

Lappeenrannan teknillinen yliopisto  
Teknillinen tiedekunta  
LUT-Metalli  
BK10A0400 Kandidaatintyö ja seminaari

KOMPOSIITTIEN KÄYTTÖ TÄMÄN PÄIVÄN KONEENRAKENNUKSESSA  
THE USE OF COMPOSITE MATERIALS IN TODAY'S MACHINE BUILDING

Lappeenranta 31.8.2010

Pasi Horppu

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto  
Teknillinen tiedekunta  
Konetekniikan koulutusohjelma

Pasi Horppu

### **Komposiittien käyttö tämän päivän koneenrakennuksessa**

Kandidaatintyö  
2010  
Lappeenranta

50 sivua, 24 kuvaa, 2 taulukkoa

Tarkastaja: Merja Huhtala

Hakusanat: Kuitulujitetut komposiitit, valmistus, työstäminen, liittäminen, kierrätys

Komposiitit ovat yhdistelmäateriaaleja, jotka koostuvat kahdesta tai useammasta eri materiaalista. Komposiitit ovat kiinnostavia tämän päivän koneenrakennukselle niiden korkean vahvuuden ja jäykkyyden suhteesta niiden kevyeseen painoon nähden. Kuitulujitteisten komposiittien ja laminaattien valmistukseen on monia eri menetelmiä ja ne eroavat toisistaan lähinnä hartsin levittämistapojen sekä kuitujen asettelutapojen perusteella. Komposiittien työstäminen on vaikeaa, mikä johtuu niiden epähomogeenisesta ja anistrooppisesta laadusta ja komposiittien sisältävien lujitteiden korkeasta abrasiivisesta vaikutuksesta. Tavanomaisia työstömenetelmiä, kuten sorvausta, porausta ja jyrsimistä käytetään komposiittien työstämiseen. Kuitujen suuntaus komposiiteissa vaikuttaa paljon niiden työstämiseen. Ultraäänisen värinän käyttäminen kuitulujitteisia komposiitteja sorvattaessa parantaa työstetyn kappaleen pinnanlaatua. Komposiittimateriaalien kiinnittäminen metalleihin eroaa selvästi muiden materiaalien kiinnittämisestä. Komposiittien yhdistämisen yhteydessä on otettava huomioon monia eri asioita, kiinnitysreikien valmistuksesta käytettäviin kiinnikkeisiin. Komposiittien kierrätys ja hävittäminen on tärkeä osa niiden elinkaarta, eikä niiden kierrätykseen ole tällä hetkellä hyviä ja kustannustehokkaita kierrätysmenetelmiä. Tällä hetkellä kierrättäminen tulee kalliimmaksi, kuin käytettyjen komposiittien vieminen kaatopaikalle.

## ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology  
Faculty of Technology  
Degree Programme of Mechanical Engineering

Pasi Horppu

### **The use of composite materials in today's machine building**

Bachelor's Thesis  
2010  
Lappeenranta

50 pages, 24 figures, 2 tables

Examiner: Merja Huhtala

Keywords: Fibre-reinforced, composite materials, producing, machining, joining, recycling

Composites are materials that consist of two or more different materials. Composite are interesting materials in today's machine building because of their high strength and stiffness in relation to their light weight. There are many different methods to produce fibre reinforced composites and laminate composites and they differ from each other in spreading the resin and settling the fibres in different ways. It is difficult to machine composite materials because of their inhomogeneous and anisotropic nature and because of the abrasive effect of the filler materials. Conventional machining methods like turning, drilling and milling are used to machine composites. The alignment of fibres in composites makes a difference in machining composites. Using ultrasonic vibration when machining fibre reinforced composites makes the surface quality better. Joining composite materials to metals differs from joining to other materials. When joining composites to metals many different things have to be considered from making the holes to the materials of the rivets. Recycling and disposal of composite materials is important part of their lifespan. There are no good and economically sufficient recycling methods nowadays. At this day recycling is more expensive than dumping used composite materials to landfills.

## SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO.....	5
2 KOMPOSIITIT .....	6
3 ERILAISET KOMPOSIITTIMATERIAALIT .....	7
3.1 Kuitulujuitetut komposiitit .....	7
3.2 Laminaattikomposiitit .....	9
3.3 Partikkelikomposiitit .....	10
3.4 Kerros- eli sandwich-rakenteet.....	11
3.5 Metallimatriisikomposiitit.....	12
4 KUITULUJITTEISTEN KOMPOSIITTIEIN VALMISTUS.....	14
4.1 Ruiskulaminointi (Spray Lay-up).....	14
4.2 Käsinlaminointi (Wet/Hand Lay-up).....	15
4.3 Tyhjiösäkkimenetelmä (Vacuum Bagging).....	17
4.4 Kuitukelaus (Filament Winding).....	17
4.5 Pultruusio (Pultrusion) .....	19
4.6 RTM-menetelmä (Resin Transfer Moulding) .....	20
4.7 Alipainevalumenetelmä (Other Infusion Processes).....	21
4.8 Prepreg-menetelmä (Prepregs).....	22
4.9 Matalan lämpötilan prepreg-menetelmä (Low Temp Curing Prepregs) .....	23
4.10 Hartsikalvoinjektio (Resin Film Infusion) .....	24
5 TYÖSTÄMINEN.....	25
5.1 Laminaattikomposiittien poraaminen.....	26
5.2 Polymeerimatriisikomposiittien työstäminen.....	27
5.3 Kuitulujuitteisten komposiittien työstäminen .....	27
5.3.1 Ultraäänen hyödyntäminen sorvauksessa.....	32
5.4 Metallimatriisien työstäminen.....	33

