



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

MEHAANIKA JA TÖÖSTUSTEHNIIKA INSTITUUT

**KERAAMILISEST KOMPOSIIDIST
PIDURDUSELEMENTIDE VALMISTUSTEHNOLGOOGIA
TUDENGIVORMELILE**

**CERAMIC COMPOSITE BRAKING ELEMENT
MANUFACTURING TECHNOLOGY FOR FORMULA
STUDENT CLASS CAR**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Rico Jaanipere

Üliõpilaskood 192354 MATM

Juhendaja: Marek Tarraste, Teadur

Tallinn 2021

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“26” Mai 2021.

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 20.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”.....20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Rico Jaanipere

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose KERAAMILISEST KOMPOSIIDIST PIDURDUSELEMENTIDE VALMISTUSTEHNOLOGIA TUDENGIVORMELILE,

mille juhendaja on Marek Tarraste,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

26.05.2021 (kuupäev)

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti

Mehaanika ja tööstustehnika instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Rico Jaanipere, 192354 MATM
Õppekava, peeriala: Tootearendus ja tootmistehnika, MATM
Juhendaja(d): Marek Tarraste, Teadur, 6203356
Konsultant:

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Keraamilisest Komposiidist Pidurduselementide Tootmistehnoloogia
Tudengivormelile

(inglise keeles) Ceramic Composite Braking Element Manufacturing Technology For
Formula Student Class Car

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Leida võimalik tootmistehnoloogia keraamilisteks pidurduselementide tootmiseks
2. Pakkuda välja tudengivormelile lahendus
3. Luua platvorm edaspidisteks arendusteks keraamiliste pidurduselementide tootmiseks

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Materjalide ja kirjandusega tutvumine	10.2020
2.	Esialgsete katsetuste läbiviimine	11.2020
3.	Katsetuste teostamine, testimine ja analüüs	04.2020
4.	Diplomitöö kirjutamine	05.2020

Töö keel: Eesti

Lõputöö esitamise tähtaeg: " 26 Mai 2021 a

Üliõpilane: ".....".....20.....a
/allkiri/

Juhendaja: ".....".....20.....a
/allkiri/

Konsultant: ".....".....20.....a
/allkiri/

Programmijuht: ".....".....20.....a
/allkiri/

SISUKORD

1. SISSEJUHATUS	8
2. SÜSINIKKERAAMIKA JA TEMA KASUTUSVALDKONNAD	10
2.1 Kosmosetööstus ja lennundus.....	11
2.2 Keraamilised pidurisüsteemid autospordis	13
2.3 Tudengivormeli pidurisüsteem	15
3. MATERJALIDE VALIK JA TOOTMISMETOODIKA	18
3.1 <i>Green body</i> tooriku valmistamine.....	19
3.1.1 Armatuurid	20
3.1.2 Maatriksid.....	24
3.2 Poorse tooriku tootmine.....	25
3.3 Räniga immutamine	28
4. TOOTMISMEETODITE KATESTAMINE	30
4.1 <i>Green Body</i> katsekehad	30
4.1.1 Armatuuri ja maatriksi valik	32
4.2 Poorsed süsinik-süsinik katsekehad	34
4.3 Sulametalliga immutamine.....	36
5. KATSEKEHADE ANALÜÜS.....	38
5.1 Röntgen difraktsioon	38
5.2 Kolme punkti painde katsetused	40
5.3 Kõvaduse mõõtmised	43
KOKKUVÕTE	45
SUMMARY.....	48
LISAD	51
GRAAFILINE OSA.....	53

EESSÕNA

Käesoleva diplomitöö teema on valitud autori huvist keraamiliste pidurduselementide vastu. Töö koostamine ja detailide tootmine toimus Tallinna Tehnikaülikooli katselaborites ja Tallinna Tehnikakõrgkooli tudengivormeli ruumides.

Töö autor soovib tänada Tallinna Tehnikaülikooli teadurit ja töö juhendajat Marek Tarrastet, vanemlektorit Mart Saarnat, ettevõtet Magnetic MRO ja vanemteadur Lauri Kollot.

Lühendite ja tähiste loetelu

CVI – Keemiline auruga infiltreerimine

FEST19 – Tudengivormeli meeskonna FS Team Tallinn 2019/2020 hooaja võistlusauto

FEST20 – Tudengivormeli meeskonna FS Team Tallinn 2020/2021 hooaja võistlusauto

MI – Sulametalliga immutamine, *melt infiltration*

PAN – Polüakrüülnitriil

XRD – *X-ray diffraction*, röntgen difraktsioon

1. SISSEJUHATUS

Käesoleva lõputöö teemaks on keraamilisest komposiidist pidurduselementide valmistustehnoloogia tudengivormelile. Töö teema valiti lähtudes autori huvist keraamikamaatrikskomposiitide sidumisest võistlusautode pidurisüsteemi. Teema on lai ja küllaltki mahukas, kuid töö autor on seisukohal, et algteadmiste loomine on tähtis ja annab võimaluse töö tulemuste abil edasi arendada valdkonna tooteid. Tulenevalt Pareto laialt levinud printsibiist mille kohaselt 20% tööst teeb 80% tulemuse, on oluline luua vundament, mis kataks suurema osa tulemusest, et tulevikus saaks tegeleda tootmisprotsesside peenhäälestamisega.

Tudengivormeli võistlussari on loodud eesmärgiga pakkuda ülikooli tudengitele praktilist platvormi ja kogemusi autotööstuse vallas. Tootearendusvõistluse käigus arendatakse igal aastal uus vormel uute lahendustega. Seetõttu on uute tehnoloogiate ja detailide tootearendus igal aastal tähtis konkurentsipüsimiseks. Pidurisüsteemi arendus on tähtis sõiduomaduste parendamiseks ja kohtunike ees lahenduste kaitsmiseks.

Süsinik-süsinik komposiit on üks vanimaid keraamikamaatrikskomposiitide klassi kuuluvaid komposiite. Tänu headele omadustele kõrgetel temperatuuridel (hea kuumuspüsivus ja termolöögikindlus ning madal soojuspaisumistegur) on süsinik-süsinik komposiit asendamatu materjal nii mõneski tööstusharus, nt. kosmosetööstus. Selle materjali omadused sõltuvad suuresti üksikutel valmistusetappidel kasutatavatest protsessi parameetritest. Lisades süsinik-süsinik komposiidile täitematerjale (näiteks keraamiline maatriks) on võimalik tõsta ka mehaanilisi omadusi.

Töö eesmärk on saavutada esmane süsinik-süsinik komposiitide teoreetiline ja praktiline tootmisprotsesside ülevaade, mille sarnast on Eestis vähesel määral tehtud. Käesoleva töö eesmärgi saavutamiseks uuritakse erinevaid komposiitmaterjale, võrreldakse tootmismeetodeid süsinik-süsinik produkti loomisel ja luuakse teoreetiline ja praktiline teadmine saavutamaks räni sisaldusega keraamikamaatrikskomposiiti. Lisaks eelnevale tekib juurde Eestis kompetents keraamiliste pidurisüsteemide tootmisest. Töö annab Tallinna Tehnikaülikooli ja Tallinna Tehnikakõrgkooli tudengivormeli meeskonnale juurde teadmisi, kuidas valmistada keerukaid pidurisüsteemi komponente.

Insenertehniliste lahenduste tulemused ja ringiaja langus, mida keraamiline pidurisüsteem võib kaasa tuua on veel teadmata, kuid uudsus ja esmakordne

kasutamine toob tulevikus õnnestumise korral noortest inseneridest koosnevale FS Team Tallinna tudengivormeli meeskonnale eelise kõigi teiste suurte ülikoolide meeskondade ees. Pealtnäha keerukas ja kulukas pidurisüsteemi tootmisprotsess võib tudengivormelil tuua märkimisväärseid muutusi sõiduki dünaamikas ja arendusprotsessis ning harida valdkonna noori spetsialiste.

Töö esimeses peatükis võrreldakse tudengivormeli viimaseid pidurisüsteemi komponente ja analüüsitakse süsteemi materjalide vahetamist keraamiliste pidurisüsteemide vastu. Arvutatakse välja süsteemile mõjuvad jõud, teadmaks millele peavad uue tootmismeetodiga toodetud pidurisüsteemi komponendid vastu pidama. Oluline on teada, mis omadustele peavad tootmismeetodi etapid võimelised olema materjali saavutama, et sellest tudengivormeli sõidukil kasu oleks. Tuuakse välja erinevad valdkonnad ja põhjused, miks neid kasutatakse.

Magistritöö põhiosas uuritakse tootmisetappe, tuuakse välja võimalikud etapid süsinik-süsinik keraamikamaatrikskomposiidi valmistamiseks ja analüüsitakse tehnoloogia kitsaskohti. Kirjanduses kirjeldatud etappidele ja teoreetilistele teadmistele on võimalik tutvuda tootmisetappide erinevustega ning kaardistada iga tootmisetapi positiivsed ja negatiivsed küljed. Õigete tootmisetappide kasutamine loob hea teadmiste aluse, mida on võimalik tulevikus tudengivormeli pidurisüsteemi projekteerimisel kasutada.

Töö viimases peatükis katsetatakse tootmisetappides saavutatud tulemusi erinevate katsemeetoditega, uurides selleks erinevaid parameetreid. Katsetustega soovitakse kindlaks teha etappides toimunud materjali muutused, need fikseerida ja teha seejärel ettepanekud parendamiseks tootmisetappe.

Sellisel viisil toodetud materjalid, kompetents ja majanduslik aspekt on tähtis ka Eesti ettevõtlusele, kes antud materjalide tootmismetoodikaid ja oskusteavet omades võivad saavutada eelise konkurentide ees, luues Eestisse juurde valdkonnaspetsiifilisi töökohti ja panustades Eesti majanduse kasvu. Kitsas valdkond nagu keraamilised materjalid on tulevikus tõenäoliselt üks suuremaid arengusuundi loomaks uusi tehnoloogiaid elektroonika, transpordi ja energeetika valdkondades.

2. SÜSINIK-SÜSINIK KERAAMIKA JA TEMA KASUTUSVALDKONNAD

Süsinik-süsinik keraamikat kasutati vähesel määral kuni hiliste 1960. aastateni. Seejärel hakkas kosmosetööstus vajama kuumuskindlaid materjale, mis oleksid kerged, väikse soojuspaisumisega, omadustelt stabiilsed kõrgetel temperatuuridel, kõrge löögikindluse ja jäikusega. Grafiidil teati olevat suurel hulgal vajalike omadusi, kuid parandamist vajasisid tugevus ja jäikus. Polüakrüülnitriili (PAN) baasil toodetud süsiniku ja kiuga tugevdatud plastide suur areng andis tõuke süsinik-süsinik tehnoloogia laiemale uurimisele nii Põhja-Ameerika kui ka Euroopa laborites [1].

Süsinik-süsinik materjalide kasutusvaldkonnad on olnud aastakümneid piiratud. Eelkõige on materjali laialdasemat kasutust pärssinud toote kõrge lõpphind. Hinda ja materjali laialdasemat kasutamist mõjutavad kaks suurt piiravat tegurit. Esiteks on tootmismeetodid lõpptoote saamiseks ebaefektiivsed, teiseks hakkab süsinik-süsinik komposiit alates 400°C juures hapniku olemasolul kiirelt oksüdeeruma [2].

Kohati võivad hinnaklassid jääda suurtesse vahemikesse olenevalt tootmismeetodist, pinnakatetest või nõutud materjali parameetritest. Kokku on leitud, et kõige odavamad materjalid on 150 naela kilogrammi kohta, kuid kõige kallimad suure tihedusega ruumilised materjalid, mida kasutatakse raketi mootori komponentides, võivad küündida kuni 1000 naelani kilogrammi kohta. Tabelis 1 on näidatud tootmisprotsesside otsesed kulud etappide vahel protsentuaalselt [2].

Tabel 1. Süsinik-süsinik materjali tootmiskulud erinevates etappideks [2].

Tootmisprotsessi osa	Protsent kogu maksumusest, %
Süsinik kangas	17
Kudumine	17
Maatriks materjal	2
Tootmine	40
Pinnakatted	12
Kasumimarginaal	12

Kosmosetööstuse üheks tulemuseks võib lugeda ka insenertehniliste lahenduste ja teadusalaste saavutuste edasikandmist inimeste igapäevaellu. Üheks selliseks näiteks

on just süsinikkiuga tugevdatud keraamilised pidurikettad, mille keraamilise osa moodustab ränikarbiid (SiC). Samuti mitmekordselt immutatud süsinik-süsinik komposiidist detailid lennukite mootorites, mis on loonud meile võimaluse lennata efektiivselt ja turvaliselt erinevate riikide vahel.

Triboloogiliste katsetustega on leitud, et räniga rikastatud ning süsinikkiuga tugevdatud süsinikust materjalil on vähene kulumine ja kõrge hõõrdetegur suurte energiakoguste juures, kus materjalid on ülekoormatud. Sellest tulenevalt kasutatakse süsinikust pidurisüsteeme mitte ainult sõidukites, vaid ka hädapidurdussüsteemides, liftides, kraanades ja elektriajamites [3].

Suurimaks väljundiks süsinik-süsinik komposiidist piduriketastele on autotööstus, lennutransport ja motosport. Kõigis nendes valdkondades omab kriitilist tähtsust Newtoni teine seadus, mis ütleb, et kehale mõjuv jõud võrdub keha massi ja selle jõu poolt kehale antud kiirenduse korrutisega. Vähendades ainuüksi massi, saavutatakse lennunduses väiksem kütusekulu, mootorisporis kiiremad ringiajad ning autotööstuses suurema töövahemikuga efektiivsed pidurikettad. Lennunduses kasutatavad pidurisüsteemid on näidatud joonisel 1 [4].

