

Aalto-yliopisto

Teknillinen korkeakoulu

Insinöörیتieteiden ja arkkitehtuurin tiedekunta

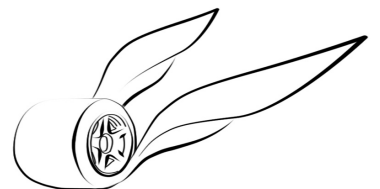
Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Hiilikuitukomposiitit autotekniikassa

Kandidaatintyö

12.4.2010

Juhani Antero Hämäläinen



AALTO-YLIOPISTO TEKNILLINEN KORKEAKOULU PL 11000, 00076 AALTO http://www.aalto.fi		KANDIDAATINTYÖN TIIVISTELMÄ	
Tekijä: Juhani Antero Hämäläinen			
Työn nimi: Hiilikuitukomposiitit autotekniikassa			
Tutkinto-ohjelma: Konetekniikka			
Pääaine: Teknillinen mekaniikka		Pääaineen koodi: K3006	
Vastuopettaja(t): prof. Gary Marquis			
Ohjaaja(t): prof. Gary Marquis			
<p>Työssä tutkitaan hiilikuitukomposiittien autotekniikan sovelluksia ja esitellään alan nykytilaa sekä tulevaisuuden näkymiä. Työ käsittelee myös hiilikuidun ja hiilikuitukomposiittien valmistustekniikkaa, mekaanisia ominaisuuksia sekä kierrätystä.</p> <p>Selvityksestä käy ilmi, että nykyisten hiilikuitukomposiittien valmistustekninen tieto on tarkoin komposiittien valmistajien hallussa ja oppikirja-aineiston tiedot ovat osittain vanhentuneita. Hiilikuitukomposiittien käyttö autoissa on kasvussa, sillä materiaalin hinta alenee ja tietotaito leviää kaupallisella sektorilla. Tällä hetkellä hiilikuitu on kalliiden urheiluautojen rakenneaine, mutta lähitulevaisuudessa hiilikuitua tullaan hyödyntämään myös kevyissä ja taloudellisissa kaupunkiautoissa.</p> <p>Hiilikuitukomposiittien kierrättäminen on haasteellista verrattuna esimerkiksi metalleihin. Hiilikuidun taloudellisen ja tehokkaan kierrättämisen edistämishankkeita on käynnissä. Hankkeet etsivät kannattavia ja kaupallistettavia hiilikuidun kierrätysmentelmiä.</p>			
Päivämäärä: 12.4.2010		Kieli: suomi	Sivumäärä: 22
Avainsanat: hiilikuitu, komposiitit, autotekniikka			

Sisällysluettelo

Johdanto.....	5
1 Hiilikuitu.....	6
1.1 Hiilikuitu ja sen ominaisuuksia.....	6
1.2 Hiilikuidun lähtöaineet.....	6
1.2.1 Lähtöaineena PAN.....	7
1.2.2 Lähtöaineena kivihiiliterva.....	8
1.2.3 Lähtöaineena viskoosi.....	8
1.2.4 Lähtöaineena orgaaninen kaasu.....	9
1.3 Hiilikuitujen luokittelu.....	9
2 Hiilikuitukomposiitit.....	11
2.1 Komposiittien valmistus.....	12
2.1.1 Laminaatit.....	12
2.1.2 Injektointi.....	12
2.1.3 Pultruusio.....	12
2.1.4 Puolivalmisteet.....	12
2.2 Hiili-Hiilimatriisikomposiitit.....	13
2.2.1 Valmistus.....	13
2.3 Hiili-metallimatriisikomposiiti.....	15
2.4 Hiili-keraamimatriisikomposiitit.....	16
3 Hiilikuitukomposiittien sovellukset autotekniikassa.....	17
3.1 Runkorakenteet.....	17
3.2 Jarrut.....	18
3.3 Kytkin.....	19
3.4 Vetoakselit.....	20
3.5 Tukivarret.....	20
3.6 Törmäyssuojat.....	20
3.7 Koripaneelit, sisustan osat ja muut komponentit.....	21
3.8 Moottorin osat.....	22
3.9 Vanteet.....	22
3.10 Alan yrityksiä.....	22

3.10.1 SGL Goup (Saksa)	22
4 Kierrätettävyys	24
4.2 Hiilikuitukomposiittimateriaalien kierrätysmenetelmät	25
4.2.1 Mekaaninen kierrätys	25
4.2.2 Leijupetireaktio	25
4.2.3 Pyrolyysi	25
4.2.4 Kemiallinen liuotus	26
4.2.5 Uudelleenkäyttö polttoaineena.....	26
Yhteenveto	27
Lähdeluettelo.....	28

Johdanto

Hiilikuidun valmistuksen katsotaan alkaneeksi 1960-luvulla avaruus ja sotateollisuuden tarpeisiin. Tällä hetkellä hiilikuitukomposiitit ovat yleistymässä kaikilla koneenrakennuksen aloilla, sillä komposiittien tuntemus ja sovelluskohteista saadut kokemukset ovat osoittaneet hiilikuitukomposiittien ylivoimaisuuden kevyissä ja kuormitetuissa rakenteissa. Hiilikuidun kehityksen alkuvuosina, komposiittien pääaisalliset käyttökohteet olivat sotilas- ja avaruusteollisuuden tuotteissa. Ajan mittaan hiilikuitujen valmistusmenetelmät ovat kehittyneet ja lopputuotteen hinta on saatu houkuttelevammaksi tuotantokapasiteetin kasvaessa. Nykyään hiilikuitua käytetäänkin laajalla sovelluksissa urheiluvälineistä henkilöautoihin. Hiilikuitukomposiitit ovat oikea materiaali keveysiin, lujiin ja jäykkiin rakenteisiin, joiden ominaisuuksia voidaan parantaa huomattavasti oikealla komposiittivalinnalla. Lujuusominaisuuksiensa lisäksi hiilikuidun käyttöä puoltavat kehittyneiden komposiittien ominaisuudet, jotka ovat monessa sovelluksessa ylivoimaisia perinteisiin rakenneaineisiin. Näistä esimerkiksi lämpöenergiaa absorboivat jarrut. (1 ss. 1-7)

Auton massan pienentäminen on urheilullisuuden lisäksi noussut merkittävään asemaan kiihtyneen ilmastonmuutoskeskustelun myötä. Hiilikuitua aiotaan soveltaa myös pienissä, kevyissä ja taloudellisissa kaupunkiautoissa. Hiilikuitukomposiittien suosion kääntöpuolena on rajusti noussut hiilikuidun tarve, joka on tällä hetkellä noin 27 000 tonnia vuodessa. Hiilikuidun valmistus on energiaintensiivistä ja se tuottaa paljon hiilidioksidia. Lisäksi hiilikuitujätettä ei pystytä vielä tehokkaasti kierrättämään uusiksi lujiksi kevytrakenteiksi, mutta kierrätykseen liittyviä merkittäviä kehitysprojekteja on meneillään. (2 ss. 22-27)

Tämä kirjallisuusselvitys selvittää missä ja miten hiilikuitua on käytetty autonrakennuksessa.

1 Hiilikuitu

Jäykkä, luja ja kevyt hiilikuitu on monimuotoinen aine, jonka ominaisuuksiin vaikuttaa moni muuttuja kuidun lähtöaineesta käyttömuotoon. Yhtäältä hiilikuitu on vertaansa vailla käyttölämpötila-alueen laajuudessa, toisaalta hauras materiaali ja suuntautuneet lujuusominaisuudet asettavat suuria haasteita rakenteiden suunnittelulle. Seuraavissa kappaleissa tutustutaan hiilikuidun määrittelyyn ja valmistuksen kautta eri hiilikuitulaatuihin.