5.4.1 Sorvaus .....	34
6 KOMPOSIITTIIEN YHDISTÄMINEN METALLIIN.....	34
6.1 Kuitulujuitteisten komposiittien yhdistäminen .....	35
6.2 Metallimatriisien yhdistäminen.....	36
6.3 Liimaliitokset.....	37
6.3.1 Liimaliitoksen valmistus .....	38
6.3.2 Liimaliitoksen lujuus.....	38
7 UUTUUSTUOTTEITA.....	40
7.1 Tuulivoimalan lavan ydinmateriaali.....	40
7.2 Sähköä varastoiva komposiittimateriaali.....	41
8 KIERRÄTYS.....	42
8.1 Komposiittien kierrätys lentokoneteollisuudessa.....	42
8.2 Tuulivoimalan lapojen kierrätys.....	43
8.3.1 Kierrätysmenetelmiä .....	44
8.3.2 Pyrolyysi.....	45
9 JOHTOPÄÄTÖKSET .....	46
LÄHTEET	

## 1 JOHDANTO

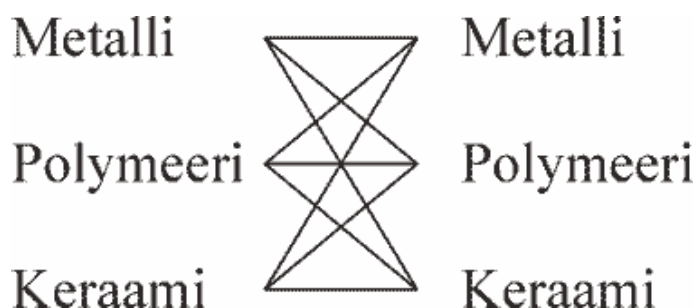
Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on tutustua komposiittien käyttöön tämän päivän koneenrakennuksessa. Työssä kerrotaan millaisia erilaisia komposiittimateriaaleja on olemassa ja millaisia ominaisuuksia niillä on. Työssä keskitytään erityisemmin kuituvahvisteisten komposiittien valmistukseen, työstämiseen sekä eri menetelmiin liittää komposiitteja metalleihin. Työssä kerrotaan myös metallimatriisien työstämisestä ja liittämismenetelmistä metalleihin. Työn loppuvaiheilla käsitellään uutuustuotteita, sekä kerrotaan kuitulujitteisten komposiittien kierrätyksestä. Työssä rajattiin pois puupohjaiset komposiitit sekä keskityttiin enemmän kuitulujitteisiin komposiitteihin. Työn taustalla on ideana saada tietoa hieman tuulivoimalan komposiittisista lavoista.

Komposiittimateriaaleja on tunnettu kautta historian. Ensimmäiset komposiitit keksittiin ennen ajanlaskun alkua, kun sekoitettiin olkia ja savea valmistettaessa tiiliä. Oljet toimivat lujiteaineina ja savi matriisimateriaalina. Modernien komposiittien aikakausi alkaa 1900-luvun alusta, jolloin myönnettiin ensimmäinen patentti muovikomposiittien alalla. Ensimmäinen yritys alkoi myydä lasikuitua 1930-luvulla, minkä jälkeen vuonna 1963 esiteltiin ensimmäiset hiilikuitukomposiitit ja kuuluisa Kevlar-materiaali vuonna 1965.

## 2 KOMPOSIITIT

Komposiitit ovat yhdistelmäateriaaleja, jotka koostuvat kahdesta tai useammasta materiaalista. Yhdistämisen tavoitteena on yhdistää kahden tai useamman eri materiaalin ominaisuudet niin, että tulos on enemmän kuin osiensa summa. Päivittäisessä käytössä on hyvin useita materiaaleja, jotka luokitellaan komposiiteiksi. Tällaisia ovat lujitemuovit, joihin kuuluvat polyesterin tai epoksin ja lasikuidun tai hiilikuidun yhdistelmät, vaahtomuovit sekä puu. Komposiitit luokitellaan kuitulujitettuihin, laminaatti-, ja partikkelikomposiitteihin, mutta myös kerros- eli sandwich rakenteisiin sekä solurakenteisiin. Komposiitit ovat kiinnostavia niiden korkean vahvuuden ja jäykkyyden suhteesta niiden kevyeen painoon nähden. Niitä käytetäänkin näiden ominaisuuksien takia eniten korkeaa suorituskykyä vaativissa rakenteellisissa sovelluksissa. (Tampereen teknillinen yliopisto 2004.)