2.1 Kosmosetööstus ja lennundus

Olles esimene tööstus, kus antud omadustega materjali järele nähti vajadust, ei ole tänaseni leitud paremat kombinatsiooni kosmosesüstikute komponentide tootmiseks. Esmakordselt kasutati süsinik-süsinik komposiidist detaile kosmosesüstiku ninas ja tiibadel. Kosmosesüstik saavutab maa atmosfääri sisenedes temperatuuri ca 2000°C, mis on metallide töötemperatuuri vahemikust väljas. Materjal peab taluma madalat töötemperatuuri kosmoses, kõrgeid temperatuure maa atmosfääri sisenedes ja seda mitmeid kordi eluea jooksul [1]. Lennunduses kasutatavate pidurisüsteemi komponentide materjalide omadused on näidatud tabelis 2.

Tabel 2. Lennunduses kasutatavate pidurisüsteemi süsinik-süsinik komponentide omadused [5].

Omadus	Suurus	Ühik
Tihedus	1.72 - 1.78	g/cm ³
Avatud poorsus	10 - 6	%
Paindetugevus	60-90	MPa
Survetugevus	120-140	MPa
Nihketugevus	7.5 - 11.5	MPa
Soojusjuhtivus	45-110	W/mK



Joonis 1. Lennunduses kasutatav süsinikust pidurisüsteem [4].

Lennukitel kasutatav pidurisüsteem koosneb pöörlevatest ja seisvatest süsinik-süsinik piduriketastest, mis pidurdusmomendil hõõrdumise tagajärjel saavutavad pinnatemperatuuri kuni 2000°C. Samas peavad pidurikettad olema võimelised neelama lennuki kineetilist energiat pidurdamisel ja toimima jahutuselemendina. Pidurdamisel tekkiv soojushulk võib olla suurusjärgus mitusada MJ. Kõrge soojusjuhtivus ja madal soojuspaisumistegur on muutnud süsinikust pidurikettad lennunduses ideaalseks valikuks [2].

2.2 Keraamilised pidurisüsteemid autospordis

Autotööstuses on süsinikkomposiidist pidurikettad kasutusel vähesel määral, jäädes luksus- ja sportautode varustustesse. Peamine põhjus on hind võrreldes terasest piduriketastega. Süsinik-ränikarbiid keraamikamaatrikskomposiidist piduriketta hind ostes lisavarustusena juurde Porsche Taycan elektrilisele sportautole võib küündida kuni 9010 euronni [6].

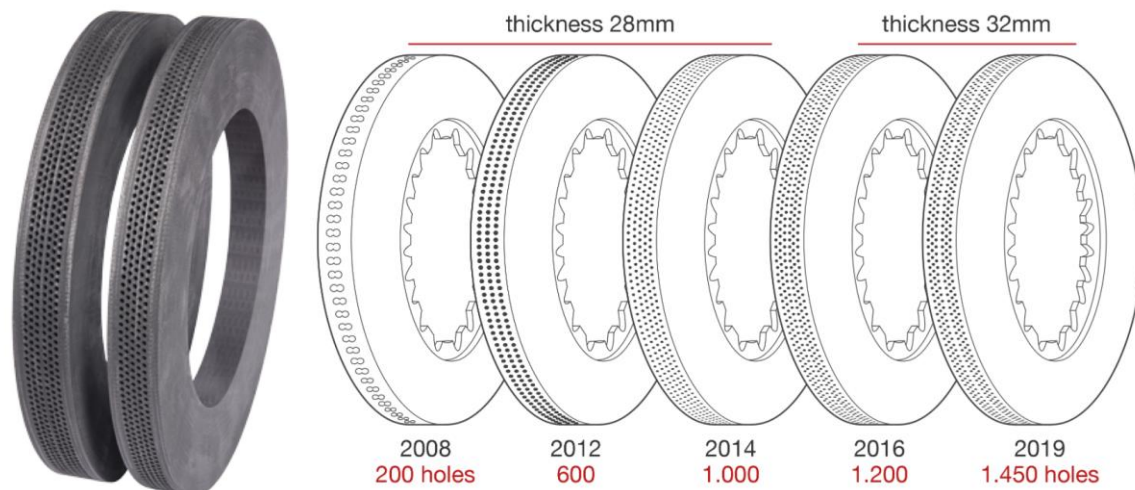
Tänavasõidukite kallite piduriketaste hinnaga kaasnevad ka mitmeid eeliseid. Näiteks massivõit, sõiduomaduste paranemine, parem reageerimisvõime, lühike ja stabiilne pidurdusmaa, korrosiooni kaitse, väiksem kulumiskiirus ja pidurivibratsiooni puudumine [7].

Enne kui piduriketas asetatakse metallist võru peale, millega ta sõiduki rummu külge kinnitatakse tuleb teostada veel pinnakatte lisamine, kaitsmaks pidurikomponente oksüdeerumast. Kogu protsessi jooksul on tähtis, et kõik mehaanilised töötused teostatakse pidurikettale enne, kui lisatakse räni ja pinnakatted, sest ränikarbiidi tekkega muutub materjal kehvasti töödeldavaks ning piduriketta hind kasvab seetõttu veelgi [7].

Mootorisporid, kus eelarved on lõpmata suured ning võitmise nimel ei tehta pidurisüsteemis järeleandmisi, leiab muu tehnoloogia kasutajaid vähe. Võrreldes tänavasõidukitega on vormelitel kasutusel sarnaselt toodetud pidurikettad nagu eelmainitud kosmosetööstuse detailidel, kasutamata ränikarbiidi. Kuninglikus vormelisarjas kasutatava piduriketta avalikud andmed on näidatud tabelis 3.

Tabel 3. Brembo S.p.A poolt arendatud Vormel 1 sarja pidurisüsteemi avalik info [8].

Omadus	Suurus	Ühik
Piduriketta mass	1 – 1.2	kg
Piduriklotsi mass	0.2	kg
Lubatav hõõrdetegur	0.7 – 0.9	hõõrdetegur
Piduriketta eluiga	1200	km
Piduriklotsi eluiga	800	km
Temperatuuri vahemik	623.15 - 1273.15	K
Tootmisaeg	5 – 6	kuu



Joonis 2. Brembo S.p.a piduriketaste areng Vormel 1 võistlussarjas [8].

Saamaks rohkem aimdust, milleks on võimelised süsinik-süsinik pidurisüsteemid F1 vormelisarjas, saame arvutada mõjuvad jõud teades maksimaalseid pidurdusel mõjuvaid kiirendusi. Reeglistiku järgi on minimaalne lubatud mass vormelitel 752 kg koos juhi ja ilma kütusega. [9] Leides mainitud kaks muutujat, saame arvutada välja ratastele mõjuva pidurdusmomendi. Esmalt arvutame ratta kontaktpunktile mõjuva jõu ja seejärel korrutame ratta raadiusega. Tulemuse saame kasutades valemit (2.1) [10].

$$M_{FL} = \frac{m * a * W_t}{2} * r \quad (2.1)$$

, kus

M_{FL} – Moment esimesel vasakul rattal, Nm,

m – sõiduki mass, kg,

a – pidurduskiirendus, m/s^2 ,

W_t – kaaluüberjaotuse konstant,

r – rehvi raadius, m.

Piduriketta tootja koduleheküljel on toodud maksimaalseks pidurduseks Marina Bay Street Circuiti seitsmendas kurvis kiirendus 4.98g. Reeglitega vastavuses olev vormel on minimaalse massiga 752 kg, pidurdushetkel kandub 90% kogu vormeli massist

esiteljele, rehvi diameeter on 670 mm. Asendades loetletud arvud valemisse (2.1), saame kätte rattale mõjuva momendi.

$$\frac{752 \text{ kg} * 48.85 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0.9}{2} * 0.335 \text{ m} = 5537.83 \text{ Nm}$$

Arvutuses saame teada, et vormel 1 sarjas võistleva sõiduki maksimaalsel pidurdushetkel tekib rattale 5537.83 Nm suurune moment. Jõuõla erinevuse tõttu on pidurikettal mõjuv pikijõud suurem kuid moment on võrdne. See tähendab, et antud tootja pidurikettad ei pea kannatama ainult suurt kuumust vaid olema ka materjali omadustelt vastupidavad, vähese kulumisega ja juhtima kogu kineetilisest energiast tulenevat soojust kiiresti edasi.

2.3 Tudengivormeli pidurisüsteem

Tudengivormeli võistlussari kujutab endast üheistmeliste prototüüpsõidukite insenertehnilist võistlust, kus võidusõit ja tootearendus on tihedalt seotud. Uued insenertehnilised lahendused ning nende mõju sõiduki dünaamikale ja ringiajale on võistlustel kriitilise tähtsusega.



Joonis 3. Tudengivormeli meeskonna FS Team Tallinn vormel FEST19 koos hooaja jooksul võidetud karikatega.

Tudengivormeli FS Team Tallinn võistlusautodel on kasutusel ketaspiduriga pidurisüsteemid. Pidurisüsteem on jagatud kaheks, kus üks peasilinder kontrollib esiteljel paiknevaid pidurisadulaid ja teine peasilinder taga telje pidurisadulaid. Hooaegade jooksul on kasutatud pidursadulate ja peasilindritena ettevõtte ISR tooteid. Piduriketaste materjal on aga muutunud ning erinevatele sõidukitele on erinevatel aastatel arendatud erinevate paksuste, diameetrite ja geomeetriaega pidurikettaid.

Vormel 1 sarja sõiduki teoreetiline pidurdusmomendiks saadi arvutuste teel 5537.83 Nm. Teades tudengivormeli FS Team Tallinna FEST20 võistlusauto parameetreid, saame arvutada samuti piduritele mõjuva momendi ning neid võrrelda kuningliku vormelisarja saadud tulemusega. FEST20 andmed on näidatud tabelis 4.

Tabel 4. FEST20 võistlusauto parameetrid.

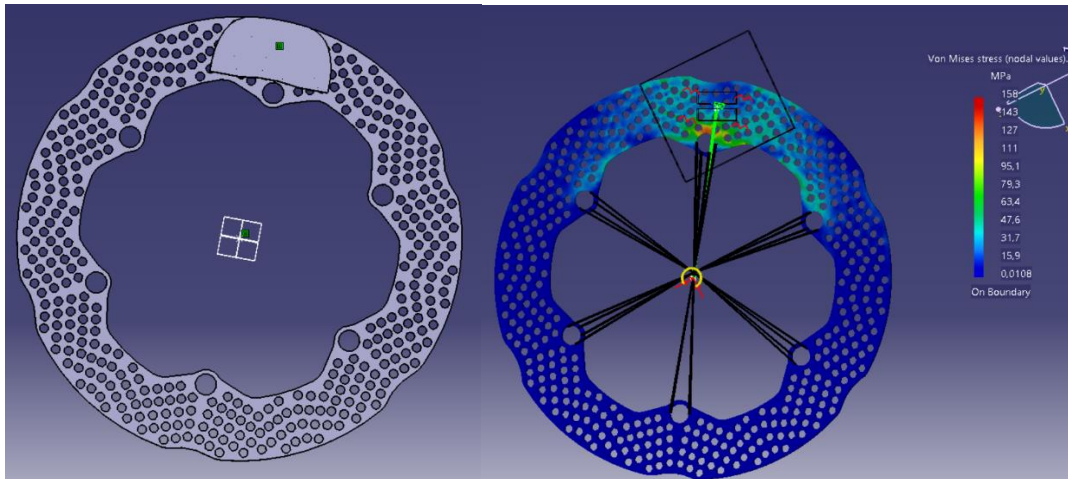
Parameetrid	Väärtus	Ühik
Teljevahe	1530	mm
Rööbe esiteljel	1213	mm
Rööbe taga teljel	1187	mm
Mass (koos juhiga)	248	Kg
Kaalujaotus	50	%
Pidurdusel saavutatud kiirendus	1.2	g
Kaalujaotus saavutatud kiirendusega esiteljel	70	%
Piduriketta diameeter	185	mm
Rehvi diameeter	406.4	mm

Asendades tabelis 4 näidatud parameetrid, saame arvutada pidurikettale mõjuva momendi kasutades valemit (2.1).

$$\frac{248 \text{ kg} * 11.77 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0.7}{2} * 0.203 \text{ m} = 207.43 \text{ Nm}$$

Keraamiliste piduriketaste kasutamine annaks FS Team Tallinnale eelise teiste konkurentide ees. Prototüüp võistlusautoga võisteldes ei olene tulemus pelgalt ringiajast, vaid kohtunikele tuleb ka kaitsta arendatud ja toodetud lahendusi. Kaitsmisel annab tippklassi isearendatud ja toodetud pidurisüsteem palju eeliseid tõestamaks kohtunikele meeskonna insenertehnilist võimekust. FEST20 vormelautole

projekteeritud esitelje terasest pidurikettad on massilt 266,9 g, ning pidurikettad peavad taluma pidurdust, mis tekitab pidurikettale maksimaalselt 158 MPa pinge piduriketta kinnituskoha olles kahekordse varuteguri piirides.



Joonis 4. FEST20 vormelauto esitelje terasest pidurikettad. [11]

Avalikel tootjate ja CES Edupack andmelehtedelt lugedes on pidurisüsteemides kasutatav süsinik-süsinik materjali tihedus vahemikus 1.68 g/cm^3 kuni 1.8 g/cm^3 . Tudengivormelil FEST20 on kasutusel esi teljel terasest ja taga teljel titaanist pidurikettad. Võrreldes praegu esi teljel kasutatavate piduriketastega, mille tihedus on 8.0 g/cm^3 , on sama geometriaga võimalik võita massilt üle nelja korra.