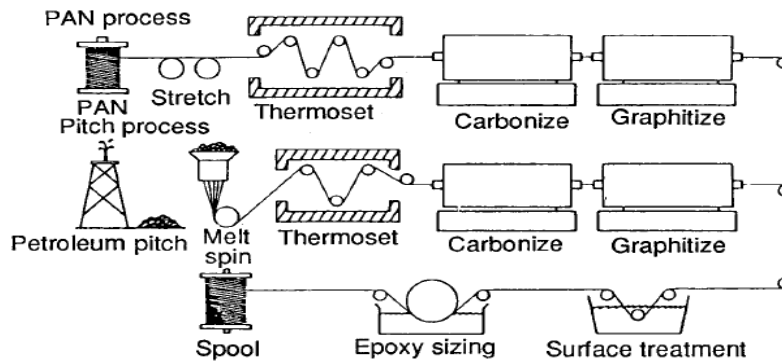
1.1 Hiilikuitu ja sen ominaisuuksia

Hiilikuidun hiilipitoisuus on yli 92 p- %. Kuidut valmistetaan kontrolloidussa prosessissa valituista lähtöaineista. Kuidut voivat olla jatkuvia tai lyhyitä ja niiden halkaisija on 5 – 10 mikrometriä, valmistusmenetelmän mukaan. Hiilikuidun rakenne muistuttaa grafiittia, jossa hiiliatomit ovat sitoutuneet toisiinsa vahvojen kovalenttisten sidoksien ja järjestäytyneet heksagonaalisiksi kerroksiksi. Kerrokset liittyvät toisiinsa hiili-hiili sidoksilla. Hiilikuiduilla on suuntautuneet mekaaniset ominaisuudet, mikä tarkoittaa sitä että kuidun suuntainen kimmomoduuli on korkea suhteessa poikittaiseen kimmomoduuliin. Tämä johtuu hiilikerrosten orientaatiosta pääasiallisesti kuidun suuntaan. Mitä tarkempi järjestäytyneisyys hiilikerroksilla on sitä paremmat mekaaniset ominaisuudet saavutetaan kuidun suunnassa. (3 ss. 3-11)

Korkeasta kimmomoduulista huolimatta kuitujen vetomurtolujuus saa suurimman arvonsa tietyssä kuidun lämpökäsittelyvaiheessa ja sen arvo jää kauas teoreettisesta maksimista. Esimerkiksi ns. polyakrylinitriilikuitupohjaisille (PAN) kuiduille vetomurtolujuus on vain 10 % hiilikuidun kimmomoduulista. (4 s. 81) Hiilikuidun värähtelynvaimennusominaisuudet ovat hyvät, se kestää hyvin väsyttävää kuormitusta ja pitää mittansa laajalla lämpötila-alueella. Materiaalin sähkönjohtavuus ja hyvä lämmönjohtokyky tekee hiilikuidusta sopivan materiaalin monien elektroniikkateollisuuden kohteisiin. (3 ss. 3-11)

1.2 Hiilikuidun lähtöaineet

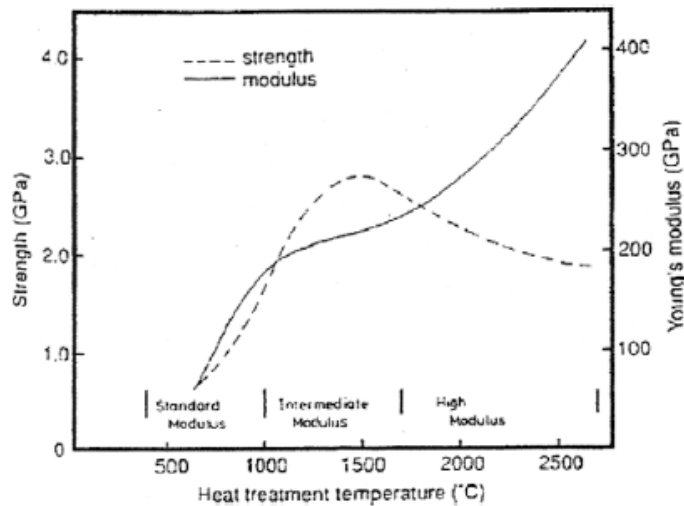
Hiilikuitua valmistetaan piki-, tai polymeeripohjaisista lähtöaineista tai hiilipitoisesta kaasusta. Kaupallisesti merkittävin ja levinnein lähtöaine on PAN. PAN kuiduista valmistetun hiilikuidun kimmomoduuli on tavallisesti alhaisempi kuin pikipohjaisen hiilikuidun, mutta sen vetomurtolujuus on suurempi. Pikipohjaisilla hiilikuiduilla on muita kuituja suurempi kimmomoduuli ja parempi lämmönjohtokyky mutta sen vetomurtolujuus on alhaisempi ja kuidut ovat hauraita luonteeltaan. Menetelmän saanto on korkea, noin 85 %, kun PAN-pohjaisilla kuiduilla vain noin puolet PAN-kuidun massasta. Kaasumaisista lähtöaineista valmistetut hiilikuidut ovat kehitystyön kohteena. (3 ss. 23-33)



Kuva 1, Hiilikuidun valmistusmenetelmät (10 s. 5)

1.2.1 Lähtöaineena PAN

Menetelmässä valmistetaan hiilikuitua viisivaiheisella jatkuvalla prosessilla. Prosessin vaiheet ovat hapetus, hiillytys, grafitointi, hiilikuidun pintakäsittely ja käsittely viimeistelyaineella. Kuvan 1 ylin rivi havainnollistaa valmistusprosessia. Hapetuksessa PAN-kuitu johdetaan esijännitettynä 300 – 400 °C lämpötilaan. Kuidut muuttuvat väriltään mustiksi ja niiden hiilipitoisuus on noin 50 %. Hiillytyksessä kuidut johdetaan hapettomaan tilaan, jossa on inertti eli reagoimaton kaasu ja 1500 °C lämpötila. Kuidut pidetään jännitettynä ja kuidun tiheys, lujuus ja kimmomoduuli kasvavat. Hiillytyksen jälkeen kuidun hiilipitoisuus on noin 93–95 %. Grafitoinnissa hiilikuitua kuumennetaan edelleen lämpötila-alueella 1500–3000 °C ja kuidun kimmomoduuli nousee. (3 ss. 23-33) Jos lämpökäsittelyä jatketaan, kuidun lujuus laskee, mutta kimmomoduuli nousee ja kuidusta tulee hauraampi. (5 ss. 102-106) Grafitoinnilla voidaan säätää lopputuotteen mekaanisia ominaisuuksia, mutta grafitointia ei aina suoriteta, sillä hiillytettykin kuitu on jo moneen käyttötarkoitukseen tarpeeksi lujaa. Kuva 2 havainnollistaa lämpökäsittelyn vaikutusta kuidun ominaisuuksiin. Valmis hiilikuitu pintakäsitellään hapettamalla. Käsittely parantaa kuidun tarttuvuutta komposiittien matriisiaineisiin. Viidennessä vaiheessa kuitu pinnoitetaan aineella, jonka ominaisuudet määräävät kuidun tartunnan matriisiaineeseen. (4 ss. 81-83)



Kuva 2 Hiilikuidun kimmomoduuli ja lujuus lämpökäsittelylämpötilan funktiona (5 s. 102)

1.2.2 Lähtöaineena kivihiiliterva

Kivihiiliterva eli piki on hiilen, raakaöljyn ja asfaltin tislauksen sivutuote. Raaka-aineesta valmistetaan kahta eri hiilikuitua: isotooppinen ja mesofaasi hiilikuitu. Kuitujen ero on lähtöaineen kiderakenteessa. (3 ss. 14-23) Edulliset hiilikuidut tehdään isotrooppisesta kivihiilitervasta, jolla on alhainen pehmenemispiste. Raaka-aine sulakehrätään filamenteiksi, kovetetaan n. 300 °C ja hiillytetään n. 950 °C lämpötilassa. Grafitointi suoritetaan lämpötila-alueella 1200 – 3000 °C. Kuitujen vetomurtolujuus on luokkaa 870 – 970 MPa ja kimmomoduuli 40 – 55 GPa. Arvot ovat alhaisempia kuin muilla hiilikuiduilla. Kuitujen soveltuvat eristeiksi ja täytteiksi muissa komposiiteissa. Mesofaasikivihiilitervasta tehdyt hiilikuidut ovat jäykimpiä kaikista hiilikuiduista. Näiden kuitujen kimmomoduuli voi nousta lähelle 1000 GPa, mutta niiden vetomurtolujuus on kuitenkin noin puolet alhaisempi kuin PAN-pohjaisilla kuiduilla. Kuitujen valmistusprosessi on hyvin samanlainen kuin PAN-hiilikuiduilla, mutta kuituja ei tarvitse jännittää prosessissa. (6 ss. 183-187)

1.2.3 Lähtöaineena viskoosi

Viskoosikuidut ovat vanhimpia hiilikuituja. Ne kehitettiin 1960 – luvulla rakettien ja ohjusten komponenteiksi. Viskoosista on vaikea tehdä jäykkiä kuituja ja menetelmä on menettänyt merkitystään tähän päivään mennessä. (6 ss. 183-187)

1.2.4 Lähtöaineena orgaaninen kaasu

Menetelmässä päällystetään rautaisia katalyyttihiukkasia hiilellä hiilivetykaasupitoisessa ympäristössä korkeassa lämpötilassa, noin 1000 – 1150 °C:ssa. Hiilikuidut kasvavat rautahiukkasten päälle ja ovat onttoja. Lopputuotteen mekaaniset ominaisuudet vaihtelevat, sillä menetelmässä syntyy paljon eripituisia (enimmillään 50mm) kuituja. Kuitujen halkaisijat vaihtelevat 0,5 – 2µm välillä. Kuidut sopivat lujitteiksi komposiitteihin ja hiili-hiilikuitujen valmistuksen lisäaineeksi. (6 ss. 183-187) Nanokokoinen hiilikuitu on käytössä myös kertamuovimatriisiaineiden lisäaineena parantamassa lujuusominaisuuksia. (7)