Komposiittimateriaaleihin ei lasketa vaahtomuoveja, jotka ovat solurakenteisia, sillä yhdistelmä muovi ja ilma on teennäinen. Solurakenteet taas kuuluvat komposiitteihin, sillä niiden mekaaninen käyttäytyminen on perinteisten komposiittien tavoin riippuvainen rakenteen mekaniikasta. Komposiitit voidaan kuitenkin luokitella niissä olevien materiaalien perusteella. Tällöin lujitemuovit ovat muovimatriisikomposiitteja, joissa on keraamisia lujitteita. Kuvassa 1 on havainnollistettu eri mahdollisuuksia yhdistellä materiaaliryhmiä komposiittirakenteissa. (Tampereen teknillinen yliopisto 2004.)



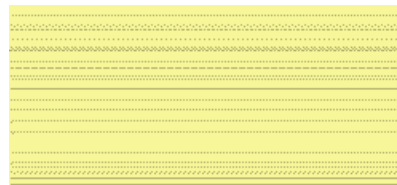
**Kuva 1.** Komposiittimateriaalien mahdollisia materiaaliyhdistelmiä (Tampereen teknillinen yliopisto 2004).

### 3 ERILAISET KOMPOSIITTIMATERIAALIT

Komposiittimateriaaleja on monia erilaisia. Yleisimmin käytettyjä ovat kuitulujuitteiset komposiitit, mutta myös kerroskomposiitit sekä metallimatriisikomposiitit alkavat yleistyä tämän päivän koneenrakennuksessa.

#### 3.1 Kuitulujuitteiset komposiitit

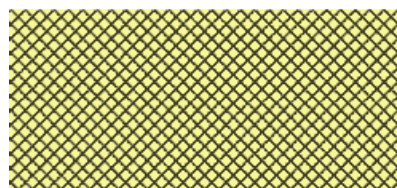
Kuitulujuitteisten komposiittien kuidut voivat olla joko jatkuvakuituisia (a), katkokuituisia (b) tai kudottua mattoa (c), kuten voidaan nähdä kuvasta 2.



(a) Jatkuva kuitu



(b) Katkokuitu



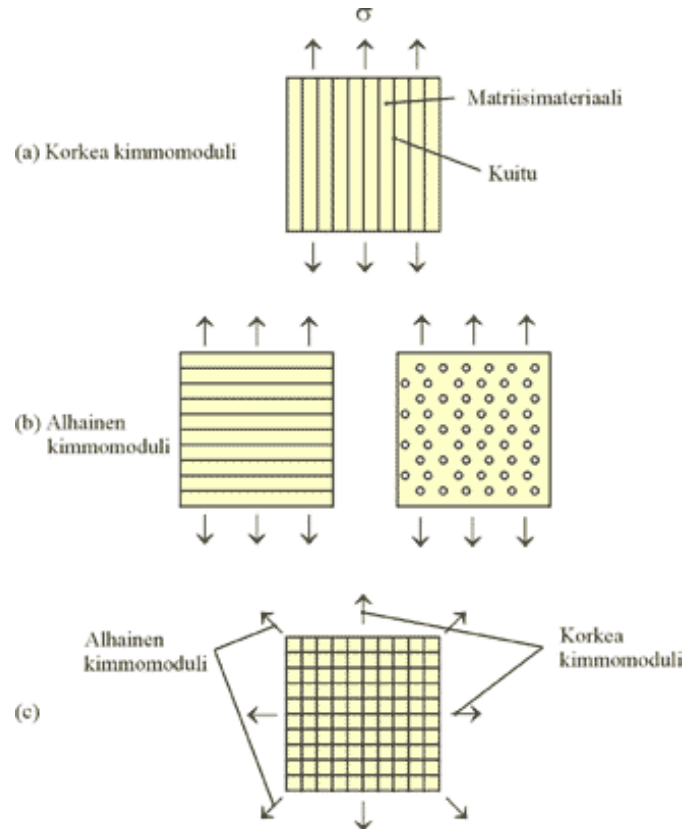
(c) Kudottu matto

**Kuva 2.** Kuitujen eri tyylit komposiitissa (Tampereen teknillinen yliopisto 2004).

Jatkuvalla kuidulla lujitetun komposiitin jäykkyys riippuu siinä olevien kuitujen suuntautumisesta. Kuitulujuituksessa käytetään hyväksi kuitujen hyviä lujuusominaisuuksia ja jäykkyyttä parantamaan matriisi-materiaalin ominaisuuksia. Kun kappaletta vedetään päistä siinä olevien yhdensuuntaisten kuitujen suuntaisesti kuvan 3 a-kohdan mukaisesti, muodostuu poikkileikkauksen jokaiseen kohtaan sama myötymä. Tällöin jännitykset ovat



suuremmat jäykissä ja lujissa kuiduissa, eivätkä niinkään heikommassa matriisissa. Suurin jäykkyys on siis tarkastelusuunnassa. (Tampereen teknillinen yliopisto 2004.)