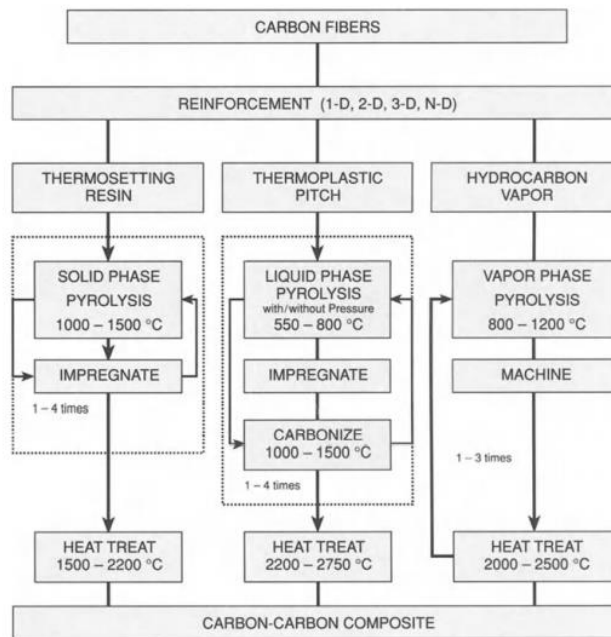
Nii taga teljel, kui ka esiteljel on tudengivormelil katsetatud titaanist pidurikettaid, kuid kehva soojusjuhtivuse pärast, mis põhjustas pidurisüsteemi tihendite sulamist, vahetati esisilla pidurisüsteem terase S355 vastu, mille soojusjuhtivustegur on ligi kolm korda suurem. Vahetades pidurisüsteemide komponendid keraamilisest komposiidist detailide vastu oleks võimalik saavutada massivõit mida otsiti titaanist piduriketastega, parema soojusjuhtivusteguriga pidurisüsteem ning võita sõiduomadustes (tänu stabiilsele hõõrdetegurile). Selline lahendus annaks võimaluse teostada keerulisi aerodünaamika lahendusi, mis ei peaks enam arvestama pidurite jahutamisega.

3. MATERJALIDE VALIK JA TOOTMISMETOODIKA

Komposiitmaterjale võib nimetada kahe või enama materjali kombinatsiooniks, mille liitmise tulemusena saavutatakse paremad materjali omadused võrreldes baasmaterjale eraldi kasutades. Neid kahte komponenti nimetatakse armatuuriks ja maatriksiks [5].

Keraamikamaatrikskomposiidid on kõrge töötemperatuuriga materjalid. Võrreldes teiste struktuursete materjalidega on nad küllaltki uued ja paljud neist on alles väljaarendamisel. Keraamikamaatrikskomposiitide perekonda kuuluvatel süsinik-süsinik komposiitidel on kõrge tugevuspotentsiaal, mis tuleneb neis armatuurina kasutatavast süsinikkiust. Süsinikkiul on kõrge elastsusmoodul, hea keemiline stabiilsus (inertsus) ja väike soojuspaisumistegur. [7]. Tänapäeval on 90% süsinik-süsinik komposiitides armatuurina kasutusel olevast süsinikkiust toodetud polüakrüülnitriilist.

Süsinik-süsinik detaili valmistamiseks on mitmeid võimalusi, mis on näidatud joonisel 5. Samu protsesse ja nendega seonduvaid etappe kirjeldatakse järgnevalt.



Joonis 5. Süsinik-süsinik komposiidi tootmisprotsessid ja nende etapid [1].

3.1 *Green body* tooriku valmistamine

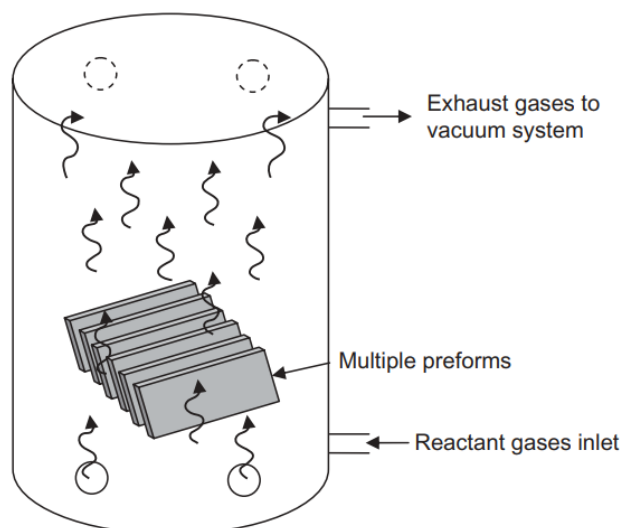
Süsinik-süsinik komposiidi valmistamiseks immutatakse süsinikkiud polümeervaiguga, pressitakse *green body* toorik ja karboniseeritakse 800-1500 °C juures. Tulemuseks on süsinikarmatuuriga (kiud) ja süsinikmaatriksiga (amorfne süsinik) komposiit [12].

Protsessi käigus ja jahutamise ajal tekivad materjalis poorid ja praod. Tiheduse tõstmiseks ja poorsuse vähendamiseks korratakse sama protsessi mitmeid kordi kuni saavutatakse soovitud tihedus [13].

Enne kirjeldatud protsessi tuleb luua *green body*. Selles on segatud kokku armatuur ja maatriks, mis seejärel vastavalt protsessile on kõvendatud. Süsinik-süsinik detaili saamiseks on võimalik armatuuri infiltreerida maatriksiga kahel erineval meetodil [7]:

- polümeervaiguga immutamine;
- keemiline auruga immutamine (CVI).

Keemiline auruga immutamine on kõige atraktiivsem meetod valmistamiseks keraamikamaatrikskomposiite. CVI on protsess, kus poorne toorik asetatakse gaasikeskkonda, mis termiliselt aktiivsena laguneb ning annab tahke sademe, mis omakorda täidab tooriku sees olevad poorid. Selle protsessi suurim eelis on keerukate ja poorsete geometriate tootmine madalal temperatuuril, aga puudusteks tootmisaeg, mis võib kesta nädalaid. CVI protsessi skeem on näidatud joonisel 6 [14].



Joonis 6. CVI protsessi skeem, kus näidatud gaaside voolavust protsessi käigus [14].

Tooriku tootmismeetodi valimisel tuleb lähtuda suuresti detaili geomeetriast. Kuna pidurikettad on küllaltki suured ning võivad oma paksuselt olla kordades suuremad terasest piduriketastest, ei ole soovitatav kasutada CVId, sest protsessi jooksul sadestub saagis pigem pinnakihtidesse [13].

CVI suurim puudus on protsessist tulenev sadestumine, mille tulemusena toimuvad reaktsioonid välis pindade juures või nende lähedal, sulgedes kiiresti tee sisemiste poorideni. Probleemi lahendamiseks kasutatakse madalaid temperatuure ja rõhku, mis toob omakorda kaasa pikema tootmisprotsessi ja vähendab efektiivsust [5].

Mõnevõrra kiirem protsess saamaks süsinik-süsinik komposiiti on polümeervaiguga immutamine. Termoreaktiivseid vaike on kasutatud laialdaselt kaubanduslikel eesmärkidel tänu nende heale võimele olla toatemperatuuril vedelas olekus mõõdukalt viskoossed ning vajadusel polümeriseeruda, moodustades kuumutamisel mittesulava tahke aine. Termoreaktiivsetel vaikudel on keemiliselt moodustunud või varajases pürolüüsitsükli moodustuv ringjas molekulaarstruktuur, et saavutada kõrge süsiniku saagis. Seetõttu, koos molekulaarstruktuuriga, on nende pürolüüsi protsessis käitumine võrdselt tähtis saavutamaks suure tihedusega süsinik-süsinik toorikut [1].

Termoreaktiivse vaiguga immutamine algab materjali ettevalmistamisega, mis koosneb tükeldatud süsinikust ning kuhu on juurde segatud termoreaktiivne vaik. Segu asetatakse metallvormi, kus ta soojuse ja rõhu koosmõjul kõveneb. Kõvenemise käigus materjal kõigepealt voolab, et täita optimaalselt metallist vorm. Enamasti lisatakse maatriksina fenoolvaiku, aga kasutatakse ka epoksüvaiku ja alküüde. Tüüpiline kuumpressimis tsükkel viiakse läbi 5 kuni 20 MPa rõhu all ja 170 kuni 190°C temperatuuri juures kestvusega 1 kuni 10 minutit [5].

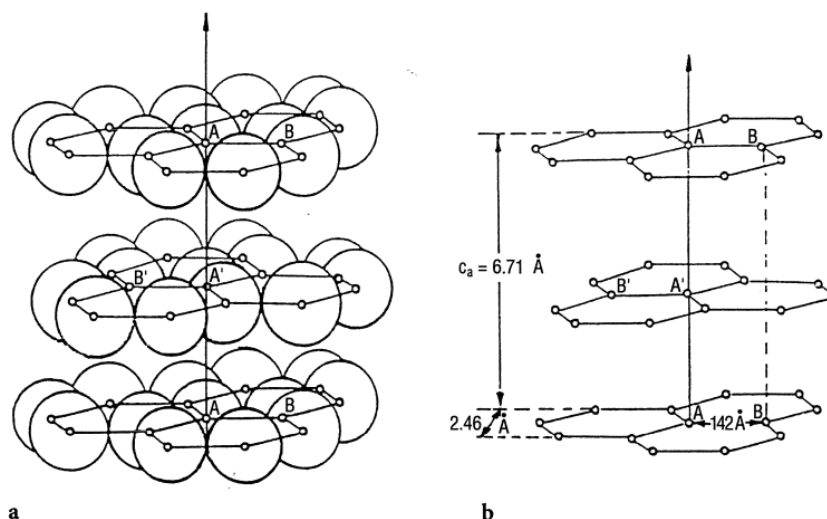
Kahel protsessil on erinevaid eeliseid ja puuduseid. CVI pakub keerukate geomeetriae võimaliku immutamist, nagu näiteks süsinikust švammid. Kuumpressimise teel saavutatakse aga kiiresti ja väheste vahenditega soovitud kuju ja struktuur, et liikuda edasi poorse struktuuri tootmise poole. Oluliseks tuleb pidada maatriksi ja armatuuri valikut, sest järgnevates protsessides mängivad geomeetrilised ja keemilised omadused suurt rolli.

3.1.1 Armatuurid

Süsinik on kerge element, omades grafiidina tihedust kõigest 2,268 g/cm³. Süsinik võib esineda erinevates kristalsetes vormides. Grafiidina on süsinik anisotroopne,

teoreetilise normaalelastsusmooduliga kristalse kihiga paralleelses suunas ligikaudu 1000 GPa, kuid kristalse kihiga risti suunas kõigest 35 GPa [5].

Grafiitkristall koosneb mitme lehelaadse süsinikaatomikihi ehk grafeenikihi virnadest, mis on üksteisest teatud kaugusel. Tasapinnal on süsinikaatomid seotud tugeva kovalentse sidemega, kuid kihid omavahel on seotud nõrga van de Waali sidemega. Kirjeldatud sidemed grafiidis on näidatud visuaalselt joonisel 7 [1].



Joonis 7. Anisotroopne grafiidi struktuur [1].

Tänu eelnimetatud kristalsele struktuurile ja sellega kaasnevatele omadustele, mille üheks suureks positiivseks omaduseks on suur elastsusmoodul kihiga paralleelses sihis, kaasneb sellega teoreetiliselt ligi sajaprotsendiline erinevus kahe telje vahelises elastsusmoodulis.