1.3 Hiilikuitujen luokittelu

Kimmomoduulin mukaan luokittelu on yleinen tapa erotella hiilikuitulaatuja toisistaan. Tämän luokittelutavan mukaan kuitulaatuja on neljä. Taulukossa 1 on esitelty kimmomoduuliperusteinen luokittelutapa. Taulukossa 2 esitellään eräiden hiilikuitulaatujen ominaisuuksia. Eniten käytetty hiilikuituryhmä on standard modulus - kuidut (SM), jotka lämpökäsitellään 1000 – 1400 °C lämpötilassa. Tämän ryhmän kaupallisia kuituja ovat mm. Torayn valmistama T300-kuitu ja Hexcel'in AS4. (5 ss. 102-104)

Intermediate modulus (IM) kuidut lämpökäsitellään 1400 – 1800 °C lämpötilassa. Kuituluokka on verrattain uusi ja kuituja käytetään mm. avaruusteknologiassa. IM kuidut ovat kalliimpia kuin SM kuidut. Kaupallisia kuituja ovat Toray T800 ja Hexcel IM 7. (5 ss. 102-104)

High ja Ultra-high modulus (HM ja UHM) kuidut lämpökäsitellään yli 1800 °C lämpötilassa. Kuituja käytetään korkeasti kuormitetuissa ja jäykkyyttä vaativissa rakenteissa kuten satelliiteissa ja kalliissa urheiluvälineissä. Kuidut ovat todella kalliita ja hauraita. Kaupallisia kuituja ovat Toray M46J, M55, M60 ja Hexcel UHMS. (5 ss. 102-104)

Uudet ns. Ultra-high strength kuidut sijoittuvat kimmomoduulin mukaan IM kuituihin, mutta niiden vetomurtolujuudet ovat paljon korkeammat. Nämä PAN-kuidut käsitellään ennen hiililytystä hiilikuiduiksi, jotta pintaviat lähtöainekuidussa saataisiin minimoitua. Kaupallisia kuituja ovat Toray T1000 ja Hexcel IM9. (5 ss. 102-104)

Taulukko 1 Hiilikuitujen luokittelu kimmomoduulin mukaan (5 s. 103)

Standard modulus	E: 250GPa asti
Intermediate modulus	E: 250–350 GPa
High modulus	E: 350–500GPa
Ultra high modulus	E: >500GPa

Taulukko 2 Hiilikuitujen ominaisuuksia (5 s. 103)

Fibre	Type	Fibre diameter (μm)	Approximate HTT ($^{\circ}\text{C}$)	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)	Failure strain (%)	Density (g cm^{-3})
T300	Standard modulus	7	1000–1300	3530	230	1.5	1.79
T800	Intermediate modulus	5	1500	5490	294	1.9	1.81
T1000	Intermediate modulus	4.5	1500	6370	294	2.1	1.80
M46J	High modulus	4.4	2350	4210	436	1.0	1.84
M55J	Ultra-high modulus	4.4	2500	3780	540	0.7	1.93
M60	Ultra-high modulus	4.4	2600	3920	588	0.7	1.94

2 Hiilikuitukomposiitit

Komposiitit ovat materiaaliyhdistelmiä, joissa eri rakenneaineet toimivat yhdessä, mutta eivät ole liuenneet toisiinsa. Tavallisesti komposiitissa kuormaa kantavaa osaa nimitetään lujitteeksi ja komposiittia yhdessä pitävää ainesosaa nimetään matriisiksi. (3 s. 81) Lisäksi komposiitissa voi olla muita lisäaineita mm. parantamaan komposiitin pinnanlaatua, täyteaineina tai väriaineina. (4 s. 17) Komposiitteja on monenlaisia ja erot komposiittien ominaisuuksissa riippuvat suurelta osin matriisiaineesta ja kuitujen laadusta. Matriisiaineita ovat kerta- ja kestopuovut, erilaiset metallit, keraamit ja hiili. (5 s. 95) Hiilikuitukomposiittien tyypillisiä ominaisuuksia ovat alhainen paino ja lämpölaajenemiskerroin, korkea lujuus ja jäykkyys, hyvä korroosion kesto ja värähtelynvaimennus ominaisuudet. (8)

Taulukko 3 Rakenneaineden vertailu (5 s. 96)

Materiaali	Tiheys (g/cm^3)	Murtolujuus σ (MPa)	Kimmomoduuli E (GPa)	σ/ρ	E/ρ	\sqrt{E}/ρ	$\sqrt[3]{E}/\rho$
teräs	7,8	1300	200	167	26	5,1	3
alumiini	2,81	350	73	124	26	5,1	3
titaani	4	900	108	204	25	5	2,9
magnesium	1,8	270	45	150	25	5	2,9
E lasi	2,10	1100	75	524	21,5	4,6	2,8
Aramid	1,32	1400	45	1060	57	7,5	3,8
IM hiilikomposiitti	1,51	2500	151	1656	100	10	4,6
HM hiilikomposiitti	1,54	1550	212	1006	138	11,7	5,1

Taulukossa 3 on esitetty eri materiaalien lujuusarvoja. Taulukon perusteella voidaan helpommin ymmärtää komposiittien valintaa tietynlaisiin rakenteisiin. Komposiitit eivät ole ihmeaineita vaan niillä on muista materiaaleista poikkeavia ominaisuuksia, joista tärkein on alhainen tiheys suhteessa jäykkyyteen. Tarkasteltaessa komposiittimateriaalien huomattavan suurien kimmomoduulien on pidettävä mielessä materiaalin anisotrooppisuus ja lujuusominaisuuksien suuntautuneisuus. Suunnattujen lujuusominaisuuksiensa takia hiilikuitukomposiittien suunnitteluun ja laskentaan tarvitaan jopa 20 suuretta, jotka kuvaavat komposiitin mekaanisia ominaisuuksia. Esimerkiksi komposiitin kimmomoduulille ilmoitetaan kaksi arvoa, kukin yhteen tarkastelukoordinaatiston suuntaan. Näistä syistä komposiittirakenteiden suunnittelussa on välttämätöntä tuntea materiaalin käyttäytyminen. (5 s. 97) Kevytrakenteiden suunnittelun lähtökohtana ovat usein tietty kuormitus tilanne ja odotettu pettämistapa, esimerkiksi nurjahdus. Kriittisen nurjahduskuorman laskentakaavassa materiaaliparametri \sqrt{E}/ρ määrää keveimmän mutta kestävimmän materiaalin, pilarit tulee mitoittaa E/ρ -parametrin mukaan ja vastaavasti taivutuskuormitetut levyt $\sqrt[3]{E}/\rho$ -parametrin mukaan. Oikealla materiaalivalinnalla voidaan savuttaa 30 - 50 % painonsäästö. (5 s. 97)

2.1 Komposiittien valmistus

2.1.1 Laminaatit

Muovikomposiittilaminaatti on useammasta lujitekerroksesta muodostettu rakenne, joka valmistetaan yleisesti muotissa kerroksittain, kerta- ja kestopuovien toimiessa matriisiaineina. Laminaatit ovat pääsääntöisesti tasomaisia. Laminointimenetelmiä ovat märkälaminointi käsin, prepreg laminointi käsin, ruiskulaminointi ja kuitukelaus. (4 ss. 153-158)

2.1.2 Injektointi

Injektoinnissa matriisiaine injektoidaan lujitekuidut sisältävään muottiin yli- tai alipaineella. Menetelmällä saadaan tasalaatuisia komposiitteja. (4 ss. 166-176)

2.1.3 Pultruusio

Pultruusiolla valmistetaan jatkuvia profiileja automatisoidussa prosessissa. Lujitekuidut vedetään hallitusti keloista hartsialtaaseen ja siitä edelleen lämmitettyyn muottiin jossa profiili saa muotonsa ja hartsin kovettuminen alkaa. Hartsi voidaan injektoida myös muottiin. Profiilin sisäpuoliset muodot saadaan aikaan muotin sisällä olevalla tuurnalla. (4 s. 186)

2.1.4 Puolivalmisteet

Prepreg = Pre-impregnated

Prepregit ovat puolivalmistetita, jotka kovetetaan lopulliseen muotoonsa lämmön avulla. Prepregissä lujitekuidut on käsitelty hartsilla, joka kovettuu lämmön avulla (B-tilainen hartsi). Prepregeillä on mahdollista valmistaa korkealuokkaisia laminaatteja nopeasti. (4 ss. 138-147)

SMC = Sheet Molding Compound

SMC on esivalmiste, jonka rakenneaineet ovat kertamuovimassa, täyteaine ja katkottu lujitekuitu. SMC toimitetaan käyttäjilleen levymäisinä esivalmisteina. SMC:stä valmistetaan levymäisiä matalakuormitteisiä kappaleita esim. kuumapuristamalla. (4 s. 138)

BMC = Bulk Molding Compound

BMC on esivalmistemassa jonka rakenneaineet ovat kertamuovimassa, täyteaine lujitekuituhake. BMC toimitetaan käyttäjilleen usein massana, josta voidaan valmistaa komposiitteja esim. kertamuovituotteiden valmistuksesta tutulla ruiskuvalukoneella. (4 s. 138)