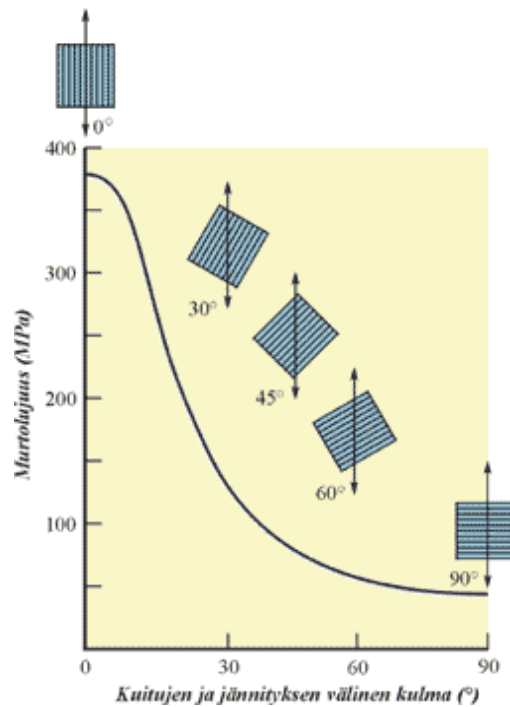


**Kuva 3.** Kuitujen erilaiset suuntautumiset komposiittimateriaalissa (Tampereen teknillinen yliopisto 2004).

Samaa komposiittia kuormitettaessa kuvan 3 b-kohdan mukaisesti kuituja vastaan kohtisuorassa suunnassa on tuloksena aivan erilaiset jäykkyysarvot. Nyt komposiitin poikkileikkauksen joka kohdassa on vakiojännitys, jolloin matriisi venyy kuituja enemmän. Tästä johtuen komposiitilla on alhaisempi jäykkyys kuituja vastaan kohtisuorassa suunnassa. (Tampereen teknillinen yliopisto 2004.)

Kuvassa 3 c-kohdassa on esitetty komposiitti, jossa yhdensuuntaisten kuitujen sijasta on käytetty kudottua mattoa, jossa kuidut kulkevat kahdessa toisiaan vastaan kohtisuorassa suunnassa. Tästä huolimatta kuvasta voidaan edelleen osoittaa matalan ja korkean jäykkyyden suuntia. (Tampereen teknillinen yliopisto 2004.)

Kuvassa 4 on esitetty yhdensuuntaisilla E-lasikuidun lujitetun epoksin lujuuden riippuvuus kuitujen ja kuormituksen välisestä kulmasta. Kuitujen suuntaisesti vedettäessä lujuuden arvo on yli nelinkertainen kuituja vastaan kohtisuorasti vedettäessä. Kuitujen suunnassa kuormat siirtyvät kuitujen kannettavaksi, mutta kohtisuorassa suunnassa kysymys on matriisin lujuudesta. Komposiitin lujuus putoaakin erittäin jyrkästi kuormitussuunnan muuttuessa kuitujen suunnasta. (Tampereen teknillinen yliopisto 2004.)



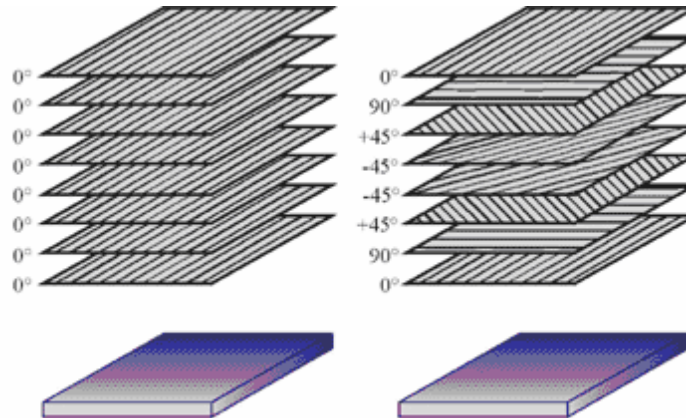
**Kuva 4.** Lujisuuden riippuvuus kuitujen ja kuormituksen välisestä kulmasta. (Tampereen teknillinen yliopisto 2004).

### 3.2 Laminaattikomposiitit

Laminaattikomposiittien ominaisuudet perustuvat moneen eri kerrokseen päällekkäin laitetuista ohuista materiaalikerroksista. Tällä tavalla saadaan komposiitin ominaisuuden hyväksi kahteen suuntaan, mutta ongelmana on lujuus 45°:een kulmassa molempiin kuormitussuuntiin nähden. Tasaiset ominaisuudet kahdessa suunnassa saadaan parhaiten, kun kuidut on suunnattu 45°:een kulmassa toisiinsa nähden. (Tampereen teknillinen yliopisto 2004.)