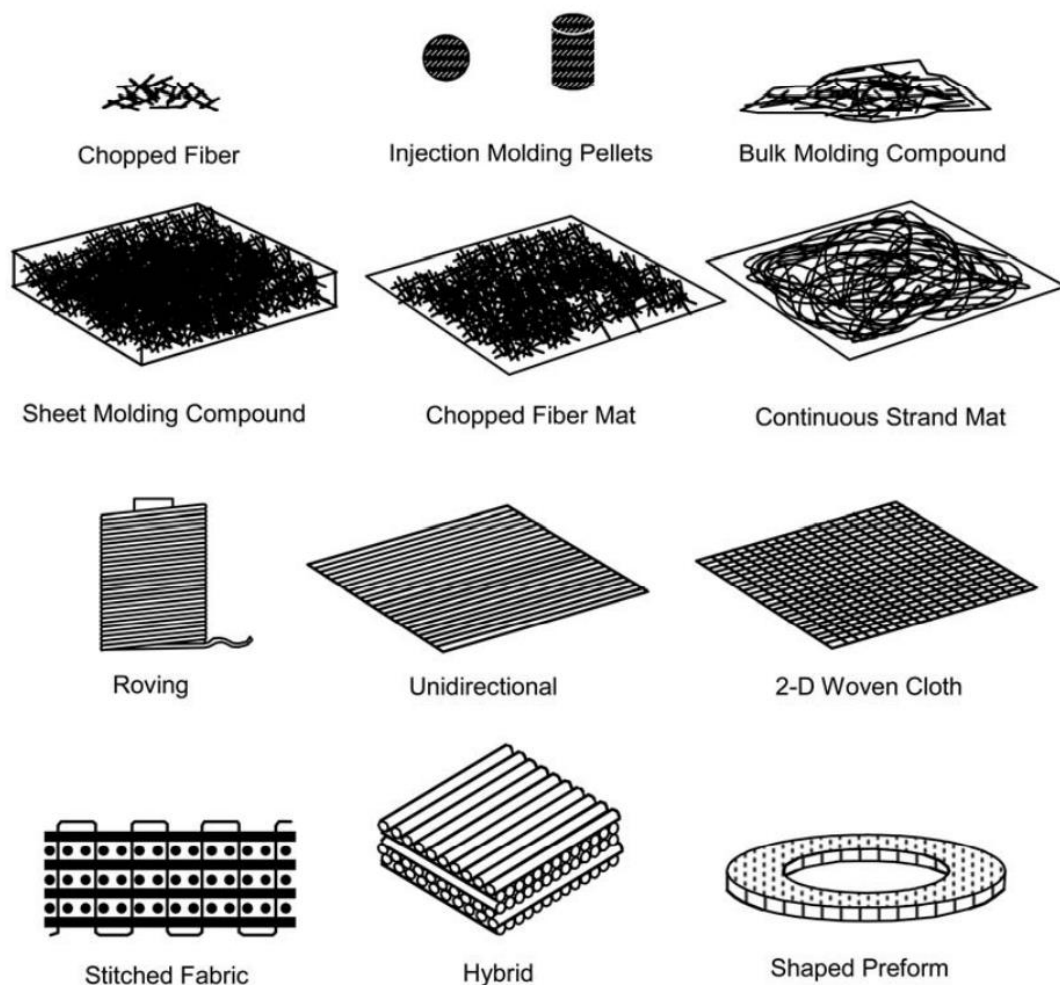
Süsinikkiudu saab valmistada viskoosist, polüakrüülnitriilist (PAN) või naftapigist. Polüakrüülnitriilist toodetud kiud on kallimad kui viskoos, aga saadav süsinikusaagis on peaaegu 50% suurem [5]. Viskoos oli esimene baasmaterjal millest toodeti süsinikkiudu, millest omakorda toodeti eelpool mainitud kosmose- ja lennundustööstuse komponendid. Suurim kitsaskoht, miks ei ole mõistlik viskoosi enam kasutada, tuleb esimese astme tootmisprotsessi kuumutamise temperatuurist, mis on võrreldes PAN baasmaterjaliga kordades suurem. Tabelis 5 on näidatud süsinikusaagis erinevate baasmaterjalide kasutamisel. Need kaks omadust annavad suure eelise PAN baasil süsinikkiu tootmisele [13].

Tabel 5. Süsinikusaagis erinevate baasmaterjalidega kangaste tootmisel [2].

Baasmaterjal	Süsinikusaagis
Viskoos	20-30
Polüakrüülnitriil (PAN)	45-50
Naftapigi	75-90

Keraamilise komposiidi tootmiseks tuleb kasutada kangaid, mis taluvad kõrgeid temperatuure ilma oluliste kahjustusteta. Seetõttu ei saa orgaanilisest polümeerist armatuuri kasutada toorikute tootmiseks, kuna need lagunevad 500°C juures, samuti ei saa kasutada tavapäraseid klaaskiude, mille sulamistemperatuur on 700°C [7].

Olenemata armatuuri baasmaterjalist, kasutatakse staapelkiudusid, pidevaid kiudusid, kootud kangaid, kahesuunalisi kangaid ja ruumilisi kangaid. Kõik kangad annavad oma punumisstiili kohaselt erinevad materjaliomadused erinevates telgedes. Seoses punumisstiiliga hakkavad toimuma ka kokkutõmbumised ja defektid järgnevates tootmisetappides. Eesmärk on neid minimaliseerida, jättes kõrvale materjali omadused. Kangaste põimimise tüübid on näidatud joonisel 8.



Joonis 8. Erinevad kangaste põimimise liigid. Ühesuunalised, kahesuunalised ja ruumilised näited [5].

Tulenevalt töö eesmärkidest vaatleme staapelkiude ja nende eripära. Staapelkiud, niinimetaud tükeldatud süsinikkiud on kõige odavam ja kõige enam kasutatud tugevdusena vormimissegudes. Staapelkiude võib kasutada kõigi vaigu tüüpidega kuid neid on enim kasutatud just termoreaktiivsete polümeridega vormimisel. Süsinik-süsinik tootmisel kasutatakse staapelkiudu, mis seejärel läbib kas keemilise auruga infiltreerimise või pürolüüsi just pidurisüsteemi detailide tootmisel. Joonisel 9 on näha tükeldatud süsinikkiudu [2].



Joonis 9. Tükeldatud süsinikkiud ehk staapelkiud [15].

Veel määrab matriksi valik keraamilise pidurisüsteemi materjali tootmise kolmanda etapi, mille käigus lisatakse räni ja tekib räni ning süsiniku keemiline ühend ränikarbiid (SiC). Üldiselt saab kasutada kõiki süsinikkiu tüüpe, kuid sellest sõltuvad lõplikud materjali omadused suurel määral [7].

Süsinik-süsinik komposiidi tootmisel mõjutab armatuuri valik struktuuri tugevusomadusi. Antud töö keskendub tootmismetoodikate väljatöötamisele tudengivormeli sõidukile kirjandusest leitava info põhjal. Tootmismeetodeid katsetades, saavutamaks parem ja efektiivsem tootmismeetod, tuleb tunda erinevate süsinikkiudude tootmismeetodeid ja baasmaterjale, kuna need võivad tootmisprotsessides tekitada defekte, mida ei ole kirjanduses kirjeldatud. Armatuuri punutud kanga asemel on mõistlik kasutada staapelkiude, sest nende mehaanilised omadused on peaaegu isotroopsed. Isotroopsed omadused aitavad vähendada telgedevahelist defektide erinevust.

3.1.2 Matriksid

Termoreaktiivse matriksi valimisel, süsinik-süsinik tooriku valmistamiseks, tuleb lähtuda mitmest omadusest [2]:

- viskoossus;
- termotöötamise omadused;
- süsiniku saagis;
- geomeetriselised muutused karboniseerimise käigus;
- matriksi mikrostruktuur.

Kõige olulisem maatriksi omadus, mida tuleb jälgida, on süsiniku saagis, mis määrab ära süsinik-süsinik komposiidi tootmise efektiivsuse. Süsiniku saagist määratakse kuumutades green body toorikut inertses keskkonnas kindla temperatuuriga ning võrreldes tooriku massi enne ja peale kuumutamist. Protsessi efektiivsuse määrabki ära süsiniku saagise mass võrreldes vaigu kogusega algses maatriksis [2].

Mida suurem süsiniku saagis, seda väiksem poorsus loodaval skeetil. Poorsuse eemaldamiseks toimub hilisemates protsessides kuumutamine ning pooride uuesti immutamine maatriksiga. Kõige enam kasutatavad maatriksid ja nende süsiniku saagiseid maatriksi lagunemisel on kuvatud tabelis 6 [1].

Tabel 6. Teoreetilised süsinikusaagised erinevatel maatriksitel [1].

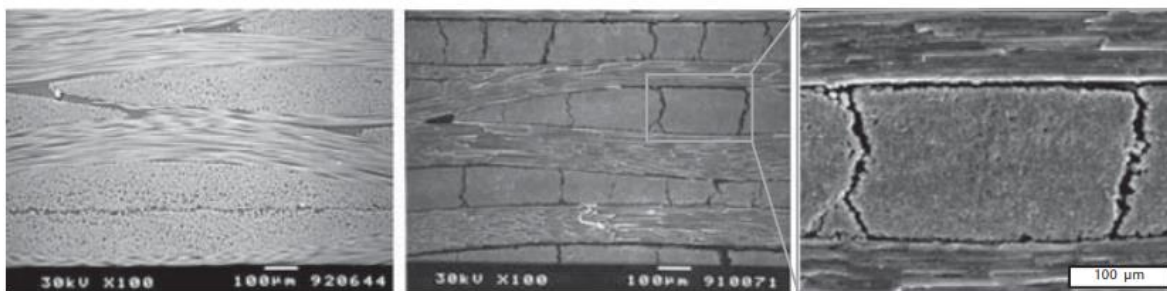
Baasmaterjal	Süsinikusaagis (%)
Polüatsetaalid	85
Polüfenüleen	85
Polüimiidid	60
Fenoolvaigud	55-65
Furaanvaigud	55-65
Polüakrüülnitriil	45
Tselluloos	20
Epoksüvaigud	5

Keraamikamaatrikskomposiitide tootmise algusaastatel olid esmalt saadaval fenoolvaigud. Vaik oli odav, tootmisprotsess lihtne ja süsiniku saagis piisav. Tänapäevased fenoolvaigud on saadaval juba süsiniku sisaldusega kuni 74% [7]. Nende kasutamine toob omakorda kaasa efektiivsema tootmise ja lühema tootmisaja.

3.2 Poorse tooriku tootmine

Green body toorik, mis on eelnevalt termoreaktiivse vaiguga immutatud ja kuumalt pressitud, viiakse süsinik keskkonda ja kuumutatakse. Kuumutamise käigus vaigust maatriks laguneb ja moodustub süsinik-süsinik side. Selle jaoks kasutatakse pürolüüs protsessi. Pürolüüsahjud sulgevad õhu ligipääsu kambrisse luues inertse keskkonna vaakumis. Sellises keskkonnas luuakse ideaalsed tingimused ainete lagundamiseks.

Pürolüüsi käigus, mis võib kesta rohkem kui 100 tundi, viiakse termoreaktiivne vaik süsinikolekusse. Protsessis loob vaik omavahel ühendatud poorsuse, mis lubab gaasidel hõlpsasti toorikust väljuda. Kirjeldatud hetk on kriitiline detaili lõppgeomeetria. Lenduvate gaaside välja pääsemiseks peab olema piisavalt aega. Kui gaasid ei pääse toorikust välja, tekitavad nad detaili sisse rõhu, mis toob kaasa märkimisväärse delaminatsiooni üsna õrnas toorikus. Joonisel 10 on näidatud soovitud poorsuse tulemusena pilti kasutades põimitud kangast [5].



Joonis 10. Ristlõiked põimitud kangaga toorikul enne ja pärast pürolüüsi. Enne pürolüüsi (vasakul), pärast pürolüüsi (keskel ja paremal) [7].

Impregneeritud tooriku polümeermaatriksi ruumala kokkutõmbumine pürolüüsis ei ole seoses tooriku väikse mahu muutusega. Näiteks võib esineda ruumala kahanemist telgede suhtes lausa 10% erinevusega, olenevalt kangaste suunast. Selle tulemusena tekivad pinged armatuuris, mis omakorda soodustavad pooride teket [7].

Näitena toodud poorse tooriku tootmisel on kasutatud karboniseerimiseks atmosfäärilist survet inertse gaasi all. Protsess, kus temperatuur tõuseb ligikaudu 800°C-ni, viiakse läbi temperatuuri kasvuga 10°C/tunnis. Aeglase temperatuuri tõstmisega hoitakse ära fenoolvaigus lenduvate ainete nagu H₂O ja CH₄ kiire eraldumine alates 400°C, mille tulemusena tekiks kihtide vahel delaminatsioon. Joonisel 11 on näidatud katsekehade võrdlusel delaminatsiooni teke gaaside kiire eraldumise tagajärjel. Joonisel 12 on näha keraamilisi detaile kosmosesüstiku ninas [13].



Joonis 11. Tooriku defekti näide enne ja pärast pürolüüsi. *Green body* (vasakul), Pürolüüsi käigus tekkinud tooriku paisumine (paremal).



Joonis 12. Kosmosesüstik keraamiliste detailide paigaldamisel [16].

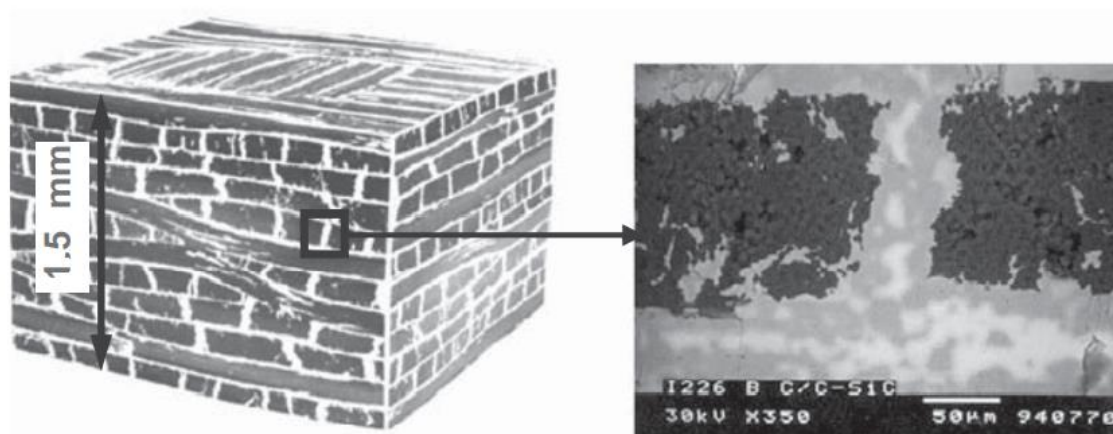
Kosmosesüstiku ninas paikneva detaili näitel kirjeldatud protsessis, kus toimub ilma sulametalli lisamiseta süsinik-süsinik detaili tootmine mitmekordse infiltreerimise näol

poorsuste vähendamiseks, on kasutatud eelpool kirjeldatud sarnaseid etappe. Esmalt valmistatakse esialgne toorik maatriksi ja armatuuri segamisel. Seejärel asetatakse detail pürolüüsahju, kus seda hoitakse inertses keskkonnas 70 tundi 815 °C juures, mille käigus karboniseerub fenoolvaik, luues avatud poorsuse. Protsessi korratakse mitmeid kordi, täites poorid igal korral maatriksiga uuesti. Iga uue protsessi kordamisega detaili poorsus väheneb, kuni on saavutatud soovitud tihendus ja materjali omadused. Kui soovitud detaili temperatuuritaluvus on üle 1980 °C lisatakse pinnakate [5].