Kudos

Kudokset ovat tasomaisia lujitekuiduista kudottuja kankaita, jossa lujitekuidut kulkevat toistensa lomassa. Tasavaltaisessa kudoksessa on sama määrä lujitetta loimi- ja kudesuunnassa. Kudosta pitää koossa ns. loimilangat, jotka eivät välttämättä ole lujitetta. Kudoksia käytetään kaikenlaisten laminaattien ja prepregien valmistuksessa. (4 s. 132)

Punokset eli braidit

Yksinkertaisin esimerkki punoksesta on tavallinen hiuspalmikko. Punos on kaksi tai kolmiaksaalinen lankajärjestelmä, jossa yksittäiset lujitekuitukimput risteävät toistensa yli ja ali. Kolmiaksaalisessa punoksessa on lujitteita myös punoksen aksiaalissuunnassa. Hiilikuitupunokset ovat paras tapa lujittaa monimutkaisia muotoja, joihin halutaan mahdollisimman vähän liitoksia, reikiä tms. Punoksilla on mahdollista lujittaa osia kaikissa suunnissa. Näissä ns. 3D punoksissa kulkee lujitteita myös punoskerroksen paksuussuunnassa. Punosten lujuusominaisuudet tasossa vastaavat usein muiden laminaattien arvoja, mutta tämän lisäksi punos on ylivertainen tasoa vastaan kohtisuorassa kuormituksessa. Punokset absorboivat kaikista laminaattityypeistä eniten energiaa ja estävät parhaiten särön etenemistä.

Punoksia käytetään usein putkimaisissa osissa, letkujen vahvikkeina ja vaijereina. Monimutkaisilla numeerisesti ohjatuilla punontakoneilla on valmistettu auton kevytrakenteisten autojen runkoja ja monimutkaisia geometrioita vaativiin kohteisiin. Punonnalla muodostetut reiät ovat huomattavasti kestävämpiä kuin poraamalla tehdyt reiät, sillä punotuissa aukoissa kuidut pysyvät jatkuvina eikä delaminaatiota eli matriisin irtoamista tapahdu kuten porauksessa. (9 ss. 24-28)

Kerroslevyt eli Sandwich

Kerroslevyt koostuvat pintalevyistä ja ydinaineesta. Ydinaineena voi olla jokin vaahto- tai kennomainen aine, esimerkiksi alumiinikenko. Pintalevyt ja kennot liimataan yhteen ja tuloksena on hyvin taivutusta kestävä kappale. (5 s. 98)

2.2 Hiili-Hiilimatriisikomposiitit

Hiili-hiilikuitukomposiitti (HH-komposiitit) koostuvat hiilikuiduista hiilimatriisissa. Materiaali kehittyi alkoi Yhdysvalloissa vuonna 1958 osana Nasan Apollo ja Ilmavoimien Dyna-Soar projekteja. Kaupalliset valmistusmenetelmät ovat usein salaisia ja seuraavassa esitetään menetelmien peruserätykset. (10 s. 2)

2.2.1 Valmistus

HH-komposiittien valmistukseen käytetään jatkuvia tai epäjatkuvia hiilikuituja, joiden päälle muodostetaan hiilimatriisi. Matriisiaineen muodostamiseen käytetään lämpö ja painetta (3 ss. 145-152):

- LPI = liquid phase integration, kivihiihterava-matriisiaine hiililytetään kuitujen päälle kovassa paineessa ja lämpötilassa. Päällystys ja hiililytys suoritetaan sykleissä (3-6) ja tuote muodostu vaihteittain.
- HIPIC = Hot Isostatic pressure inert gas, impregointilämpötila on korkeampi kuin edellä. Menetelmälä saadaan tiheämpiä komposiitteja kuin LPI:llä mutta tuotteet ovat kalliimpia
- Hot Pressing: esi-impregoitu hiilikuitutuote hiililytetään 650–1000 °C, inertissä ympäristössä tai vakuuissa. Hiililytyksen aikana paine on noin 70 MPa. Hiililytystä seuraa grafitointi 2200–3000 °C

Matriisinaineen muodostaminen kaasumaisista aineista (3 ss. 152-153):

- CVI/CVD= Chemical Vapour Infiltration/ Chemical Vapour Deposition=
Kaasufaasipäälystyys: Matriisiaine muodostetaan orgaanisesta kaasusta kovassa paineessa ja 700–2200 °C lämpötilassa. Prosessi on hidas ja tuotteen valmistaminen kestää viikkoja. Lopputuote on kovempi kuin muilla menetelmillä.

2.2.2 Ominaisuudet

Kaikilla menetelmillä voidaan valmistaa vaihtelevageometrisiä kappaleita. Valmistuksen jälkeinen lämpökäsittely, eli grafitointi, on ratkaiseva lopputuotteen mekaanisten ominaisuuksien kannalta. Komposiitin hapettuminen käytössä yli 300 °C lämpötiloissa on ongelma, jota vastaan komposiitit päälystetään piikarbidilla ja matriisiaineeseen lisätään hapettumisenestoaineita. Hiili-hiilikuitujen koneistus on vaikeaa, sillä vaihteleva kuitusuunta aiheuttaa vaihtelevan koneistusvoiman. (10 s. 239) Kuvassa 3 on esimerkki hiili-hiilikuitukomposiittien käytöstä Formula 1 auton jarruissa.

HH-komposiiteilla on suuri lämmön ja sähkönjohtokyky verrattuna muihin komposiitteihin. HH:n vetomurtolujuus alkaa kasvaa 1200 °C jälkeen, jolloin tavalliset superseokset alkavat heiketä. HH:n kuormankantokyky korkeissa lämpötiloissa on huomattavasti parempi kuin terästen. Jarrusovelluksissa komposiittien kitkaominaisuudet eivät ole pääintressi, vaan materiaalin kyky ottaa vastaan nopeasti suuri määrä lämpöä vaurioitumatta. (11)

Yleisiä hiili-hiilikuidun ominaisuuksia (11):

- lämmönjohtokyky 20–150 W/mK (vrt. teräs 27 W/mK)
- tiheys 1,5 – 2,5 kg/m³
- kimmomoduuli 300 GPa asti
- sulamispiste >4100 °C



Kuva 3, MC Laren MP4/20 jarrulevy, hiili-hiilikuitu, www.gurneyflap.com

2.2.3 Käyttökohteet

Hiili-hiilikuitukomposiittien käyttökohteita: uunien lämpöelementit, sulan aineen(metallit) kuljetuskanavina, avaruusteollisuuden lämpölevyt esim. NASA:n sukkuloiden etukartiot ja siipien lämpölevyt, lämmönvaihtimet, lento- ja autoteollisuuden jarrut, kilpa-autojen kytkinlevyt ja mahdollisesti polttomoottorien männät. (10 ss. 267-279)

2.3 Hiili-metallimatriisikomposiiti

Hiilikuitu-metallimatriisikomposiittien haluttuja ominaisuuksia suhteessa vastaavaan metalliin ovat: pienempi lämpölaajenemiskerroin, parempi lujuus ja jäykkyys, paremmat virumisominaisuudet, alhainen tiheys, hyvä kulutuksen kesto ja tarvittaessa kitka- ja liukuominaisuudet. Metallimatriisikomposiitteja käytetään mm. avaruus-, lento-, ja elektroniikkateollisuudessa ja hiilikuidut ovat usein jatkuvia. Matriisiaineina toimivat kupari, nikkeli, tina, hopea, lyijy, titaani, alumiini ja magnesium. Näistä alumiini on käytetyin, sillä se on kevyttä, halpaa, helppo koneista ja sulaa alhaisessa lämpötilassa. Hiilikuitumetallikomposiitteja käytetään mm. (*matriisimetalli*): sähkövastuksina (alumiini, magnesium), laakereina (tina), juotinaineina (hopea-kupari) ja korkean lämpötilan tuotteina (nikkeli). (3 ss. 125-143)

2.3.1 Valmistusmenetelmät

Yleisin valmistusmenetelmä on hiilikuituesituotteen kyllästys sulalla metallilla paineen avulla. Paine saadaan aikaiseksi kaasulla tai männällä. Muita valmistusmenetelmiä ovat (3 ss. 125-143):

- Diffusion bonding, kerrostetut hiilikuitukimput ja metallikerrokset puristetaan vakuumissa korkeassa paineessa ja lämpötilassa. Metallia ei sulaa vaan muovautuu hiilikuitulujitteen ympärille.
- Sulapuristus on vastaava valmistustapa kuin edellä, mutta paine on alempi ja metalli on sulassa tilassa. Hiilikuitu vahingoittuu, sillä se reagoi korkeassa lämpötilassa metallimatriisin kanssa.
- Metallin plasmaruiskutuksessa plasmatilassa oleva metalli ruiskutetaan hiilikuidun päälle. Tuloksena on huokoinen komposiitti, jonka jälkikäsitteily kuumapainamalla on usein tarpeellista