Kuvassa 5 on esitetty kaksi erilaista ratkaisua laminaattirakenteelle. Vasemmalla kuidut ovat yhdensuuntaisesti, jolloin ominaisuudet levyn tasossa ovat anistrooppiset. Oikealla

kuidut ovat käännettyinä  $45^\circ$  kulmassa edelliseen kerrokseen nähden, jolloin ominaisuudet levyn tasossa ovat isotrooppiset. (Tampereen teknillinen yliopisto 2004.)



**Kuva 5.** Laminaattikomposiitin anistrooppinen ja isotrooppinen rakenne (Tampereen teknillinen yliopisto 2004).

Hyvä jäykkyys pituussuunnassa ja riittävät lujuusominaisuudet poikittaissuunnassa voidaan saada käyttämällä vuorottelevaa ratkaisua. Esimerkkinä lentokoneen lattia, jossa voidaan käyttää vuorottelevia alumiini- ja kevlarilla yksisuuntaisesti lujitettuja polymeerilamelleja. Tutuin ja selkein esimerkki laminaattikomposiittista on vaneri. (Tampereen teknillinen yliopisto 2004.)

### 3.3 Partikkelikomposiitit

Partikkelikomposiittien edut perustuvat matriisimateriaaliin lisättyihin koviin, lujiin sekä jäykkiin partikkeleihin. Tällöin komposiitin ominaisuudet ovat hyvät kaikissa tarkastelusuunnissa. (Tampereen teknillinen yliopisto 2004.)

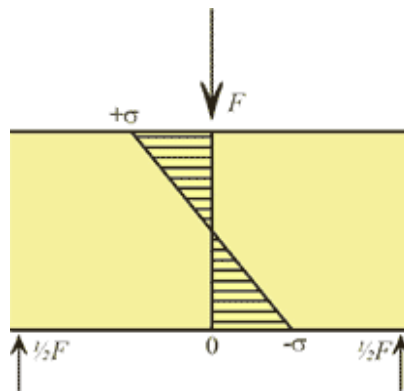
Partikkelikomposiiteissa partikkelit ovat tyypillisesti yhden mikrometrin luokkaa. Tässä tapauksessa partikkelit kantavat suurimman osan partikkelikomposiitteihin kohdistuvasta voimasta. Partikkelikomposiitit on yksinkertaisempi ja halvempi valmistaa, kuin kuitulujitteiset komposiitit. (NDT-Resource Center.)

Partikkelikomposiiteissa käytettävät partikkelit voivat olla keraami- tai lasipartikkeleita, kuten pieniä mineraalipartikkeleita. Partikkelit voivat olla myös metallipartikkeleita, kuten alumiinipartikkeleita, tai amorfisia materiaaleja, kuten polymeerejä tai hiilimustaa. Hiilimustaa käytetään muun muassa autojen renkaiden lujiteaineina. Partikkeleiden

tarkoituksena on kasvattaa matriisimateriaalin kimmomoduulia, vähentää läpäistävyttä sekä vähentää sitkeyttä. Lujiteaineet, eli partikkelit, voivat olla tavallisia halpoja materiaaleja, joita on helppo käsitellä. Eräs yleinen esimerkki partikkelikomposiiteista on auton rengas, jossa on hiilimustaa polyisobuteeni elastomeerisessä polymeerissä. (Farmingdale State Collage 2004.)

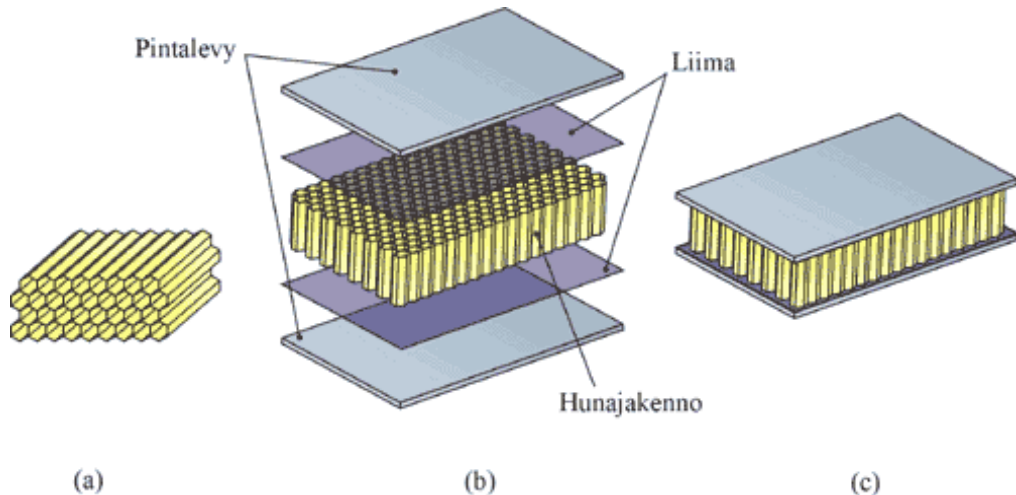
### 3.4 Kerros- eli sandwich-rakenteet

Kerrosrakenteilla pyritään jäykkiin ja kevyisiin rakenteisiin. Kuvassa 6 on taivutuksen alaisen levyn jännitysjaakauma, josta havaitaan, että levyn keskellä jännitys on lähellä nollaa ja suurin jännityksen arvo on ylä- ja alapinnalla levyä. (Tampereen teknillinen yliopisto 2004.)