3.3 Räniga immutamine

Loomaks keraamikamaatrikskomposiiti lisades räni, saavutatakse eelmises faasis tekkinud pooride täitmine räniga ning ränikarbiidi moodustumine. Tänu räni omadustele nagu madal viskoossus, kõrge pindpinevus ja hea märgumine saavutatakse pooride kiire räniga täitumine. Ráni on oma tiheduselt 2,33 g/cm³, sulamistemperatuuriga 1417 °C ja soojusjuhtivusega 149 W/m*K.

Keemiline auruga immutamine ja pürolüüsprotsessid võimaldavad suurt mehaanilist tugevust, kuid nende protsesside suur puudus on pikk aeg, mitmekordsed tsüklid ja vähese hulga ränikarbiidi teke. Nende puuduste vältimiseks on välja töötatud sulametalliga immutamine (*melt infiltration*, MI), mis põhineb sulametalliga pooride täitmisel armatuuriga tugevdatud toorikus, mille tõttu moodustub keraamiline maatriks kiiresti [7].



Joonis 13. Ruumiline mudel tüüpilisest ränikarbiid süsinik-süsinik mikrostruktuurist, kus ränikarbiid kihid on hallid ja süsinik-süsinik kihid tumedad [7].

Armatuuri kangad peavad olema pinnalt ränikarbiid kattega, et kaitsta neid vedela räni eest. Sularäniga immutamine viiakse läbi vähemalt 1400 °C juures. Sularäni sulgeb

poorid ning tekitab ränikarbiid ühendi. Kuna tulemuseks saadud maatriks võib sisaldada ligi 50% reageerimata räni, on lubatud töötemperatuur sellistel detailidel kuni 1200°C. Puhta räni sisaldust on võimalik vähendada, kuid mingi kogus puhast räni jääb alati alles [5].

Sellise protsessi eelised on järgnevad: saavutatakse tihe ränikarbiidi baasil põhinev maatriks, tootmisaeg on lühem kui enamikel keraamikamaatrikskomposiitide puhul. Sealjuures tihe suletud poorsus pinnakihtides võib kõrvaldada vajaduse pinnakatete järele [5]. Ühe kõige suurema eelisena saab esile tuua võimaluse toota suuri detaile võttes nad väiksemateks tükkideks. Selleks kasutatakse pressiste ja detailide omavahelist sidumist pürolüüsi teel [7].

Räniga immutamine on kriitilise tähtsusega protsess valmistamiseks keraamilisi pidurisüsteemi komponente. Kuninglik vormelisari on teinud järeldused, et räni lisamist ei ole vaja, kui saavutada temperatuurikontroll ventileerimisavadega. Räni lisamisega kaasnevad kilogrammid on sellise vedrustamata massi puhul tähtsal kohal. Puhta räni olemasolu peale pürolüüsi on detailidele ka koormaks, sest räni sulamistemperatuurist tingituna on oluline, et piduriketta temperatuur ei tõuseks üle 1200°C, olles süsinik-süsinik piduriketastel 2000°C koos sulamistemperatuuriga 3200°C.

4. TOOTMISMEETODITE KATESTAMINE

Töö üheks suurimaks eesmärgiks oli katsekehade tootmisega valideerida tootmismeetodeid. Katsetuste käigus vaadeldi ja katsetati kõiki kolme etappi saavutamaks süsinik-süsinik-ränikarbiid komposiit (C/C-SiC). Tootmisel kasutati kahte erinevat ahju, erinevaid pressimise surveid, katsetati erinevaid temperatuure ja poorse süsinik-süsinik tooriku räniga immutamist.

Eksperimentaalne töö on jagatud samuti kolme etappi nagu eelpool kirjeldatud teoreetilised protsessid:

- esialgse tooriku valmistamine (süsinikkiudude ja polümeervaigu kuumalt pressimine);
- poorse süsinik-süsinik tooriku valmistamine (pürolüüs);
- poorse tooriku immutamine räniga.

Kõigis eelnimetatud etappides on fikseeritud detaili massid, vaadeldud ja pildistatud ülesse visuaalsed ja geomeetriselised muudatused ning viidud läbi ka kõvaduse mõõtmine, röntgen ja kolmepunkti paindekatsetused.

4.1 *Green Body* katsekehad

Green body tootmist alustatakse ettevalmistusega, kus segatakse kokku maatriks ja armatuur. Armatuuriks kasutatakse PAN baasil valmistatud ühesuunalist tükeldatud kangast. Maatriksina kasutatakse pulbri kujul termoreaktiivset fenoolvaiku.

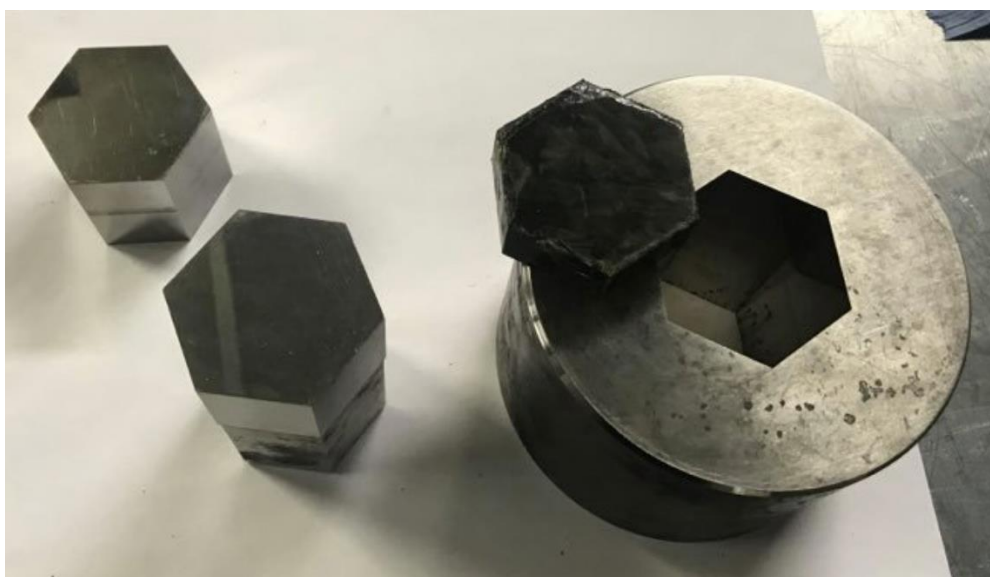
Termoreaktiivse vaigu näol on tegemist lihtsasti kättesaadava ja vähest tootmisvõimekust vajava baasmaterjaliga. Termoreaktiivset vaiku tuleb kuumutada ning siis jahutada koos armatuuriga, moodustades esialgse *green body* tooriku.

Materjalide valik on teostatud lähtudes nende kättesaadavusest. Haufler Composites ettevõtte toodetud 200 g/m² ühesuunaline süsinikkiud kangas on eelnevalt olnud kasutusel ka tudengivormeli kerede ja aerodünaamika tootmisel. Kõigepealt tükeldatakse süsinikkiud ning fikseeritakse mass, seejärel lisatakse massile võrdses koguses termoreaktiivset fenoolvaiku. Materjalide kogused nii massiprotsendilt kui mahuprotsendilt on jäetud kõrvale, sest kirjandusest tulenevalt muudavad kogused materjali mehaanilisi omadusi. Praegune eesmärk on saavutada katsetustega õiged tootmisetapi tulemused. Seejärel asetatakse tükeldatud süsinik ja termoreaktiiv vaik anumasse ja segatakse omavahel. Valmistatud segu on näha joonisel 14.



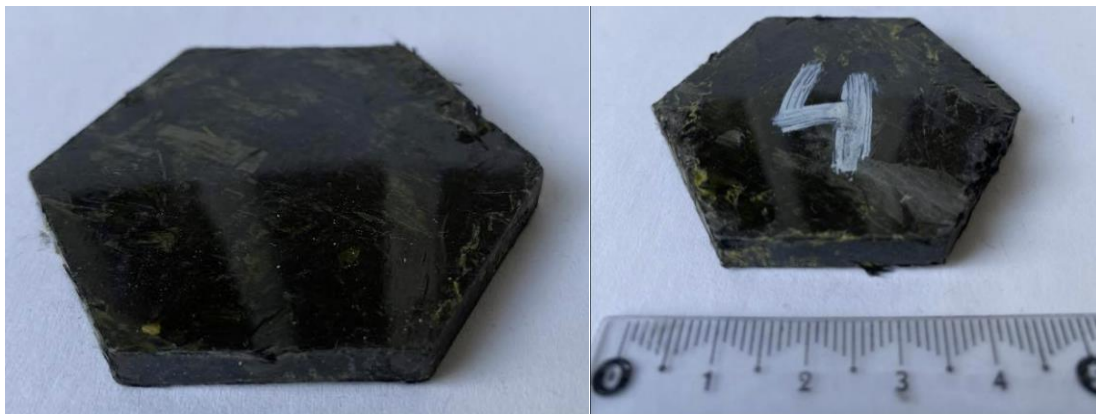
Joonis 14. Kokku segatud fenoolvaik ja tükeldatud süsinikkiud.

Kui materjal on segatud, tuleb segu asetada vormi ning hoida rõhu all, et vaik jahtudes kõveneks. Vormina on kasutatud kahe kuusnurkse templiga poleeritud tööriistaterasest pressvormi. Vormi kuju on juhuslik ning piisav esialgseteks katsetusteks. Vorm asetatakse fenoolvaigu sulamistemperatuuri saavutamiseks ahju, kus teda hoitakse enne segu lisamist 15 minutit. Seejärel lisatakse segu 200 °C saavutanud vormi ning surutakse pressiga kokku. Kuusnurkset templitega vormi on näha joonisel 15.



Joonis 15. Terasest templitega pressvorm koos esialgse toorikuga.

Pressimiseks on kasutatud hüdraulilist pressi ja vormi eelkuumutamiseks termotöötlusahju, mis on seadistatud temperatuurile 240°C. Pressimise tulemusel saavutati keskmiselt 6 mm paksused katsekehad. Katsekehad on näidatud joonisel 16.



Joonis 16. Kuumpress *green body* detailid peale pressimist.

Vormisegu on katsetustel massiprotsentide suhtega 50/50 (kiud/vaik). Esimese katsekeha massiline erinevus on suhtes maatriksi ja armatuuri kogusest, mis on 19V1 katsekehal võrreldes teistega suurem. Kasutatud parameetrid on näidatud tabelis 7.

Tabel 7. Kuumpressimise tulemused.

Detaili number	Maatriksi ja armatuuri massi suhe	Ahju temperatuur, °C	Pressi rõhk, MPa	Lõppdetaili mass, g
19V1	50/50	240	5	32.78
19V2	50/50	240	5	14.32
19V3	50/50	240	5	13.96

4.1.1 Armatuuri ja maatriksi valik

Tootmisprotsesside katsetamisel on teostatud armatuuri ja maatriksi valik. Lisaks materjali omadustele on üheks oluliseks kriteeriumiks ka maatriksi ja armatuuri maksumus.

Armatuurina on kasutatud tudengivormeli meeskonna laojääke. PAN baasil toodetud ühesuunaline süsinikkangas, mis on tootmise jaoks tükeldatud erineva pikkusega kiududeks. Süsinikkanga valik tulenes kanga kohesest kättesaadavusest ja töö jaoks vähese koguse vajalikkusest. PAN baasil süsinik kanga eelis on see, et ei toimu suuri

muutusi, mis võivad esineda kasutades klaaskiust ja madala temperatuuritaluvusega kangaid. Kasutatud kangas on näidatud joonisel 17.



Joonis 17. Kasutatud ühesuunaline süsinikkangas ja tükeldatud süsinikkiud.

Valides soovitud maatriksi just pidurisüsteemi komponentide tootmiseks on protsesside lihtsuse ja odavuse ning kättesaadavuse tõttu otsustatud termoreaktiivsete vaikude kasuks. Suheldes tootjatega osutus soovitude põhjal valituks just fenoolvaik. Fenoolvaigu kättesaadavus, võimalus kasutada tasuta näidised ja pikaajaline eelnev kasutamine kirjanduse põhjal olid olulisemad valikukriteeriumid. Kirjandusest leitud info põhjal on fenoolvaik levinud termoreaktiivne vaik pidurisüsteemide komponentide tootmisel. Kuigi tema süsinikusaagis ei ole kõige kõrgem, on tema keerukuse aste *green body* tootmisel väiksem, kui teistel ning vajalikud tootmisvahendid protsessi õnnestumiseks olid eelnevalt olemas.

Durez 30562 näol on tegemist kaheastmelise fenoolvaiguga. Kaheastmeline mõiste on tööstuses kasutatav ainete puhul, mis vajavad kõvenemiseks lisandit. Antud vaigul on heksametüleentetramiin sisse lisatud. Sama tootja teine Durez 33105 fenoolvaik vajab termoreaktiivseks vaiguks muutmiseks heksametüleentetramiini juurde lisamist, mistõttu otsustati valida Durez 30562. Fenoolvaigu andmed on kuvatud tabelis 8.

Tabel 8. Durez 30562 andmed.

