormust kandvateks detailideks

- Keemiatööstuses
- Vee ja reovee tehnoloogia detailid
- Tsentrifugaalpumbad
- Klapid, ventiilid (joonis 8.8)



Joonis 8.8 PTFE+grafiit simmerlingid

8.7. EP GC (epoksü+kootud klaaskiud riie)

Komposiitmaterjali EP GC saab kasutada elektri- ja soojusenergia isolatsioonis. Tänu kõrgele mehaanilisele tugevusele, headele elektrilistele omadustele nii kuivas kui ka niiskes keskkonnas sobib EP GC kasutamiseks nii tööstusharudes, masinates ja seadmetes. Kuna materjal on süttimatu, siis on tal ka tuld tõkestavad omadused. [21]

EP GC materjal koosneb kuivatatud epoksüvaigust, mis on valatud klaaskiudriidest aluspinnale. Materjalil suudab säilitada oma kõrgeid mehaanilisi väärtusi ja elektriisolatsiooni omadusi nii kuivas kui niiskes keskkonnas. [22]

Materjali omadused [21]:

- Kõrge mehaaniline tugevus
- Head elektrilised omadused
- Süttimatu
- Värvuselt on materjal kollakasroheline
- Nullilähedane veeimavus

Tabel 8.7

EP GC tehnilised näitajad [22]

Mehaanilised väärtused		
Tihedus	1,7	g/cm ³
Voolavuspiir		MPa
Tõmbetugevuse elastsusmoodul	24000	MPa
Kõvadus (Rockwell M)	110	
Paindetugevus	340	MPa
Tõmbetugevus	250	N/mm ²
Elektrilised väärtused		
Dielektriline läbitavus	5,5	
Dielektriline tugevus	15,2	KV/mm

Rakendusvaldkonnad [22]:

- Elektri- ja soojusenergia isolatsioon
- Lülitid, releed (joonis 8.9)
- Seibid
- Trafo detailid



Joonis 8.9 EP GC pistik [22]

8.8.Nyrim

Nyrim on termoplast, mis on tuntud oma erakordse kabariitide stabiilsuse poolest suurel temperatuuri vahemikul -40°C kuni $+140^{\circ}\text{C}$. Peale selle on materjalil hea tugevus ning suur kulumiskindlus – need on tingitud materjali keemilisest struktuurist. Nyrim on elastomeerselt kohendatud nailon, antud komposiitmaterjali omadusi saab valikuliselt kontrollida, sõltuvalt otstarbest muutes elastomeeri sisu. Tavaliselt on elastomeeri osa 10-40% materjalist. Nyrimi valmistamisprotsessis saab kõrge ja madala viskoossusega vedelikke koos töödelda. Kui komponendid on korralikult segunenud, vormitakse materjal, kasutades madalat survet. Polümerisatsioon algab pärast vormi täitmist materjaliga. [23]

Nyrimist on ideaalne valmistada suuri, keerulisi ja paksuseinalisi detaile ning materjalist on väga mugav disainida erinevaid tooteid. Nyrimi eelisteks võib pidada, et temast saab toota väga suuri detaile (alates 200g kuni 6 tonni). [24]

Materjali omadused [23]:

- Hea kabariitide stabiilsus
- Kõrge väsimuskindlus
- Suur kulumiskindlus
- Hea löögitugevus
- Vastupidavus temperatuuri kõikumisel

Tabel 8.8

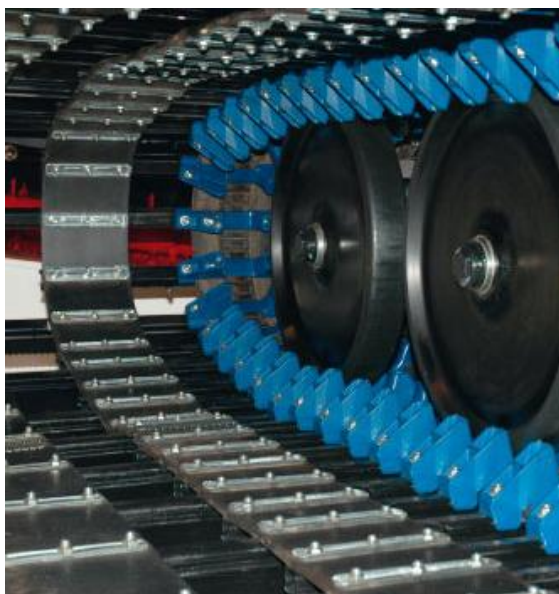
Nyrimi tehnilised näitajad [24]

Mehaanilised väärtused		
Tihedus	1,14	g/cm^3
Voolavuspiir		MPa
Tõmbetugevuse elastsusmoodul	430	MPa
Kõvadus (D shore)	58	MPa
Paindetugevus		MPa
Termilised väärtused		
Sulamistemperatuur	+213	$^{\circ}\text{C}$
Soojusjuhtivus		$\text{W}/(\text{K}\cdot\text{m})$
Kasutamistemperatuur		$^{\circ}\text{C}$