**Kuva 6.** Taivutuksen alaisen levyn jännitysjaakauma (Tampereen teknillinen yliopisto 2004).

Tämän periaatteen perusteella voidaan saada aikaiseksi kerrosrakennetta hyväksi käyttäen kevyt rakenne, jolla on kuitenkin hyvä jäykkyys ja ominaislujuus. Tässä tapauksessa voidaan käyttää esimerkiksi pintalevyjen välissä hunajakennorakennetta, joka on erittäin kevyt. Yksi tällaisista rakenteista on balsa, joka on molemmin puolin laminoitu lasikuitumatolla ja hartsilla kahden levyn välissä oleva hunajakkeno (kuva 7) kahden teräslevyn välissä oleva villa tai polymeerivaaho. (Tampereen teknillinen yliopisto 2004.)



**Kuva 7.** Kerros- eli sandwich-rakenne (Tampereen teknillinen yliopisto 2004).

### 3.5 Metallimatriisikomposiitit

Metallimatriisikomposiitteja on ollut päivittäisessä käytössä jo jonkin aikaa. Usein ei havaitakaan, että kyseessä on komposiittimateriaali. Koska metallimatriisien yhteydessä voidaan yhdistää metalleja, keraameja ja ei-metallisia materiaaleja, päästään melkein loputtomaan valikoimaan erilaisten vaihtoehtojen saralla. Näiden komposiittimateriaalien ominaisuudet perustuvat niiden yksittäisten komponenttien ominaisuuksiin. (Kainer 2006, s. 1.)

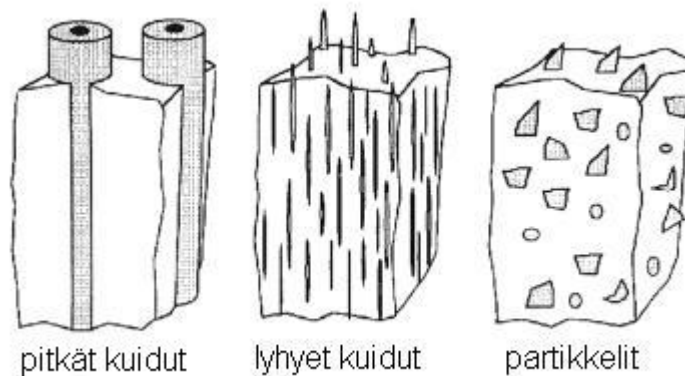
Metallimatriisien lujitemateriaaleilla voi olla monta eri tavoitetta. Kevyiden metallien lujittaminen avaa monta uutta mahdollisuutta näille materiaaleille alueilla, joilla keveys on ratkaisevin tekijä. Tässä tapauksessa tavoitteena on parantaa komponentin ominaisuuksia. Näiden kevyiden metallimatriisikomposiittien valmistuksen tavoitteena onkin (Kainer 2006, s. 2):

- kasvattaa myötörajaa ja vetolujuutta huoneenlämpötilassa tai sen yläpuolella ja samalla säilyttää komposiitin sitkeys
- kasvattaa virumisen kestävyyttä korkeissa lämpötiloissa verrattuna tavanomaisiin metalleihin
- kasvattaa väsymislujuuksia, etenkin korkeissa lämpötiloissa
- parantaa lämpöshokin kestoja
- parantaa korroosionkestoa
- kasvattaa kimmomoduulia
- vähentää lämpölaajenemista ja -pidentymistä

Kohteissa joissa komponentin keveys on tärkeää, saadaankin lujittamisella uusia käyttömahdollisuuksia uusilla alueilla. Voidaan syrjäyttää perinteisiä materiaaleja joillakin alueilla, tai päästään optimoimaan komponenttien ominaisuudet. (Kainer 2006, s. 2.)

Vaikka metallimatriisikomposiittien kehitystyö on lisääntynyt viimeaikoina, ei innovatiivisia, etenkin kevyitä metallimatriiseja ja niiden potentiaalia ole vielä otettu käyttöön oletetulla tavalla. Tämä johtuu niiden puutteellisesta prosessitasapainosta ja luotettavuudesta yhdistettynä valmistus- ja käsittely -ongelmiin sekä huonoon taloudelliseen tehokkuuteen. Esimerkiksi autonvalmistuksessa, joka on erittäin kustannus-suuntautunutta, ei haluta maksaa ylimääräistä tämänkaltaisten materiaalien käytöstä. Näistä syistä johtuen metallimatriisikomposiitit ovat vasta kehityksensä alkupäässä uusien materiaalien saralla. (Kainer 2006, s. 2.)