	Väärtus	Ühik
Sulamise temperatuur	88	°C
Kövenemisaeg 165 °C juures	30	s
Hexametüleentetramiini kogus	9.5	%
Värvus	Värvitu või meravaigu värvusega	

4.2 Poorsed süsinik-süsinik katsekehad

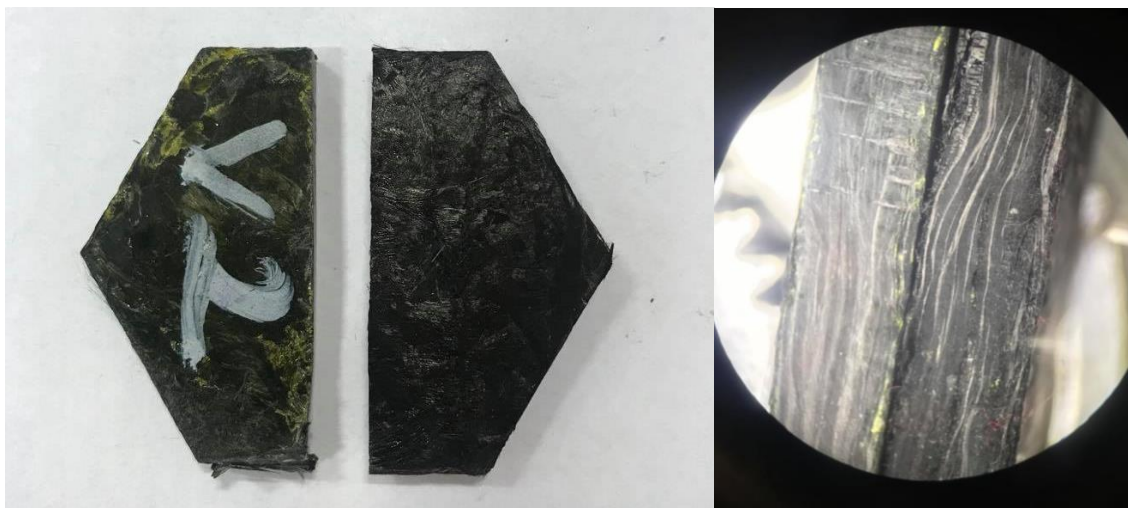
Saadud *green body* järgmine etapp loomaks süsinik-süsinik komposiidi struktuuri on poorse tooriku saamine. Selleks tuleb karboniseerida fenoolvaik, mille käigus eralduvad lenduvad elemendid ning alles jääb süsinik. Seejärel kontrollitakse süsinikusaagist ning fikseeritakse saadud tulemus.

Poorse tooriku saamiseks kasutatakse Tallinna Tehnikaülikooli Pulbermetallurgia Labori pürolüüsahjusid Red Devil (R.D. WEBB COMPANY INC.) ja FPW 300/400 (FCT System GmbH). Ahjudel on võimekus luua nii inertne gaasikeskkond kui ka vaakum. Poorse detaili jaoks on kasutatud inertse keskkonna asemel vaakumit, mille käigus eemalduvad lenduvad elemendid kiiresti.



Joonis 18. Green body detailid pürolüüsahjus enne protsessi.

Esmalt toodetud *green body* on lõigatud kaheks või enamaks tükiks, et oleks võimalik jälgida kõiki tootmise etappe ja toimunud muudatusi. Seejärel asetatakse detailid ahju, kus nad läbivad 120 tunni pikkuse pürolüüsitsükli. Tsükli käigus alates 400°C eralduvad lenduvad elemendid ning fenoolvaik saavutab karboniseerumise teel süsiniku oleku. Tulemuseks on poorne süsinik-süsinik komposiit, mis on näidatud joonisel 19.



Joonis 19. Katsekehad enne ja pärast pürolüüsi (enne – mõlemal pildil vasakul; pärast – mõlemal pildil paremal).

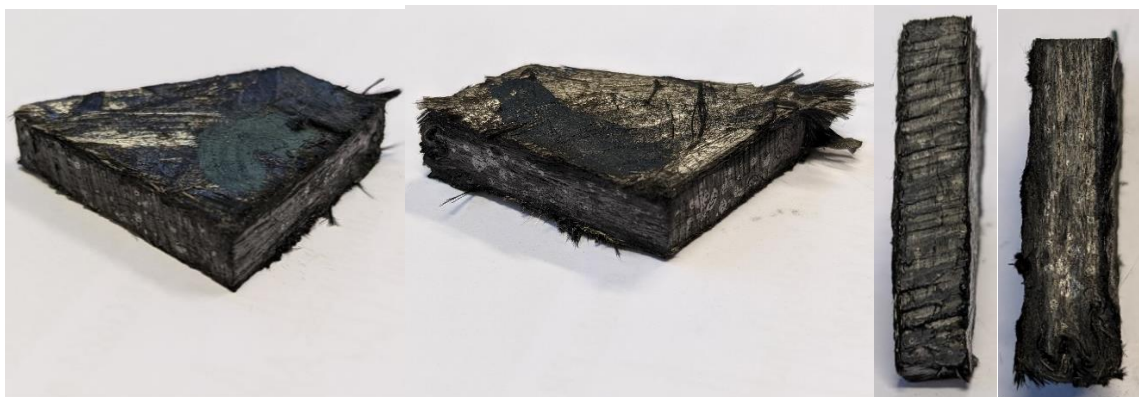
Kõigil katsetatud detailidel vähenes mass pürolüüsi käigus. Keskmine massikadu oli kahel detailil 16.5 % ehk 0.55 g. Sellisest tulemusest saab järeldada, et vaigu süsinikusaagis on käsitletud detailide puhul 67%, mis on palju kõrgem kui kirjanduses mainitud. Masside muutused on toodud tabelis 9, kus on kuvatud *green body* kaheks lõigatud komponendid.

Tabel 9. Detailide massimuutused pürolüüsi käigus.

	Mass enne pürolüüsi, g	Mass peale pürolüüsi, g	Massi kadu, %
19v3.1	3.25	2.73	16.10
19v3.2	3.40	2.82	17.06
19v2.1	4.53	3.72	17.74
19v2.2	4.05	3.32	18.12

Tabelis kuvatud katsekehad 19v2.1 ja 19v2.2 on läbinud pürolüüsitsükli ahju temperatuuri tõusu ja seejärel on detailid maha jahutatud. Katsetuste eesmärk oli võrrelda kahe ahju toimimist ja nende mõju katsekehadele parameetritega 0.5°C/tunnis temperatuurini 900°C. Katsekehade erinevus on minimaalne ja jääb

pinnakihtide juurde, kus on toimunud silmaga nähtav delaminatsioon väiksemas ahjus kuumutatud detailil. Delaminatsioon võib tuleneda väiksema ahju temperatuuri kõikumisest, mis võib kohati olla 20 °C. See tõestab väidet, et temperatuuri kasvu on oluline jälgida vältimaks delaminatsioone. Kahe Tallinna Tehnikaülikooli Pulbermetallurgia ahju erinevused on näidatud joonisel 20.



Joonis 20. Katsekehade temperatuuri kasvu katsetused. (Red Devil ahjus – mõlemal pildil vasakul; FPW 300/400 ahjus – mõlemal pildil paremal).

Teisalt tuli katsetustega välja, et ainult temperatuuri tõusul 0.5 °C/min kuni 900 °C 30 tunni jooksul toimuvad protsessid, mis muudavad detaili massi samas mahu, kui hoida detaile 90 tundi 900 °C juures. Tulemustest saab järeldada, et lenduvate elementide eraldumine ja karboniseerimine toimub esimese 30 tunni jooksul ahjus, kui temperatuur kasvab 0.5 °C/min 900 °C temperatuurini. Kui jätta kõrvale geomeetrilised muudatused, saab tulemustest järeldada ka tiheduse vähenemist keskmiselt 17.25%.

4.3 Sulametalliga immutamine

Poorne süsinik-süsinik detail on peale esimest pürolüüsitsükli küllaltki habras. Saavutamaks kõrgemat töötemperatuuri ning paremaid materjali omadusi, tuleb lisada räni või teostada süsiniku sisaldava materjaliga (*carbon preform*) immutamist ja eelpool nimetatud pürolüüsietappi korrata. Saavutamaks ränikarbiidi moodustumist ja parandada materjali omadusi, tuleb süsinik-süsinik toorikut immutada sularäniga.

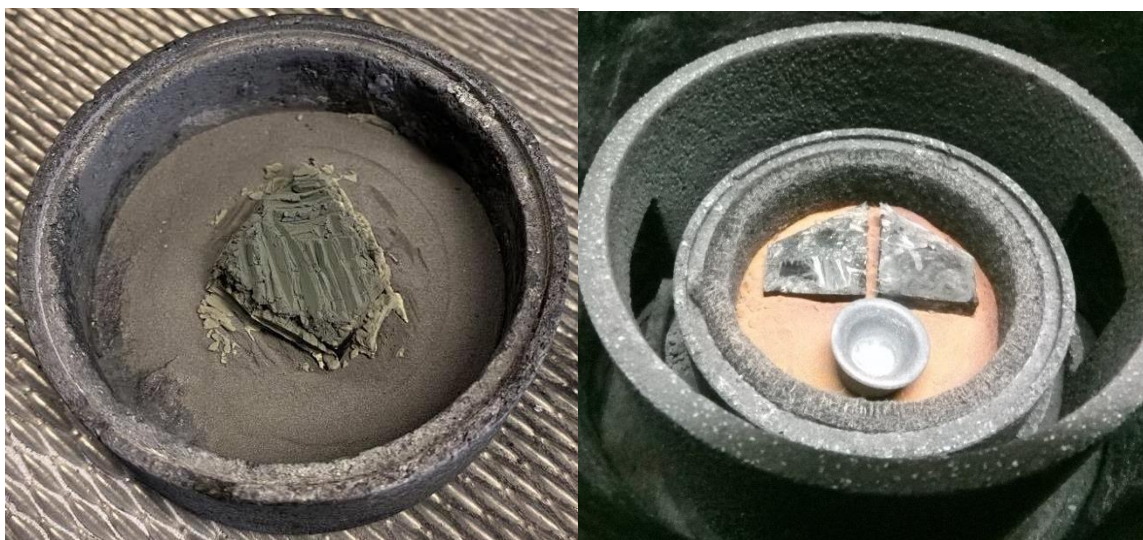
Katsetuste eesmärk on infiltreerida täielikult pürolüüsi käigus tekkinud poorid tekitamiseks ränikarbiidi keraamilist ühendit. Selleks tuleb asetada pooridega detailid ahju koos ränipulbriga. Vältimaks ränipulbri imbumist ahju süsinikust kesta, on asetatud detaili alla keemiliselt inertne tsirkooniumdioksiid (ZrO₂). Pürolüüsi käigus on katsetatud kahte tootmismeetodit: ühel juhul on asetatud räni eraldi detaili kõrvale

keraamilisse topsi, teisel juhul on räni detailiga kokkupuutes, mis peaks looma võimaluse kapillaarsustega sularänil detaili imbuda. Katsekehad koos inertse pulbri ja räniga ahjus on näidatud joonisel 21.



Joonis 21. Detailid enne pürolüüsitsükli ahjus. Vasakul detail ja räni kontaktis. Paremäl räni eraldi keraamilises anumamas.

Ahju temperatuur on seadistatud 1450°C peale, et ahi saavutaks natukene kõrgema temperatuuri kui räni sulamistemperatuur, mis on $\sim 1415^{\circ}\text{C}$. Vaakumi tase ahjus kuumutusprotsessi käigus on vahemikus 10 kuni 50 paskalit. Mõlema joonisel 21 näidatud katsekehade töötlemisel on kasutatud eelpool mainitud parameetreid. Saadud tulemused kahel katsetusel on kuvatud joonisel 22 ning on küllaltki erinevad. Mõlema detaili puhul on räni muutnud oma kuju, sulades ühel juhul keraamilise topsi põhja ja teisel juhul muutudes pulbrist kokku paagutunud massiks, mis väikesel surveel uuesti pulbriks muutub.



Joonis 22. Detailid peale 12-tunnist tsükli ahjus.

5. KATSEKEHADE ANALÜÜS

Tähtis etapp hindamaks tootmisetappide õnnestumist ja sarnaste meetodite kasutamist tulevikus tudengivormeli võistlusauto näitel pidurisüsteemides, tuleb teada saada, kuidas on materjali omadused muutunud erinevates etappides. Samuti on hea teada, millised materjali ühendid ja sidemed on tekkinud nii pürolüüsi käigus, fenoolvaigu lagunemisel kui ka räni lisamisel.

Oluline on kõiki etappe eraldi vaadelda ning neid võrrelda. Samuti on oluline olemasolevate loodud materjalidega võrrelda toodetud katsekeha, kas mootorisporidi pidurisüsteemiga või lennunduses kasutatud toodetega, et teada, millises vahemikus ollakse ja kuhu peab jõudma. Selleks kasutatakse Magnetic MRO lennumasina keraamilist piduriketast.