Elektrilised väärtused		
Dielektriline läbitavus	4,6	
Dielektriline tugevus		KV/mm
Pinnatakistus	$3 \cdot 10^8$	Ω

Rakendusvaldkonnad:

- Transport (rullid, konteinerid) (joonis 8.10)
- Masinate osad (joonis 8.11)
- Raskeveokite seadmed
- Ehitus (tüüblid, vihmaveerenni rest)
- Muu (nt. hambaarsti tool)



Joonis 8.10 Nyrimist roomiku rattad [24]



Joonis 8.11 Nyrimist auto õhuvõtu toru [24]

KOKKUVÕTE

Vajadus kirjutada antud lõputööd teemal "Infomaterjal Etra Balti AS-le plastmaatriksiga komposiitmaterjalidest" tekkis tänu sellele, et komposiitmaterjalid on tänapäeva tööstuses tähtsal kohal ning kõik müügiinsenerid peavad suutma kliendile pakkuda parimaid lahendusi. 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 näiteks lennukites, kosmoseaparaatides, tuumaenergeetika seadmetes jne. Tulenevalt komposiitmaterjali spetsiifilisest omadusest on õigustatud selle kasutamine ka masinaehituses, raudteetranspordis, laevaehituses, keemiatööstuses, elektrotehnikas ja mujal. Autor valis teemaks PMKM, sest puudus kompaktne ja ülevaatlik eesti keelne materjal, mis on vajalik kiire ülevaate saamiseks plastmaatriksiga komposiitmaterjalidest.

Lõputöös on antud ülevaade plastmaatriksiga komposiitmaterjalidest, nende liigitamisest, valmistamisprotsessidest, mehaanilistest omadustest ning rakendamisvõimalustest. Lähemalt võeti vaatluse alla 8 plastmaatriksiga komposiitmaterjali, milleks on Calaumid 1200 (PA 12 G), Oilamid (PA 6G + õli), Lubramid 600 T (PA 6 G + tahked määrained), PVC – C, PTFE + grafiit, Nylatron (PA 6 + molübdeensulfiidi pulber), EP GC (Epoksü + kootud klaaskiud riie) ja Nyrin. Tööga käib kaasas antud materjalidest näidistetahvel, kuhu on lisatud materjalide näidised ning nende lühikirjeldus.

SUMMARY

The necessity to write given thesis on subject „ Informative material of polymermatrix composites for ETRA BALTI AS“ was due to PMC is one of the leading articles in nowadays manufacturing industry. Because of its high price and complicated manufacturing technology, PMC are used in conditions, where other classical materials fail (very high and low temperatures, aggressive environments, cyclical loads, high vibration etc.). These kind of conditions are crucial for example in aviation, spaceindustry, nuclear energy and etc. Due to PMC specific properties, using them in engineering-, railway-, marine-, chemical-, electrotechnical industry is also justified. The author of this thesis chose PMC because there are no compact and summed materials in estonian, that is needed to get a quick and concentrated overview of PMC.

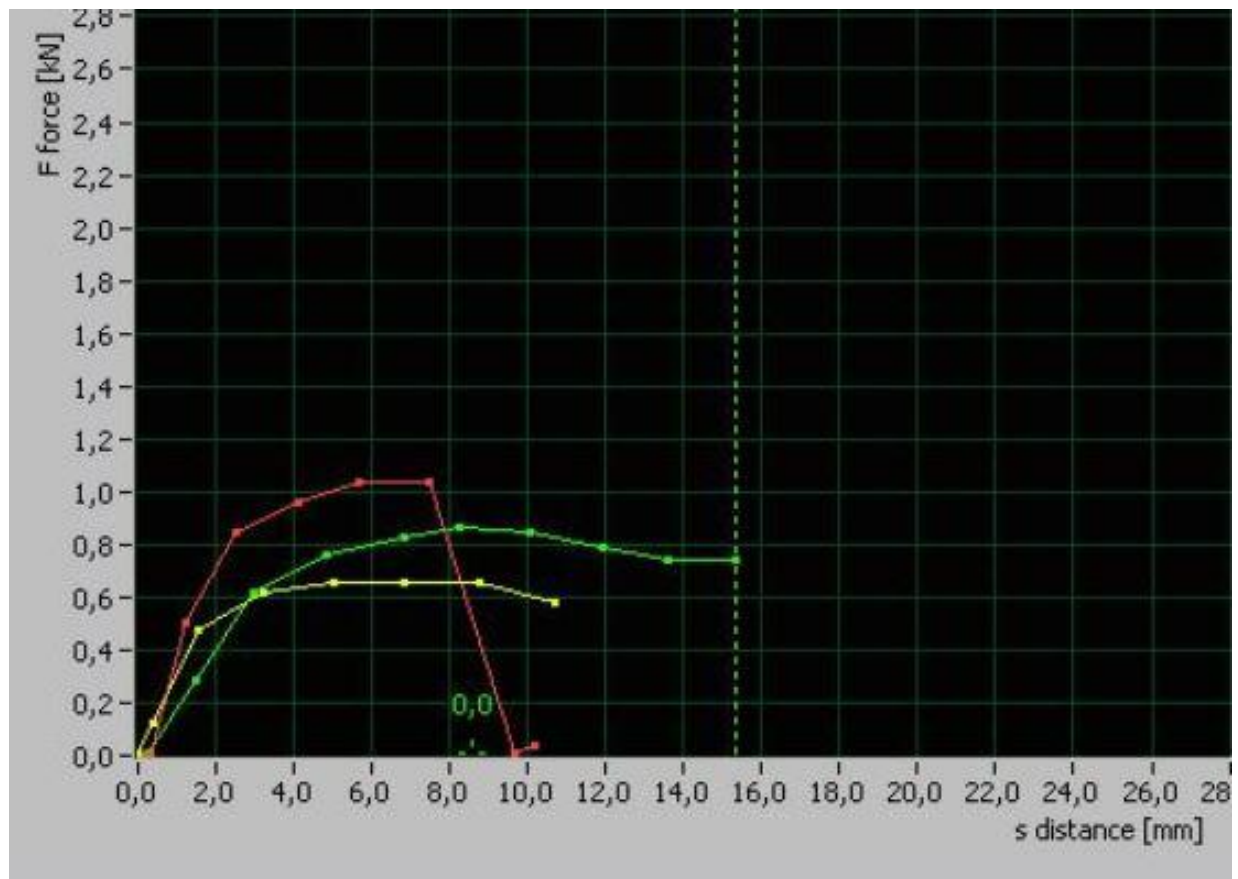
In this thesis, the author is giving an overview of plymermatrix composites and their classification, manufacutirng processes, mechanical properties and areas of use. 8 PMC materials Calaumid 1200, Oilamid, Lubramid 600T, PVC – C, PTFE + graphite, Nylatron, EP GC and Nyrin has been taken under special observation and a specific overview of those materials has been given. There is also a plaque samples of those materials that go with given thesis, where a sample and a specification of those 8 materials are given.