2.3.2 Kuitujen käsittely tartunnan parantamiseksi

Metallimatriisikomposiiteissa kuidun ja matriisin välinen tartunta on kriittistä, sillä eri matriisiaineet suhtautuvat hyvin vaihtelevasti hiilikuituun. Usein on tarpeellista pinnoittaa hiilikuitu keraamilla tai toisella metallilla tartunnan parantamiseksi. Hiilikuitujen pinnoitukseen käytettyjä metalleja ovat Ni, Cu, ja Ag ja keraameja Tic, Sic, B₄C, TiB₂, TiN, K₂ZrF₆, ZrO. Myös joitain suoloja käytetään pinnoitukseen. Pinnoitusmenetelminä käytetään kaasufaasipinnoitusta (CVD=Chemical Vapour Deposition), hiilikuidun päällystys metallisulalla (LMTA = Liquid metal transfer agent) ja liuospäällystystä. Pinnoituksen sijasta matriisimetalliin voidaan lisätä tartuntaa parantavia aineita. (3 ss. 125-143)

2.4 Hiili-keramimatriisikomposiitit

Hiili-keramimatriisikomposiittien pääryhmät ovat: (1) hiilikuitulujitteiset (HK-lujitteiset) betoni ja kipsit, (2) HK-lujitteiset lasit, ja (3) muut HK-lujitteiset keraamit. Hiilikuitulujitteisia lasia käytetään avaruusteknologiassa, jossa hiilikuitu pienentää komponenttien lämpötilanmuutoksesta johtuvia jännityksiä ja lujittaa niitä. Betoneissa hiilikuitua käytetään samoista syistä kuin edellä. Autotekniikan kannalta merkittävimmät komposiitit ovat kolmannessa ryhmässä. Matriisiaineita ovat esimerkiksi piikarbidi, pii, alumiinioksidi ja magnesiumoksidi. (3 ss. 177–194)

Valmistusmenetelmiä on useita. Matriisiaine muodostetaan hiilikuitujen ympärille esimerkiksi orgaanisesta piipitoisesta kaasusta, polymeeristä tai nestemäisestä oksidista korkean lämpötilan avulla. Autotekniikassa hiilikuitukeramimatriisikomposiitteja käytetään korkean lämpötilan sovelluksissa hiili-hiilikuitukomposiittien tilalla parempien hapettumisenkesto-ominaisuuksiensa takia. (3 ss. 177–194)

3 Hiilikuitukomposiittien sovellukset autotekniikassa

3.1 Runkorakenteet

Rungon tehtävä on kantaa autoon kohdistuvat kuormitukset ja muiden rakenteiden paino kaikissa ajotilanteissa, tarjota kiinnityspisteet jousitukselle, polttoainetankille, voimalaitteistolle sekä muilla apulaitteille. Tämän lisäksi rungon tulee suojata matkustajia ja kestää suuri ja äkillinen kuormitus kolaritilanteessa. Lopuksi rungon on oltava kevyt, jotta auton paino ei haittaa ajokäyttäytymistä, nosta polttoainekulutusta ja vähennä suorituskykyä. Rungon suunnittelussa keskitytään tavallisesti niin jäykkyyteen kuin lujuuteen. Jäykkä runko välittää ajoradan vaihtelusta aiheutuvat voimat hyvin jousituspisteiden välillä, eikä varastoi itseensä tien epätasaisuuksien energiaa. Muutoin energia purkautuu takaisin tiehen ja aiheuttaa värähtelyitä autossa. (12 s. 496)

3.1.1 Hiilikuitumonokokki

Monokokissa koko yhtenäinen runkorakenne kantaa kuormaa ja suojaa kuljettajaa törmäystilanteessa. Formula 1 autojen hiilikuitumonokokkirungot painavat 35–40 kg. Runko koostuu alumiinikennoista ja laminoiduista hiilikuitukomposiiteista. Komposiittimonokokin etuja teräspalkki- ja putkirunkoon ovat yhtenäinen rakenne, tasaisesti jakautuva kuormitus, viimeistelty ulkopinta, ei tarvetta koripaneeleille sekä hiilikuitukomposiittien energia-absorptiokyky ja hallittu murtumismekanismi. Hiilikuitukomposiitit eivät myöä kuormituksessa ja korkean jäykkyytensä takia hiilikuitumonokokki jakaa törmäyskuormituksen suuremmalle alalle runkoon. Vastaavassa tilanteessa metalli myötää aluksi paikallisesti ja muodonmuutokset ovat isoja. Kuvassa 4 on Formula 1 auton hiilikuitumonokokki. (5 ss. 104-115)

Ensimmäinen hiilikuitumonokokki tehtiin McLaren MP4/1 Formula 1 autoon vuonna 1981. MC Laren aloitti kehityspolun Formula 1 sarjassa, jota noudatetaan edelleen; kaikissa Formula 1 autoissa on hiilikuitumonokokki runko. Siirtyminen hiilikuiturungon käyttöön mullisti kilpa-autourheilua ja paransi kuljettajien turvallisuutta huomattavasti. (5 ss. 104-115) Hiilikuitumonokokkia on käytetty seuraavissa superautoissa: McLaren F1 (1992), Bugatti Veyron(2005) (13), Pagani Zonda(1990) (14), Enzo Ferrari (2002), Ferrari F50 (15), MCLaren MP4-12 C (16)



Kuva 4 Formula 1 monokokki
www.rennsportnews.de

3.1.2 Avoauton jäykkyyden säilyttäminen ja vahvistavat runkorakenteet

Avoauton vääntöjäykkyys voi tippua 50 % vastaavasta suljetusta runkorakenteesta jos autoa ei suunnitella oikein ja rungon valmistuksessa ei huomioida oikeita materiaaliominaisuuksia. Avoauton vääntöjäykkyyden nostaminen on haastavaa ilman huomattavaa auton massan kasvattamista. Esimerkiksi Lamborghini Murcielago Roadster avoautossa on korvattu huomattava osa alkuperäisen auton teräspalkeista hiilikuituisilla osilla. Näin ollen rungon jäykkyys on lähes samaa tasoa kuin suljetun runkorakenteen Murcielagossa. Avoauton rungon lisävahvikkeet säästivät 60 % vastaavien teräsvahvikkeiden painosta. (12 s. 496)

3.2 Jarrut

3.2.1 Hiili-hiilikuitu

Hiili-hiilikuitujarruja (HH-jarrut) käytetään tällä hetkellä vain urheiluautoissa ja kilpa-autoissa. HH-jarrut kestävät todella hyvin suuri ja nopeita lämpörasituksia, eivätkä ne menetä kitkaominaisuuksiaan yllättäen lämpötilan noustessa vaan tarjoavat tasaiset jarrutusominaisuudet laajalla käyttölämpötila-alueella. Lisäksi ne kestävät kaksi kertaa enemmän kulutusta (10 ss. 271-280) kuin vastaavat teräsjarrut ja ovat noin puolet kevyempiä. (8) HH-jarrut ovat olleet käytössä lentokoneolosuhteissa jo pitkään (17) ja niitä käytetään Formula 1 sarjassa. (18) HH-jarrujen valmistustekniikasta on hyvin rajatusti tietoa, sillä valmistajat pitävät kehittämänsä menetelmät salassa. Jarrujen suunnittelun kannalta hiili-hiilikuitujarrut vaativat joiltain osin uusia lähestymistapoja. Metallijarrujen kestoikä on verrannollinen absorboituun lämpöenergiaan. Hiili-hiilikuitujarrujen kuluminen riippuu jarrutuskertojen määrästä; yksi tehokas jarrutus kuluttaa levyä vähemmän kuin monta pientä jarrutusta. (17)

3.2.2 Hiili-kerami

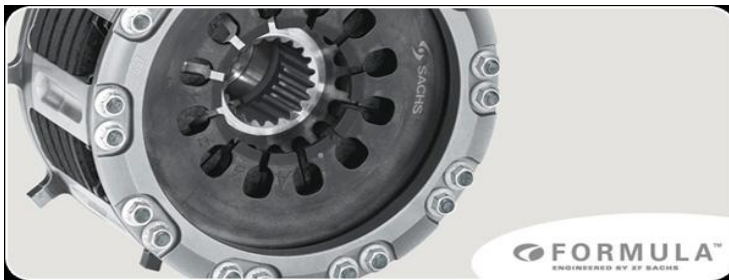
Hiili-keramijarrut autosovelluksissa esiteltiin ensikerran vuonna 1999 Frankfurtin IAA (International Automobil-Ausstellung) näyttelyssä (19). Hiili-keramijarruja on käytetty kilpa-autoilussa 1980-luvulta lähtien. (20) Kova matriisiaine on esim. piikarbidi(SiC) ja alkuaine pii (Si). Hiilikuitulujite antaa jarrulevyille lujuutta ja estää särönkasvua. Verrattuna valurautajarruihin, hiili-keramijarrut kestävät satoja asteita kuumempia käyttölämpötiloja, painavat puolet verrokista ja käyttäytyvät tasaisemmin suurissa lämpötiloissa. (8) Kuvassa 5 näkyy hiili-keramijarrulevyn kiinnitys metalliseen napaan. Mm. seuraavissa autoissa on saatavilla hiili-keramijarrut: kaikki Ferrari mallit, Pagani Zonda, GM Corvette ZR1, Aston Martin DBS, Alfa Romeo 8C, Porsche 911 GT2 (20) Bugatti Veyron (13)



Kuva 5 Hiili-keramijarrut (20)

3.3 Kytkin

Hiilikuitukytkimet ovat kuivia yksi- tai monilevykytkimiä, joissa kytkinlevyn kitkamateriaalina on hiili-hiilikuitukomposiitti tai hiili-keramikomposiitti kuten jarrulevyissäkin. Kuvassa 6 on monilevykytkin. (21) Hiilikuitujarru- ja kytkinlevyjen erot ovat levyjen geometrioissa ja komposiittien lisäaineissa ja valmistusmenetelmissä. Valmistajat pitävät valmistustiedot tarkoin salassa. Hiili-hiilikuitukytkimiä käytetään maailmanlaajuisesti mm. Formula 1 kilpasarjassa. (18) Hiilikuitukytkimet voidaan tehdä pienemmiksi ja kevyemmiksi kuin perinteiset kytkimet ja ne kestävät paremmin kuumuutta. (22) Tuotteiden valmistajista mainittakoon Valeo, Carbonetic, Sachs Esimerkiksi Porsche:n 911 GT3 R (23) ja McLaren F1 (16) superautoissa on hiili-hiilikuitukytkin.