Metallimatriisikomposiitit voidaan jaotella monella eri tapaa. Yksi menetelmä on jakaa ne lujitemateriaalien mukaan partikkeli- kerros-, kuitulujitteisiin komposiitteihin (kuva 8). Kuitulujitteiset voidaan vielä jakaa jatkuvakuituisiin materiaaleihin ja lyhyisiin kuituihin. (Kainer 2006, s. 2.)



**Kuva 8.** Metallimatriisikomposiittien eri lujitemalleja (mukaillen Kainer 2006, s. 4).

Metallimatriisien lujitemateriaaleilla on moninaisia ominaisuuksia, joita niiltä halutaan. Näitä määrittävät niiden tuotanto ja jalostus, sekä komposiitin matriisimateriaali. Seuraavat vaatimukset ovat yleisesti käyttökelpoisia (Kainer 2006, s. 4–5):

- alhainen tiheys
- mekaaninen yhteensopivuus lämpölaajenemisen kannalta
- kemiallinen yhteensopivuus

- lämpöstabiilisuus
- korkea kimmomoduuli korkea puristus- ja vetolujuus
- hyvä työstettävyys
- taloudellinen hyötysuhde

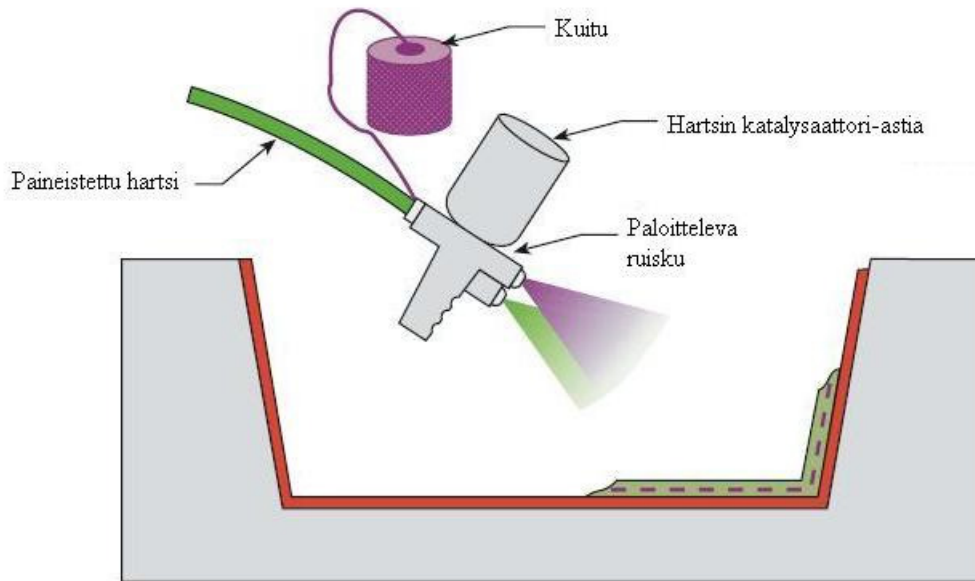
Nämä tavoitteet voidaan saavuttaa vain käyttämällä ei-metallisia epäorgaanisia lujitemateriaaleja. Käytettyjä materiaaleja ovat keraamiset partikkelit, kuidut tai hiilikuidut. Korkeasta tiheydestä ja taipumuksesta reagoida matriisimateriaalin kanssa, metallisten kuitujen käyttö ei ole suositeltavaa. Se mitä lujitemateriaaleja käytetään, riippuu valitusta matriisimateriaalista ja siitä, millaiset vaatimukset käyttökohde asettaa komposiitille. (Kainer 2006, s. 5.)

#### 4 KUITULUJITTEISTEN KOMPOSIITTIEIN VALMISTUS

Komposiittimateriaaleja suunniteltaessa on mahdollisuus valita monista eri vaihtoehdoista hartsit, kuidut sekä ydinmateriaalit, jokainen niiden omilla yksilöllisillä ominaisuuksillaan. Seuraavassa on selvitetty muutamia kuitulujitteisten komposiittien valmistukseen käytettäviä menetelmiä, sekä niiden etuja ja haittoja. (Gurit 2010, s. 47.)

##### 4.1 Ruiskulaminointi (Spray Lay-up)

Kuidut paloittellaan kädessä pidettävässä ruiskussa ja syötetään ruiskutteena katalysoivan hartsin mukana muottiin (kuva 9). Ruiskutettu materiaali annetaan jähmettyä huoneenlämpötilassa. Menetelmällä valmistettavia esimerkituotteita ovat yksinkertaiset kotelot, kevyesti kuormitetut rakennepaneelit, kuten asuntovaunujen seinät, ammeet, suihkulokerot sekä pienet soutuveneet. (Gurit 2010, s. 47.)