VIIDATUD ALLIKAD

1. Daniil Arensburger (2005) Komposiitmaterjalid, TTÜ Kirjastus
2. PMKM armatuur [WWW]<http://www.globalspec.com/reference/69955/203279/chapter-15-composite-materials> (03.05.2013)
3. Epoksüvaik [WWW]<http://www.ukindustrialflooring.co.uk/> (2.05.2013)
4. Polüestervaik [WWW]<http://forum.woodenboat.com/showthread.php?131553-Interlux-InterProtect-or-Pettit-Protect> (2.05.2013)
5. Fenoolvaik [WWW]<http://www.tradekorea.com/sell-leads-detail/S00015447/Rosin%20modified%20Phenolic%20Resin.html> (02.05.2013)
6. Silikoonvaik [WWW]http://www.taiwantrade.com.tw/carolyoung/products-detail/en_US/276991 (3.05.2013)
7. Valmistamisviisid [WWW]<http://composite.com.au/composite-moulding-technology/compression-moulding.html> (16.05.2013)
8. PMKM [WWW]<http://www.tnu.edu.vn/sites/khoann/Lectures/Introdution%20Composite%20material/Composite%20manufacturing%20techniques.pdf>
9. Komposiitmaterjalid [WWW]<http://www.plasticsindustry.org/> (28.04.2013)
10. Myer Kutz (2002) Handbook of Materials Selection, John Wiley&Sons Inc.
11. PMKM [WWW]<http://www.princeton.edu/~ota/disk2/1988/8801/880106.PDF> (27.04.2013)
12. Lehtvedru [WWW]http://www.strongwell.com/selected_markets/comp_driveshaft/ (27.04.2013)
13. PMKM lennuk [WWW]<http://airpigz.com/blog/2010/11/29/algie-composite-aircraft-lp1-385-mph-at-fl290-145-gph.html> (2.05.2013)
14. I-tala [WWW]<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X05000357> (27.04.2013)
15. Designing with engineering Plastics (2004) Licharz

16. Oilamidi kasutuskohd [WWW]http://img.winkel.de/article/PR_4.073_P.jpg (11.03.2013)
17. Lubramidi kasutusala [WWW]<http://www.aikolon.fi/img/sivut/normal/84.jpg> (19.04.2013)
18. Industrial plastics [WWW]<http://www.mpindustrialplastics.co.uk/nylon.html> (11.03.2013)
19. Thermoplastics 2011 Gehr
20. PTFE+grafiit[WWW]<http://www.eagleburgmann.com/products/compression-packings-gaskets/packings-for-valves/extruded-ptfe-graphite-packing-6655> (18.04.2013)
21. EP GC andmeleht [WWW]<http://www.siamat.info/downloads/SW-LAMINA-EPGC-202-ENG.pdf> (21.03.2013)
22. EP GC kasutusala [WWW]<http://www.beadelectronics.com/applications-connector.htm> (10.03.2013)
23. Brüggemann chemical [WWW]<http://www.brueggemann.com/english/nyrim.html> (10.03.2013)
24. Nyrim [WWW]<http://www.specialchem4polymers.com/sf/bruggemann/index.aspx?id=nyrim> (20.03.2013)

Lisa 1. Nylatroni tõmbegraafik



Lisa 2. Oilamidi tõmbegraafik