Kuva 6, Sachs hiili-hiilikuitukytkin (24)

3.4 Vetoakselit

Veto- ja kardaaniakselit välittävät moottorin vääntömomentin vetäville pyörille. Vetoakseleiden on kestävä kuormitukset nurjahtamatta, vaimentaa moottorin värähtelyjä ja niiden luonnollisen ominaistajuuden tulee olla korkea, jotta haitallisia resonanssivärähtelyjä ei synny akselissa. Jos teräskardaani on yli 1,2 m pitkä, se pitää valmistaa kahdessa osassa, koska pidemmällä akselilla on alhaisempi ominaisvärähtelytaajuus. Tämä johtuu siitä että akselin ominaisvärähtelytaajuuden arvo on kääntäen verrannollinen akselin pituuden neliöjuureen. Hiilikuitukomposiitit mahdollistavat pitkien akseleiden valmistamisen yhtenä kappaleena, sillä niiden kimmomoduuli suhteessa tiheyteen on moninkertainen teräkseen ja alumiiniin verrattuna ja näin ollen näiden komposiittien luonnollinen ominaistajuus on huomaavasti korkeammalla (ks. taulukko 3) (25 ss. 33-47) Hiilikuidun suuntautuneiden lujuusominaisuuksien ansiosta vetoakseleiden värähtelyvaste- ja jäykkyysominaisuuksia voidaan muunnella. Lyhyesti sanottuna akselin suuntaiset kuidut nostavat ominaisvärähtelytaajuutta, 45° kulmassa kuidut parantavat akselin leikkauslujuutta ja 90° kuidut tarjoavat suurimman vääntönurjahduskuorman. (26 ss. 33-47)

Yhtenäinen vetoakseli säästää painoa, koska siinä ei ole niveltä.

Värähtelynvaimennusominaisuuksiensa myötä komposiittivetoakselit pienentävät vetolaitteisto kuormituksia ja parantavat niiden kestoikää ja sekä renkaiden pitoa. Muovimatriisikomposiitit estävät lisäksi tehokkaasti särönkasvua, sillä säröt eivät pääse etenemään vapaasti vaan törmäävät lopulta kuituihin ja joutuvat vaihtamaan kulkusuuntaa. (26 ss. 33-47)

3.5 Tukivarret

1990 luvulla McLaren otti käyttöön ensimmäisenä hiilikuitutukivarret Formula 1 sarjassa. Hiilikuituisten tukivarsien etuna on alhainen paino ja metallisia tukivarsia parempi väsymisen kesto, mikä antaa niille lähes äärettömän kestoiän. (5 s. 97)

3.6 Törmäyssuojat

Metallit myötävät ennen lopullista murtumista. Hiilikuitukomposiiteilla myötämisen ilmiötä ei esiinny, koska lujitekuidut ovat hauraita. Sen sijaan hiilikuitukomposiitit deformaatioituvat elastisesti murtumiseen asti. (5 ss. 106-115) Ensimmäinen murtuma voi olla matriisimurtuma, matriisin irtoaminen tai jonkin kuitusuunnan murtuma, jonka jälkeen komposiitti kuormittuu edelleen elastisesti, mutta sen kimmomoduuli on alentunut. (4 ss. 242-247) Kun komposiitin murtolujuus saavutetaan, komposiitti murtuu kuormituksen alueella ja murtuminen jatkuu hallitusti. Murtumisprosessiin voi oleellisesti vaikuttaa kuitujen orientaatiolla. Esimerkiksi sylinteri, jossa lujitekuidut ovat $\pm 45^\circ$ kulmassa sylinterin pituusakseliin nähden, sitoo törmäysenergiaa lähes tasaisella voimalla. Kuvassa 7 on Formula 1 auton runko etutörmäystestissä. (27 ss. 492-493) Rungoissa ja törmäyssuojalaitteissa käytetyt

monimutkaiset komposiitit absorboivat energiaa mm. seuraavilla tavoilla (5 ss. 113-114):

1. kuitujen murtuma ja halkeilu
2. matriisimurtuma
3. kuitujen irtoaminen matriisista
4. lujitekuitujen delaminaatio



Kuva 7 Hiilikuidun hallittu murtuminen törmäystestissä (5 s. 114)

3.7 Koripaneelit, sisustan osat ja muut komponentit

Hiilikuitukomposiittien käyttö koripaneeleissa, ilmanohjaimissa ja moottorin suojusta on yleistä kalleimmissa urheiluautoissa. Aiemmin kuvattujen suunnittelukriteerien määräämänä hiilikuidusta pystyy valmistamaan kevyitä ja jäykkiä paneeleita monenlaisissa muodoissa. Kilpa-autoissa käytetään hiilikuituisia ilmanohjaimia ja spoilereita ja kuluttajille on markkinoilla laaja valikoima jälkiasennusosia. (28) Kalleimmissa henkilöautoissa hiilikuitukomposiitteja käytetään myös esteettisissä tarkoituksissa, kuten sisustan osissa, katso kuva 8. (29)



Kuva 8 Esteettisiä hiilikuituosia (29)

3.8 Moottorin osat

Teoriassa hiilikuitukomposiiteista voi valmistaa polttomoottoreiden sylintereitä ja mäntiä. Hiili-hiilikuidun vähäinen lämpömuodonmuutos mahdollistaa moottorin välysten minimoinnin koko moottorin käyntinopeus, ja -lämpötila-alueella. Näin ollen esimerkiksi männänrenkaita ei tarvittaisi. Mahdollinen sylinterilohkon ja mäntien tekeminen hiilikuidusta poistaisi lämpövaihtelusta aiheutuvat laajenemat ja moottorin kitkaa saataisiin pienennettyä huomattavasti. Hiili-hiilikuitukomposiitit ovat lisäksi noin 30 % kevyempiä kuin alumiini, ja näin ollen komposiitit pienentäisivät moottorin liikkuvaa massaa ja parantaisivat taloudellisuutta. (30)

3.9 Vanteet

Lujuusominaisuuksien lisäksi hiilikuitumuovikomposiittien muotoilun voidaan hyödyntää vanteissa. Honda ja Lancia valmistivat ensimmäiset hiilikuituvanteet 1980-luvulla. Oikein suunniteltu hiilikuituvanne pienentää vanteiden pyörivää massaa yli 50 %. (31) Joissain valmistajien Ascari, Mosler ja Koenigsegg malleissa on Dymag:in valmistamat hiilikuituvanteet. Kuvassa 9 on hiilikuituvanne valkoiseksi maalatulla magnesiumkeskiöllä. (32)



Kuva 9 Dymag:in valmistama hiilikuituvanne magnesiumkeskiöllä (32)

3.10 Alan yrityksiä

3.10.1 SGL Goup (Saksa)

Yhtiö valmistaa monenlaisia tuotteita hiilikuiduista, prepregeihin ja aina autotekniikan hiili-hiilikuitujarruihin. Valmistustekniikoista tiedetään luonnollisesti vähän, mutta seuraavassa on esitelty yhtiön sovelluksia eri autoissa. SGL Group valmisti ensimmäiset hiili-hiilikuitujarrut Formula 1 sarjaan ja heillä on laajaa osaamista auto- ja lentokoneteollisuudessa. Hiili-hiilikuitu- ja hiili-kerami jarruja on käytetty mm. seuraavien valmistajien kalliissa urheiluautoissa: Bentley, Lamborghinih, Audi, Bugatti, Porche 911 GT2. (8)

Benteler-SGL on osa SGL Groupia. Firma suunnittelee, testaa ja valmistaa hiilikuituisia sarjavalmisteisiin autoihin ja erillisprojekteihin. Yhtiön toteutuneita projekteja ovat mm.: Porche GT3 ovien osia, Bentley Azur rungon osia, KTM X-Bow ilmanohjaimia, Audi R8 korin osia, Porche Cayenne suojakuoria, spoilereita, Tesla Roadster turvakaaren osia, Lexus moottorin suoja, Alfa Romeo 8C takaluukku. (28)