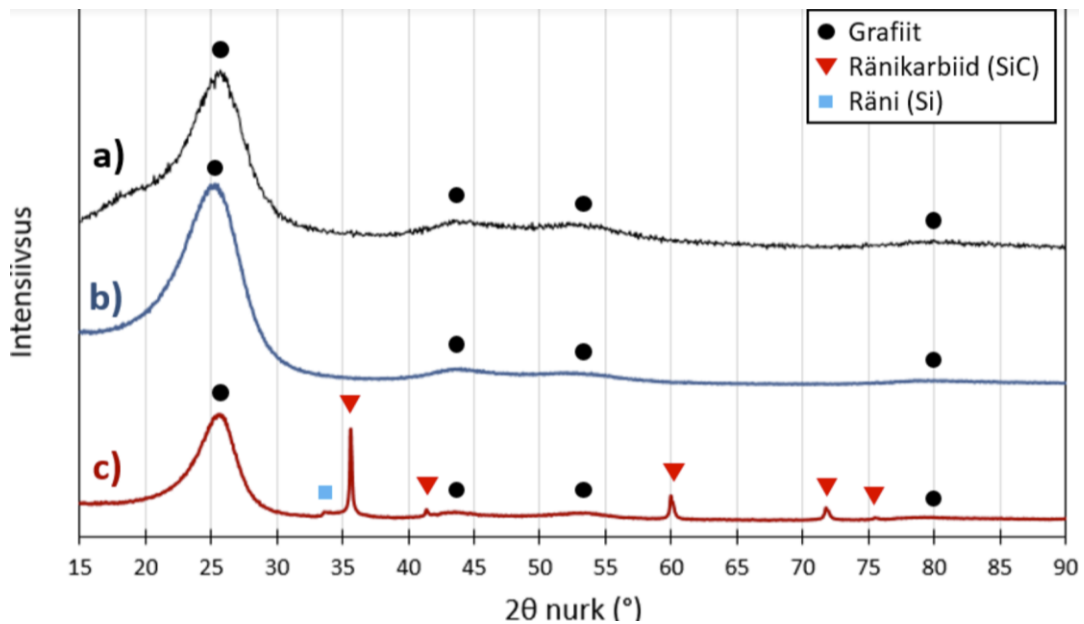
5.1 Röntgen difraktsioon

Katsekehade testimiseks ja uurimiseks on teostatud kõigi kolme tootmisetapi detailidele kõvadusmõõtmine, röntgen difraktsioonanalüüs (XRD) ning kolme punkti painde katsetused. Difraktsiooni käigus mõõdetakse materjali pinnakihtidelt kristallvõre struktuuri ning seda võrreldes kindla olemasoleva infoga saadakse võrdluse käigus teada materjali faasiline koostis. Tulemuste väljaselgitamiseks on kasutatud Tallinna Tehnikaülikooli röntgen difraktsiooni seadet Rigaku Smartlab, mis on näidatud joonisel 23.



Joonis 23. Rigaku Smartlab röntgendifraktsiooni seade [17].

Röntgen difraktsioon testimise läbisid nii *green body* toorik, ühe pürolüüsi läbinud toorik ja räniga pürolüüsi läbinud toorik. Green body tooriku ja pürolüüsi läbinud poorse tooriku XRD analüüs näitas võrdlemisi amorfse süsiniku (lai signaali piik ~26 kraadi juures) esinemist katsekehades. Räniga immutatud katsekehal avaldus kristalse (kitsad signaali piigid) ränikarbiidi olemas olek, mis kinnitab, et vähemalt pinnakihis on immutamine andnud soovitud tulemuse. Detailide XRD analüüsi tulemused on näidatud joonisel 24.



Joonis 24. Röntgendifraktsioon analüüsi tulemused (katsekehade faasiline koostis): a) *green body* b) poorne detail c) räniga immutatud detail.

Tulemustest saab järeldada küll ränikarbiidi teket, kuid arvutuslikud massiprotsendid röntgen difraktsioontesti tulemustest, mida arvutati kasutades ettevõtte Bruker programmi DiffraxPlus EVA, ei ole usaldusväärsed. Põhjus andmetes kahelda tuleneb grafiidist, mis on suuresti amorfne, samuti puudub kristallilise oleku korrastatus. Samas kinnitab XRD tulemus ka puhta räni olemasolu detailis immutamise järgselt. Massiprotsendi tulemused on kuvatud tabelis 10.

Tabel 10. Arvutuslikud massiprotsendid.

Ühend	Protsent kogumassist, %
Grafiit	91.7
Ränikarbiid	7.8
Räni	0.5

Samuti uuriti räni sulamisel tekkinud protsessi ning teostati räni pulbrile, mis katsetuse käigus ära ei sulanud röntgen difraktsioon analüüs. Selgus, et ahjus olnud ränipulber ei ole reageerinud õhus lendlevate elementidega tõestades, et ahju vaakumi kindlus on hea.

5.2 Kolme punkti painde katsetused

Nägemaks tootmisetappides toimunud muutusi on kõigi kolme etapi detailidele teostatud kolme punkti painde katsetus. Kolme punkti painde katsetuse eesmärk on näha detailide tootmisprotsessidel toimuvaid mehaanilisi muutusi. Katsetus viiakse läbi universaalses Tallinna Tehnikaülikooli katselabori seadmes Instron, kuhu on lisatud kolme punkti paindeks vajalik rakistus.

Kogudes kolme punkti painde katsetustelt andmeid on võimalik saadud infoga kõigi tootmisetappide katsekehade elastsusmoodulid ja paindetugevused välja arvutada. Kolme punkti painde katsete käigus kogutud andmed materjali kohta:

- katsekehade mõõdud;
- maksimaalne pikenemine maksimaalse jõu korral;
- maksimaalne jõud maksimaalse pikenemise korral;
- katserakise mõõdud.

Elastsusmoodul arvutub valemist

$$E = \frac{L^3 F}{4wh^3 d} \quad (5.1)$$

, kus

E – Elastsusmoodul, MPa,

L – Tugede distantis katserakisel, mm,

F – Paindekoormus maksimaalsel deformatsioonil, N,

w – Laius, mm,

h – Paksus, mm,

d – deformatsioon, mm.

Paindetugevus arvutub valemiga:

$$\sigma = \frac{3FL}{2bd^2} \quad (5.2)$$

, kus

σ – paindetugevus, MPa,

F – maksimaalne koormus murdumispunktis, N,

L – Tugede distants katserakisel, mm,

b – laius, mm,

d – paksus, mm.

Katsetuste teostamiseks lõigati kõigist kolme etapi detailidest kaks katsekeha. Katsetusteks on kasutatud pulbermetallurgia labori kolme punkti katserakist, mida kasutatakse väikeste risttahuka kujulistel katsekehadel kolme punkti painde katsetamiseks. Katserakis koos ühe katsekehaga rakises on näidatud joonisel 25.



Joonis 25. Kolme punkti katserakis kasutamiseks kolme punkti painde katsetusteks Instron katseseadmes.

Katsekehad on lõigatud rauasaega eelnevatest detailidest peaaegu võrdse geometriaga. Kõik katsekehade gabariitmõõtmised on mõõdetud ning edastatud tõmbepingi programmi, kus katsepink teostab nende järgi arvutusi. Katsekehade katsepingis katsetatud tulemused on kuvatud tabelis 11.

Tabel 11. Kolme punkti painde katsekehade tulemused.

19V	V3.4_1	V3.4_2	V3.2_1	V3.2_2	V3.1_1	V3.1_2
Jõud maksimaalse pikenemise juures	1779.2 3	1203.73	326.06	351.47	308.26	234.41
Pikenemine maksimaalse jõu juures	-0.65	-0.37	-0.42	-0.39	-0.21	-0.32
Paksus, mm	6.67	6.32	6.63	7.00	6.45	5.88
Laius, mm	5.10	5.01	6.16	5.15	5.47	5.31
Tugede kaugus, mm	14	14	14	14	14	14

Katsekehade tulemustest saab arvutada välja erinevate tootmisetappide elastsusmoodulid. Selleks tuleb mõõdetud andmed asendada valemisse (5.1) ning arvutada välja elastsusmoodulid. Paindetugevuste arvutamisel tuleb mõõdetud väärtused asendada valemisse (5.2). Saadud tulemused on kuvatud tabelis 12.

Tabel 12. Arvutuslikud elastsusmoodulid mõõdetud tulemustest.

	V3.4_1	V3.4_2	V3.2_1	V3.2_2	V3.1_1	V3.1_2
Elastsusmoodul, MPa	1965	2492	985	600	1281	753
Paindetugevus, MPa	164	126	25	29	28	26

Saadud tulemustest saame järeldada, et green body toorikus fenoolvaigu massisisaldusega 50% saavutame elastsusmooduli, mis ühtib fenoolvaigu elastsusmooduliga. See tähendab, et süsinikkangas ei taga struktuurset tugevust. Teisalt, vaadates pürolüüsi etapis toimunud muudatusi, on näha kui hapraks muutub kogu detail ning omadused langevad lausa poole võrra. Vaadates paindetugevuse väärtuseid on samuti näha suurt kukkumist pürolüüsitsükli järel.

Peale pürolüüsitsükli on vähenenud materjali paindetugevus 80% ulatuses. Kosmosesüstiku detailidel on esialgse pürolüüsitsükli järel jõudnud materjal faasi, kus ta on habras ja poorne ning omab paindetugevust 3000 psi kuni 3500 psi (20 kuni 25 MPa) [5]. Selle parandamiseks teostatakse kirjandusest tulenevalt veel mitmeid immutustsükleid või sulametalliga immutamist.

Antud juhul ei ole kolme punkti painde katsetustest näha suurt erinevust pürolüüsitud ja räniga immutatud detaili vahel. Andmed küll kõiguvad, kuid on suurusjärgus samad nii elastsusmoodulilt kui paindetugevuselt. Seega võib eeldada, et XRD tulemustes nähtud ränikarbiid on moodustunud ainult pinnakihis.

5.3 Kõvaduse mõõtmised

Kõvaduseks nimetatakse materjali võimet vastu panna kohalikule plastsele deformatsioonile, kui sinna üritab tungida kõvaduselt suurem keha. Kõvaduse mõõtmiseks on mitmeid meetodeid olenevalt materjalide tüübist ja eeldatavast kõvadusest.

Töös käsitletud *green body* pinnakihi näol on tegemist küllaltki pehme materjaliga, mis liigitub polümeeride sekka. Pressitud tooriku kõvaduse määrab ära fenoolvaigu kõvadus. Kõigi etappide kõvadust on mõõdetud Shore duromeetriga (D skaala). Shore duromeetrit on näidatud joonisel 26.



Joonis 26. Shore D duromeeter (vasakul) ja selle indenter (paremal).

Mõõtmiste käigus on fikseeritud vähemalt kolme mõõtmisega kõigi tootmisetappide kõvadused ning samuti on mõõdetud lennuki piduriketta (Magnetic MRO) kõvadust, et võrrelda katsekehade andmeid tegeliku lõpptootega. Shore duromeetriga mõõtmiseks tuleb suruda nõel materjali sisse seni kuni punane seier enam ei kasva ning seejärel fikseerida kõvadus. Mõõdetud kõvadused on kuvatud tabelis 13.

Tabel 13. Mõõdetud kolme mõõtmise keskmised pinnakõvadused.

	19v3.4	19v3.2	19v3.1	Magnetic MRO
Shore, D	88	68	74	75

Kõvaduse tulemused näitavad sarnast trendi, mis on näha ka kolme punkti painde tulemustest - koos paindetugevuse ja elastsusmooduliga, on pürolüüsi järgselt langenud ka katsekehade pinnakõvadus. Ráni immutatud katsekeha kõvadus mõne ühiku võrra kasvanud, mis võib tuleneda sellest, et pinnakihtides on tekkinud kõva ränikarbiidi ühend. Võrreldes tulemusi lennuki süsinik-süsinik pidurikettaga on tulemuseks näha, et mitmekordsel infiltreerimisel kasvab pinnakõvadus veelgi poorsuste täitumise tulemusena. Kuna teadmata on lennuki piduriketta materjalid ja tootmismetoodika, ei saa tulemusi otseselt ka võrrelda, kuid lennuki piduriketas annab indikatsiooni, kuhu tuleks jõuda.

Saavutamaks ränikarbiid ühendit tuleks proovida räniga immutamisel viia pürolüüsi ahju temperatuur kõrgemaks, sest ráni ei ole läinud 1450 °C juures sulama. Selle tulemusena ei ole ka ráni jõudnud tervet detaili infiltreerida. Räniga infiltreerimise efektiivsemaks muutmiseks tuleks katsetada veel erinevaid protsessi kestusi ja samuti räniga kogu detaili katmist.

KOKKUVÕTE

Käesolev töö keskendus keraamiliste süsinik-süsinik komposiitmaterjalide tootmistehnoloogia uurimisele ja katsetamisele loomaks alusteadmisi edaspidiseks materjali kasutamiseks laiemalt, kui seda seni on Eestis tehtud. Kuidas ja millises järjestuses toimuvad tootmisetapid, milliseid muutusi erinevad etapid endaga kaasa toovad, mis on valdkonnad, kus praegu keraamikkomposiite kasutatakse ja mis on, tudengivormeli näitel, veel võimalik võistlusauto puhul saavutada on teemad, millega töös kokku puututi.

Töö põhiosa esimeses peatükis uuriti keraamiliste materjalide kasutusvaldkondi süsinik-süsinik ja immutatud süsinik-süsinik näidetele. Leiti, et enim on kasutatud materjali kohtades, kus tööprotsessides toimuvad suured energia neeldumised ja temperatuurimuutused. Lennundus ja autotööstus on kaks suuremat valdkonda, kus üle poole toodetud materjalist läheb just pidurisüsteemi komponentide tootmiseks. Samuti toodi välja tudengivormeli näitel pidurisüsteemi osad indikatsiooniks loodavale tootmisprotsessile.

Teises peatükis uuriti, kuidas toodetakse kirjanduse järgi süsinik-süsinik ja sulametalliga immutatud süsinikmaterjale. Pürolüüsi tsükli ja immutamine vaiguga on märksõnad, kuidas jõutakse soovitud tulemuseni. Kirjandusest leiti tootmiseks kolmeetapiline protsess, mis algab kuumpressimisest, kus luuakse *green body* ja lõpeb sulametalliga immutamisega. Kirjandusest leitud info ja erinevate autorite katsetused on kokku pandud tervikuks, mis aitab luua teoreetilist alusinformatsiooni tootmisetappide õnnestumiseks. Armatuuri ja maatriksi eripärasid on kirjeldatud samuti teises põhiosa etapis, et osata valida kasutatavaid materjale.