3.10.2 Dallara Automobili

Italialainen yhtiö Dallara Automobili valmistaa komposiittirunkoja kilpa-autoihin. Vuonna 2010 yhtiö valmisti Formula 1 auton rungon Campos Meta tallille. (33) Myös KTM X-Bow autossa on Dallaran valmistama hiilikuiturunko. (34) Dallara on aiemmin valmistanut komposiittirunkoja seuraavissa kilpa-autosarjoissa: Formula 1 1988, Formula 3, IndyCar Series, Indy Lights, Grand-Am Rolex Sports Car Series, GP2 Series, World Series by Renault, GP3 Series and ADAC Formel Masters. Dallara valmistaa KTM X-Bow autoon rungon. (34) Vuonna 2010

4 Kierrätettävyys

Hiilikuidun kallis hinta (noin 130€/kg (2 s. 22) ja sen valmistuksen korkea energiatarve puhuvat hiilikuidun kierrätyksen puolesta. Hiilikuidun kierrätykseen tarvittava teknologia ja lajitteluinfrastruktuuri ovat olemassa, kuten myös potentiaaliset käyttökohteet kierrätetylle materiaalille. Autonvalmistajat tähtäävät lähivuosina 80 % kierrätettävyteen kaikissa autoissa ja ovat valmiita kokeilemaan uusia komposiittimateriaalien kierrätysmenetelmiä teollisessa mittakaavassa. Kierrätysprosessit eivät ole vielä täysin kaupallisessa skaalassa kannattavia mutta niitä kehitetään aktiivisesti. Esimerkkejä kehitysprosesseista mainittakoon Englannissa Fibre Cycle ja Nottinghamin Yliopiston johtamat HIRECAR ja AFRECAR projektit. (2 ss. 22-27)

4.1 HIRECAR – AFRECAR Kehitysprojektit

Kolmivuotinen (2006-2008) HIRECAR (High Value Composite Materials from Recycled Carbon Fibre) -projekti haki menetelmiä hiilikuidun kierrättämiseksi ja kierrätetyn materiaalin käyttämiseksi autoteollisuudessa. Nottinghamin yliopisto veti projektia tohtori Nick Warriorin johdolla ja mukana oli myös hiilikuidun käyttäjiä ja toimittajia kuten Advanced Composites Group, Ford Motor Company, Technical Fibre Products ja Toho Tenax GmbH. Testattavana oli kaksi menetelmää epoksi-hiilikuitukomposiitin kierrättämiseksi, leijupetireaktio, missä matriisiaine poistetaan korkeassa lämpötilassa ja ylikriittisen nesteen käyttö matriisin irrotukseen. Projektin tulokset osoittivat menetelmien toimivuuden laboratoriotasolla. (2 s. 25) Edulliselle kierrätetylle hiilikuidulle sopivia käyttökohteita ovat esimerkiksi DMC ja SMC valmisteita. (35)

AFRECAR(Affordable Recycled Carbon Fibres) on jatkoa HIRECAR-projektille. Mukana on edellisten lisäksi Boeing. Lentoala on merkittävä komposiittijätteen tuottaja, sillä uusien lentokoneiden rakenteista suurin osa on komposiittimateriaalia ja 25–30 vuoden päästä poistettavat lentokoneet on pystyttävä kierrättämään asianmukaisesti. AFRECAR-projekti keskittyykin edeltäjäänsä enemmän jatkuvalujitteisiin hiilikuidun kierrätyksen kehittämiseen ja kierrätetyn tuotteen uudelleenkäyttömahdollisuuksiin, siinä missä HIRECAR kehitti SMC ja BMC tuotteiden kierrätystä. Tutkittavan prosessin avulla on mahdollista kierrättää myös osa matriisiaineen kemiallisista komponenteista ja hyödyntää niitä kemianteollisuudessa. Kierrätettyä kuitua on tarkoitus käyttää lento- ja autoteollisuuden epäkriittisissä komponenteissa kuten penkeissä ja luukuissa. (2 ss. 22-27)

4.2 Hiilikuitukomposiittimateriaalien kierrätysmenetelmät

4.2.1 Mekaaninen kierrätys

Menetelmässä komposiitti murskataan ja haketetaan pieniksi paloiksi, jotka jauhatetaan eri partikkelikokoluokkiin. Käyttökohteita ovat esimerkiksi täyteaineet kestopuovituotteissa. Mekaaninen kierrätys sopii täysin kovettuneille lujitemuovivalmisteille, sillä niiden matriisiaine on haurasta eikä haihdu prosessissa aiheuttaen mahdollisia tulipalo- tai terveysriskejä. (4 s. 427) Menetelmä ei erottele lujitekuitua ja matriisiainetta yhtä tehokkaasti kuin kemialliset kierrätysmenetelmät. SMC ja BMC massoista valmistetut tuotteet sopivat hyvin mekaaniseen kierrätykseen. Lajittelu on tärkeä mutta epähaluttu osa kierrätystä, sillä se on kallista ja aikaavievää. Lajittelemattomalla hakkeella on vain vähäistä käyttöä komposiittiteollisuudessa, sillä komposiittien valmistuksessa on tärkeää tietää eri komponenttien koostumus, jotta voidaan varmistaa komposiitin tasalaatuinen rakenne. (36 ss. 144-148) Mekaanisen kierrätyksen menetelmiä käytetään myös myöhemmin esiteltävissä kierrätystekniikoissa hienontamaan kierrätettävää materiaalia.

Hiilikuitujauheen käyttökohteita (37)

- sementin lisäaineena
- muovituotteiden täyteaineina
- sähköä johtavat muovituotteet
- sähkömagneettiset suojat tuotteet, esim. elektroniikkateollisuus
- polttokennot
- eristysaineena korkeissa lämpötiloissa
- pinnoitteina teollisuudessa

4.2.2 Leijupetireaktio

Esirikotun komposiittimateriaalin matriisinne poistetaan leijupetilaiteistolla korkeassa lämpötilassa (550 °C). Matriisiaine palaa tai pilkkoutuu kaasuksi, joka poltetaan jälkipoltossa. Menetelmän peruseriaate on käytössä laajalti energiantuotannossa ja jätteiden poltossa. (38 s. 2590)

4.2.3 Pyrolyysi

Kuivatislauksessa eli pyrolyysissä hajotetaan orgaanisia aineita kuumentamalla hapettomassa tai vähähappisessa ympäristössä. Menetelmä sopii hyvin kertamuovikomposiiteille ja on kaupallisessa käytössä. Pyrolyysillä voidaan käsitellä myös saastunutta jätettä. Vaikeita jätteitä ovat mm. maalatut SMC-komposiitit ja liimat. (39 s. 888) Pyrolyysi pilkkoo molekyylejä komponentteihinsa kemiallisten reaktioiden avulla ja erottaa kaasuja ja muita pienimolekyylisiä komponentteja. Hiilikuitukomposiittien pyrolysoinnissa vapautuvat hiilivedyistä voidaan käyttää 40 % bensiinin lisänä ja loput voidaan sekoittaa öljyihin. (40 s. 897) Pyrolyysi vahingoittaa

hiilikuidun rakennetta ja huonontaa sen mekaanisia ominaisuuksia n. 10 %. Menetelmä on kaupallisessa käytössä (37)

4.2.4 Kemiallinen liuotus

Kemiallisia liuotusmenetelmiä on monia ja niitä on kokeiltu laboratoriotasolla. Käytetyt kemikaalit ovat kuitenkin usein voimakkaita (esim. typpihappo) ja ympäristölle haitallisia. Täällä hetkellä parhaiten hiilikuidun ominaisuudet säilyttää epoksimatriisin liuotusmenetelmä. Ylikriittiset alkoholit(asetoni, propanoli, etanoli, metanoli) liuottavat matriisiaineen ja jäljelle jäävä kuitu on hyvin säilynyttä. Liuotinaineet eivät ole myrkyllisiä ja ne voidaan myös kierrättää tislamalla, lisäksi alkoholien hinta on alhainen verrattuna muihin voimakkaampiin kemikaaleihin. Hiilikuidut säilyttävät 85–99% vetolujuudestaan. Menetelmällä ei vielä ole kaupallista sovellusta. (41 ss. 83-85)

4.2.5 Uudelleenkäyttö polttoaineena

Muovikomposiittimateriaalien kierrätys on houkuttelevaa matriisiaineen ja hiilikuidun korkean lämpöarvon takia. Menetelmää on kokeiltu jätteenpolttolaitoksessa mutta palamaton lujite ja pienet hiilikuituhiukkaset ovat haaste menetelmän laajamittaisessa käytössä. Savukaasun hiukkaspitoisuus edellyttää korkealuokkaista suodatusjärjestelmää ja poltettavan materiaalin koostumus on tunnettava tarkkaan, sillä myrkyllisten materiaalien polttaminen on kiellettyä ja sähkönjohtava hiilikuitupöly voi vahingoittaa suodatuslaitteistoa. (4 s. 429)

Yhteenveto

Hiilikuidun käyttö on laajentunut huippuluokan urheilullisten henkilöautojen vakiovarusteisiin ja lukuisilla sovelluksilla on korvattu perinteisiä autotekniikan rakenneaineita. Tuloksena on entistä monipuolisempia ja suorituskykyisempiä ajoneuvoja. Normaalisissa henkilöautoluokassa hiilikuidun käyttö on vasta suunnitteluasteella kalliin hintansa takia. Rakenteen painon minimointi ei ole ainoa syy hiilikuitukomposiittien käyttöön, sillä tietyillä hiilikuitukomposiiteilla on potentiaalia myös äärimmäisen lämpötilan ja ympäristöolosuhteiden rakenneaineina sekä dynaamisesti kuormitettujen rakenteiden materiaalina. Tästä esimerkkinä on tekstissä esitelty hiilikuituinen moottorikonstruktio.

Lisääntynyt yleinen ympäristötietoisuus ja -lainsäädäntö edistävät hiilikuitukomposiittien kierrätystekniikoiden kehittämistä. Tällä hetkellä monet yritykset ovat kaupallistaneet tietotaitonsa ja hiilikuitukomposiitteja kierrätetään uusiksi komposiittituotteiksi. Tästä huolimatta uusiokomposiittien osuus tuotetuista komposiiteista on pieni ja ne eivät vielä pysy korvaamaan vaativimpien rakenteiden komposiittituotteita.

Lähdeluettelo

1. **Adam, H.** *Carbon fibre in automotive applications*. Aachen, Saksa : Elsevier, 1997. S0261–3069(97)00076–9.
2. **Marsh, George.** *Carbon recycling:A Soluble Problem*. [Reinforced Plastics Volume 53, Issue 4] Nottingham : Elsevier Ltd., 2009. Stephen Pickering,stephen.pickering@nottingham.ac.uk. 0034-3617/09.
3. **Chung, Deborah D.L.** *Carbon fibre composites*. Newton : Butterworth-Heineman, 1994. 0-7506-9169-7.
4. **Kokko;Saarela ja Airasmaa.** *Komposiittirakenteet*. Helsinki : Muoviyhdistys ry, 2007. ss. 17, 80, 138-186, 428-429. 978-951-9271-28-6.
5. **Savage, G.** *Formula 1 Composites Engineering*. Northans : Elsevier, 2009. 17 (2010) 92–115.
6. **Pierson, Hugh O.** *Handbook of Carbon, Graphite, Diamond and Fullerenes*. New Mexico : Noyes Publications, 1993. pp. 165-195. 0-8155-1339-9.
7. **Kaila, Kimmo.** *Amroy Oy*. Hollola, Maaliskuu 2010.
8. **SGL Group.** The Carbon Company. [En ligne] [Citation : 15. Maaliskuu 2010.] www.sglgroup.com.
9. **Lee, Stuart M.** *Handbook of Composite Reinforcements*. California : Wiley-VCH, 1993. pp. 24-40. ISBN: 0-471-18861-1.
10. **Buckley et Dan.** *Carbon-carbon Materials and Composites*. New Jersey : Noyes Publications, 1993. pp. 1-17, 267-281. 0-8155-1324-0.
11. **Windhorst et Blount.** *Carbon-carbon composites: a summary of recent developments and applications*. Coventry : Elsevier, 1997. S0261-3069(97M0024-1).
12. **Feraboli, et al.** *Integrated development of CFRP structures for a topless high performance vehicle*. [Elsevier] Seattle, Agata Bolognese : Elsevier, 2006. 78 (2007) 495–506.
13. **Bugatti.** Official Web Site. [En ligne] [Citation : 18 Maaliskuu 2010.] www.bugatti.com.
14. **Pagani Automobili S.p.A.** [En ligne] [Citation : 19 Maaliskuu 2010.] <http://www.paganiautomobili.it/english.htm>.
15. **Ferrari.** Official Web Site. [En ligne] [Citation : Maaliskuu 17 2010.] http://www.ferrari.com/English/GT_Sport%20Cars/Classiche/Pages/Classiche.aspx.

16. **McLaren Group.** The Official Website. [En ligne] [Citation : 26 Helmikuu 2010.] <http://mclaren.com/>.
17. **The Boeing Company.** Official Web Site. [En ligne] 2010. [Citation : 4 Huhtikuu 2010.] www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_03_09/article_05_1.html.
18. **Formula 1.** Official website. [En ligne] [Citation : 4 Huhtikuu 2010.] www.formula1.com.
19. **(AAI) Automobil-Ausstellung, International.** [En ligne] 2009. [Citation : 5 Huhtikuu 2010.] www.iaa.de.
20. **Brembo.** Brake Systems. [En ligne] [Citation : 5 Huhtikuu 2010.] www.brembo.com.
21. **Valeo Clutches.** [En ligne] <http://www.valeoclutches.com/>.
22. **Carbonetic.** Clutches, LSDs and Gears. [En ligne] Carbonetic. [Citation : 15 Maaliskuu 2010.] www.carbonetic.com.
23. **Proche.** The Official Proche Site. [En ligne] Porche. [Citation : 6 Huhtikuu 2010.] www.porsche.com.
24. **Bremsen Technic (UK) Ltd.** Quality Automotive Components. [En ligne] [Citation : 10 Maaliskuu 2010.] http://www.racepads.co.uk/zfsachs_formula.htm.
25. **Lee et Gil, Dai.** *Optimal design of the press fit joint for a hybridaluminum/composite drive shaft.* [Elsevier] Guseong-dong : Elsevier, 2004. 70 (2005) 33–47.
26. **Talib, et al.** *Developing a hybrid, carbon/glass fiber-reinforced, epoxy composite automotive drive shaft.* Serdang, Selangor : Elsevier, 2009. 31 (2010) 514–521.
27. **Chiara, et al.** *Progressive crushing of fiber-reinforced composite structural components of a Formula One racing car.* [Elsevier] Milano, Modena : Elsevier, 2004. 68 (2005) 491–503.
28. **Benteler-SGL.** Automotive Composites. [En ligne] [Citation : 6 Huhtikuu 2010.] www.benteler-sgl.de.
29. **MA Carbon.** Carbon Fiber for Porsche, Ferrari, Lamborghini and More. [En ligne] [Citation : 11 Huhtikuu 2010.] <http://www.macarbon.com/home.html>.
30. **Ransone, Philip O.** Nasa Technical Briefs. *Internal-combustion engines with ringless carbon pistons.* [En ligne] 2002. [http://findarticles.com/p/articles/mi_qa3957/is_200208/ai_n9131598/ ja](http://findarticles.com/p/articles/mi_qa3957/is_200208/ai_n9131598/ja)
<http://www.techbriefs.com/tech-briefs>.

31. **Fagnand; Meier; Smith.** Materials Process Design & Control Laboratory - Cornell University. *Carbon Fiber Reinforced Polymer Rim for a Formula SAE Race Car*. [En ligne] 2009. [Citation : 6 Huhtikuu 2010.] http://mpdc.mae.cornell.edu/Courses/MAE4700/Symposium/Fagnand_Meier_Smith-Paper.pdf.
32. **Dymag Usa.** [En ligne] 2009. [Citation : 9 Huhtikuu 2010.] <http://www.dymag-usa.com/automotive/#overview>.
33. **Fédération International de l'Automobile (FIA).** [En ligne] 2009. [Citation : 26 Maaliskuu 2010.] <http://www.fia.com/en-GB/Pages/HomePage.aspx>.
34. **Dallara Automobili.** [En ligne] 2009. [Citation : 2 Huhtikuu 2010.] www.dallara.it.
35. **Warrior, Nichols.** European Archive. [En ligne] 2009. [Citation : 3 Helmikuu 2010.] hakusanalla: file34992. <http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/>.
36. **Tucker et Lindsey.** *An Introduction to Automotive Composites*. Shawbury : Rapra Technology Limited, 2002. 1-85957-279-0.
37. **Recycled Carbon Fibre Ltd.** [En ligne] 2009. [Citation : 2 Helmikuu 2010.] <http://www.recycledcarbonfibre.com/>.
38. **Rudd, et al.** *Surface characterisation of carbon fibre recycled using fluidised bed*. [Applied Surface Science] Nottingham : Elsevier, 2008. 254 (2008) 2588–2593.
39. **Peters, S.T.** *Handbook of Composites*. Mountain View : Chapman & Hall, 1998. p. 888. ISBN: 0-412-54020-7.
40. **Laresgoitia, Marcoa, De et Caballeroa.** *Recycling by pyrolysis of thermoset composites: characteristics of the*. [Fuel/Elsevier] Bilbao : s.n., 2009. 79 (2000) 897–902.
41. **Pinero-Hernanza, et al.** *Chemical recycling of carbon fibre composites using alcohols*. [Journal of Supercritical Fluids/Elsevier] Valloild, Nottingham : Elsevier B.V., 2007. 46 (2008) 83–92.