Pürolüüsahjus poorse tooriku tootmine on kõigist etappidest enim aega ja ressursi nõudev. Peaaegu sada tundi kestva pürolüüsi tsükli käigus laguneb fenoolvaik, eralduvad lenduvad elemendid ja tekib avatud pooridega süsinik-süsinik komposiit, mis on väga habras ja poorne. Parandamaks mehaanilisi omadusi, tuleb poorset süsinik-süsinik komposiiti, kas korduvalt immutada vaiguga ja korrata pürolüüsi või immutada sulametalliga. Valik nende kahe meetodi vahel sõltub lõpptoote kasutusvaldkonnast. Räniga immutamise tulemusena tekib materjalis ränikarbiidne maatriks, mis annab materjalile vastupidavuse, oksüdatsiooni kindluse ja tugevuse. Samas materjali maksimaalne töötemperatuur langeb 1200 °C juurde, sest antud protsessi tulemusena on materjal ka metalne räni, millel on võrreldes puhta süsinik-süsinik komposiidiga palju madalam töötemperatuur.

Kolmandas põhiosa peatükis teostatakse kogutud andmete põhjal katsetused, et valideerida teoreetilisi teadmisi ning jõuda töö lõpuks praktilise kogemuseni loomaks pidurisüsteemis kasutamiseks sobivat keraamilist materjali. Peatükk on üles ehitatud baseerudes kolmele tootmisetapile, kus esmalt katsetatakse *green body* tooriku tootmist ning kirjeldatakse, miks kasutatakse armatuurina just PAN baasil toodetud süsinikkangast ja maatriksina fenoolvaiku. *Green body* tootmine on etappidest kõige lihtsam ning väiksema ressursi vajadusega. Kahesajakraadise temperatuurini kuumutamine ning kuumalt maatriksi ja armatuuri pressimine tõid juba esmastel katsetustel oodatavad tulemused. Seejärel teostati katsetused poorse detaili saavutamiseks, mis oli edukas. Kolmas katsetus räniga immutamisel ei andnud soovitud tulemusi kuna ränikarbiid õnnestus saavutada ainult katsekeha pinnakihis.

Viimases põhiosa peatükis katsetati kõikide etappide katsekehi kolme meetodiga: röntgendifraktsiooni abil määrati materjali faasiline koostis ja teostati paindetugevuse ja kõvaduse katsetused. Röntgen difraktsiooniga saadi teada viimases etapis räniga immutamisel tekkinud ühendite kogused. Ränikarbiid on tekkinud detailil ainult pinnakihtides ja detaili mass ei olnud suurenenud, mistõttu saab järeldada, et detailis ei ole täieliku infiltreerumist toimunud (sula räni ei jõudnud süsinik-süsinik komposiidi sisemiste kihtideni), mida kinnitavad ka kõvaduse ja kolme punkti painde katsetused. Kolme punkti painde katsed näitasid, et teise tootmisetapi puhul (poorse süsinik-süsinik komposiidi valmistamine pürolüüsi teel) on saavutatud kirjanduses kirjeldatud omadused – paindetugevus 20 kuni 25 MPa.

Tudengivormeli võistlusautodel, kus varasematel aastatel on kasutatud terasest või titaanist pidurisüsteemi komponente, on võimalik võita keraamilist pidurisüsteemi kasutuselevõttust massis, vormeli stabiilsemas pidurdamises ja väiksemas kulumises. Jõudmaks kasutuskõlblike pidurisüsteemi komponentideni, tuleb loodud platvormi ära kasutades ning uusi teadmisi kogudes leida viis tootmaks mitmekordsete immutamistega paremate omadustega süsinik-süsinik komposiitmaterjal. Teiseks tuleks leida räniga immutamisel tekkinud puudustele lahendus, mis aitaks luua monoliitset süsinik-süsinik-ränikarbiid keraamikamaatrikskomposiiti. Tänu keraamilise pidurisüsteemi temperatuuri taluvusele ei peaks tudengivormeli meeskond tulevikus nii palju enam keskenduma pidurisüsteemi jahutusele. See omakorda looks võimalusi katsetada teisi aerodünaamika lahendusi.

Autori arvates on magistritöö käigus püstitatud eesmärgid saavutatud. Kõigis etappides on teostatud andmete kogumine, mis loob tulevikus võimaluse materjali ja tootmistehnoloogia edasiarendusteks.

SUMMARY

The present work focuses on testing the production technology of ceramic carbon-carbon materials to create a base knowledge for the future ceramic materials developments. How in what order and what changes different production steps bring, what are the areas where ceramic carbon-carbon composites are currently used and how to use them based on Formula Student Team Tallinn concept are the main points that the work will discuss.

In the first chapter of the main part, carbon-carbon and impregnated carbon-carbon examples have been studied. It was found that the material is mostly used in places where high energy absorption and temperature increase occur. The aerospace and automotive industry are the major areas where over half of the produced material is used. Using the example of Formula Student, race car parameters and recently used brake system has been analysed and the short comings were pointed out.

The third chapter focuses on how carbon-carbon and infiltrated carbon-carbon have been produced based on existing research. Pyrolysis cycles and impregnation with resin are the steps to achieve the desired result. In literature three-stage production has been the used method, starting with hot pressing to create a green body structure and ending with melt infiltration process. The information found in the literature about experiments and theoretical information have been collected and compiled into a whole that helps to achieve success in the production stages. The characteristics of the reinforcement and matrix are described in the chapter.

In the fourth chapter, tests are carried out to validate the knowledge stated in the previous chapter and to gain practical experience in creating the materials used in ceramic braking systems. The chapter is similarly structured into three stages. Firstly, green body structure manufacturing is tested. Furthermore, it is described why PAN based fibres and phenolic resin have been used to manufacture the first stage green body. The manufacturing of the green body is the easiest process of the three stages and require less resources. The stage consists of heating the mould to two hundred degrees and pressing hot mould with resin and fibre inside, using a hydraulic press.

The second stage in the production of a porous blank in a pyrolysis furnace is the most time-consuming and resource-intensive of all stages. During the cycle of the furnace, which lasts for a hundred hours, the phenolic resin volatile elements are released from it and a carbon-carbon composite with open porosity is formed. In order to achieve a

material with better mechanical properties, the pores must either be infiltrated with carbon precursor or filled with molten metal. Impregnation with silicon gives the material durability, hardness, oxidation resistance and strength after a single impregnation, but the free silicon in the structure brings the work temperature of the material from 2000 °C to 1200 °C. Multiple impregnation cycles with carbon precursor are used if material requires working temperatures up to 2000 °C, as for in aerospace or Formula 1 series.

In the final chapter, three tests for the three-step process were performed: hardness test, three-point flexural test and x-ray diffraction tests. X-ray diffraction was used to find out if the silicon carbide has been formed. Results show that silicon carbide has formed but only in the surface layers. Hardness, three-point bending test and the weight of the part also confirmed that. In addition, three-point flexural tests showed that in the pyrolysis cycles, same flexural strength were achieved as showed in literature. Such information shows that the pyrolysis cycle has been successful.

For the previous Formula Student FS Team Tallinn cars, the brake system components have been made of steel and titanium alloy. Changing system, team can benefit from less mass, a more stable braking range and eliminate brake wear problems. Using composite materials in the braking system can also gain an advantage over other teams in design judging competition. In order to reach a material that is usable and has good material properties, a further development must be made. Using the advantage of the information and tests carried out in this thesis, multiple impregnation and silicon carbide materials can be developed. Due to the high working temperature of the ceramic braking components, the future members of the team will not be faced with the task to develop a cooling method for the braking system, which gives the advantage to develop the difficult aero and suspension kinematics.

According to the author, the desired results have been achieved with the thesis. Data collected in all stages will make a good platform for future developments. Production technology gives the young engineers of FS Team Tallinn the knowledge in a specific field.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] E. Fitzer ja L. Manocha, Carbon Reinforcements and Carbon/Carbon Composites, Springer, Berlin, Heidelberg, 1998.
- [2] G. savage, „Carbon-Carbon Composites,“ Chapman & Hall, 1993.
- [3] „25th Annual Conference on Composite, Advanced Ceramics, Materials, and Structures :A,“ %1 The American Ceramic Society , Cocoa Beach, Florida, 2001.
- [4] J. Herzog, „PHOTOGRAPHY BY JULIAN HERZOG,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://julianherzog.com/>. [Kasutatud 23 04 2021].
- [5] F.C.Campbell, „Structural Composite Materials,“ ASM International, 2010.
- [6] „Porsche,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.porsche.ee/hinnakiri>. [Kasutatud 23 04 2021].
- [7] w. krenkel, Ceramic matrix composites.
- [8] B. S.p.A, „Brembo F1 Infographics,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.brembo.com/en/car/formula-1/f1-infographics>. [Kasutatud 26 04 2021].
- [9] „2021 FORMULA 1 TECHNICAL REGULATION,“ Fédération Internationale de l'Automobile, 2021.
- [10] D. L. Milliken ja W. F. Milliken, Race Car Vehicle Dynamics, SAE International, 1994.
- [11] R. Puksov, Artist, FEST20 piduriketas. [Art]. 2020.
- [12] D. Arensbürger, Komposiitmaterjalid, Tallinn: TTÜ kirjastus, 2005.
- [13] J. D. Buckley ja D. D. Edie, „Carbon-Carbon Materials and Composites,“ Noyes Publications.
- [14] A. Lazzeri, „CVI processing of ceramic matrix composites,“ ResearchGate, 2012.
- [15] H. corporation, „HexTow Chopped Carbon Fiber,“ Hexcel corporation, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.hexcel.com/Products/Carbon-Fiber/HexTow-Chopped-Carbon-Fiber#:~:text=Chopped%20carbon%20fiber%20is%20used,high%20strength%20and%20stiffness%20characteristics..> [Kasutatud 05 08 2021].
- [16] „NASA Mission Pages,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.nasa.gov/mission_pages/shuttle/flyout/opf_home.html. [Kasutatud 15 05 2021].
- [17] „Rigaku,“ Rigaku Corporation and its Global Subsidiaries, . [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.rigaku.com/de/products/xrd/smartlab?index=2>.



Technical Data Sheet

Durez® 30562 phenolic resin

Description:

Durez® 30562 is a phenolic resin of the two-step type having a low free phenol content. It is used as a general purpose binder.

Typical properties:

Test method	Properties	Durez® 30562
DCT 1	Appearance	colourless to amber coloured powder
DCT 11C	Melting point clear, °C	88
DCT 162	Cure at 165°C, s	30
DCT 351	Inclined Plate Flow, 0,5 g, 125°C, mm	65
DCT 31B	Hexamine content, %	9,5
DCT 7-200	Screen test 200 mesh,%	3,5

* DCT test methods are available upon request

Lisa 2. Tõmbekatssetuste tulemused graafikuna

Date of test:

18 May 2021

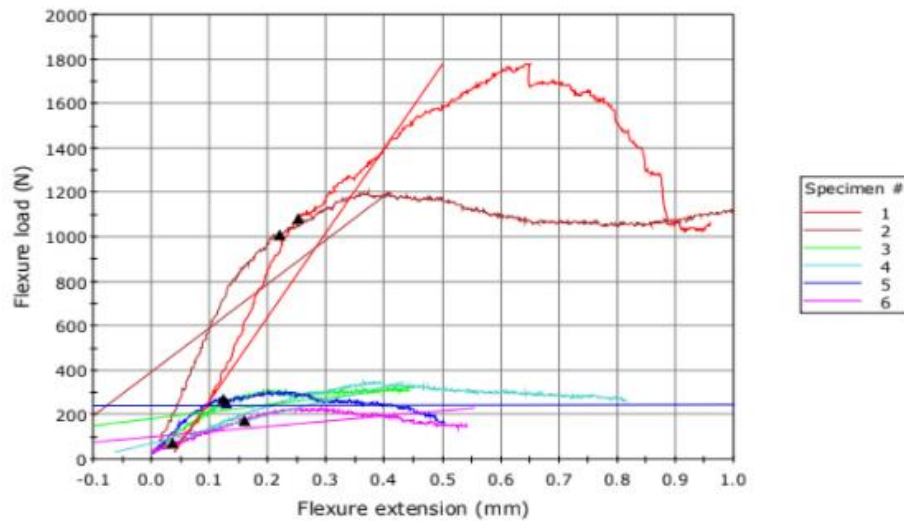
Method description

3-point bend test, span 50 mm.

Defaults Table

Rate 1	1.00000 mm/min
Sample description	Glass ampuls
Test method	3-point bend test 10 kN load cell
Test machine	Instron 8802
Load cell	100 kN
Operator	E. Esinurm

Specimen 1 to 6



	Specimen label	Load at Maximum Flexure load (N)	Extension at Maximum Flexure load (mm)
1	V3.4 1	-1779.23	-0.65
2	V3.4 2	-1203.73	-0.37
3	V3.2 1	-326.06	-0.42
4	V3.2 2	-351.47	-0.39
5	V3.1 1	-308.26	-0.21
6	V3.1 2	-234.41	-0.32

	Flexure load at Yield (Slope Threshold 0.5 %) (N)	Rate 1 (mm/min)	Support span (mm)	Thickness (mm)	Width (mm)
1	1084.6	1.0	14	6.67	5.10
2	1011.3	1.0	14	6.32	5.01
3	257.8	1.0	14	6.63	6.16
4	77.3	1.0	14	7.00	5.15
5	274.1	1.0	14	6.45	5.47
6	177.9	1.0	14	5.88	5.31

	Specimen note 1
1	
2	
3	
4	
5	
6	

GRAAFILINE OSA