**Kuva 9.** Ruiskulaminointi (mukaillen Gurit 2010, s. 47).

Edut (Gurit 2010, s. 47):

- Yleisesti ja laajalti käytetty menetelmä
- Edullinen ja nopea tapa levittää kuidut ja hartsi
- Edulliset työkalut

Haitat (Gurit 2010, s. 47):

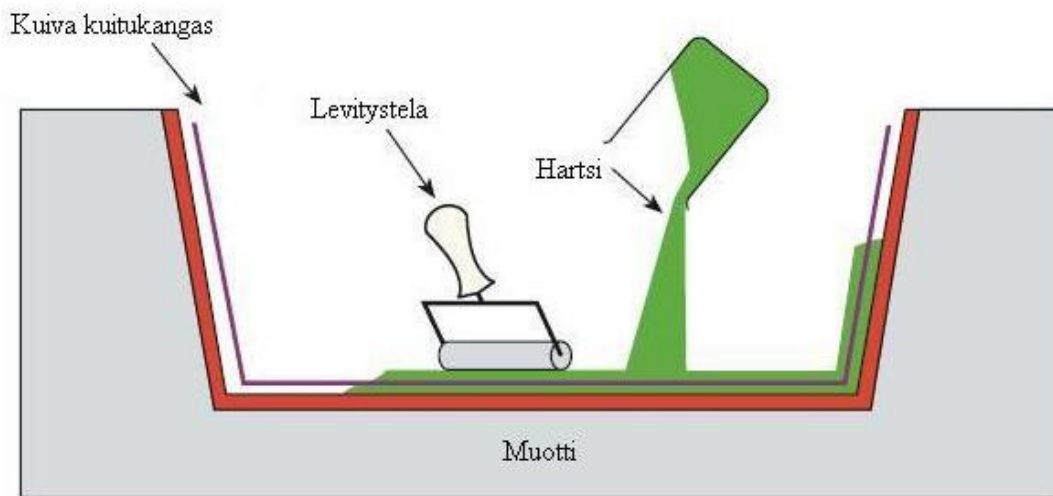
- Laminaatit tulevat sisältämään paljon hartsia ja ovat siten erittäin painavia
- Voidaan käyttää vain lyhyitä kuituja, mikä rajoittaa laminaattien mekaanisia ominaisuuksia
- Hartsien tulee olla matalaviskositeettisiä suihkutettavaksi, mikä vaikuttaa niiden mekaanisiin ja lämpö-ominaisuuksiin
- Suihkutettavien hartsien korkea styreenipitoisuus tekee niistä mahdollisesti haitallisia ja matalan viskositeetin ansiosta vaatteita lävistäviä

#### 4.2 Käsinalaminointi (Wet/Hand Lay-up)

Hartsi levitetään käsivaraisesti muotissa olevien kuitujen päälle, jotka ovat joko kudotussa, neulotussa, ommellussa tai liimatussa muodossa. Levitys tehdään yleisemmin telan tai harjan avulla (kuva 10). Tarkoituksena on saada hartsi tunkeutumaan kuitujen väliin. Laminaattien annetaan kuivua huoneilmassa. Yleisimpiä tuotteita menetelmälle ovat



perinteiset tuulivoimaloiden siivet, sarjatuotantoveneet sekä rakennustaiteelliset kappaleet.  
(Gurit 2010, s. 48.)



**Kuva 10.** Käsineläminointi (mukaillen Gurit 2010, s. 48).

Edut (Gurit 2010, s. 48):

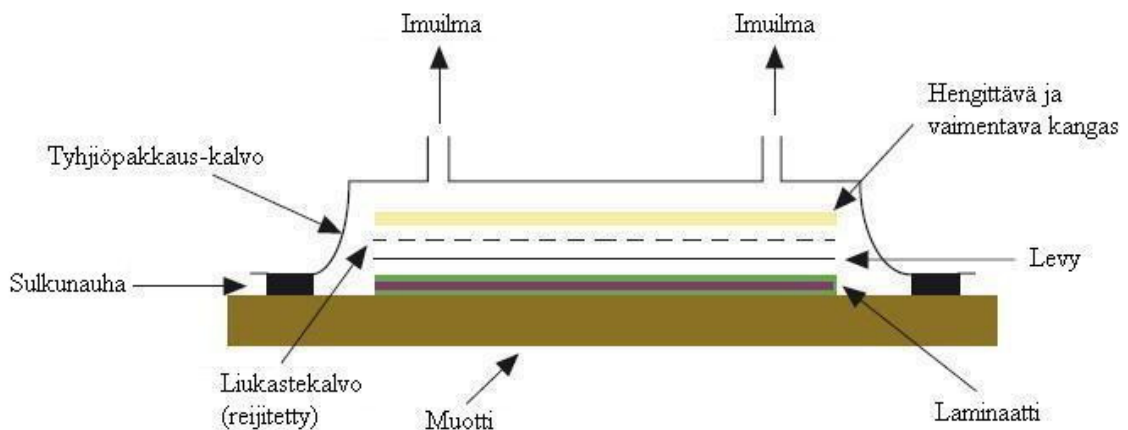
- Yleisesti ja laajalti käytetty menetelmä
- Yksinkertainen prosessi
- Edulliset työkalut, jos laminaattien annetaan kuivua huoneilmassa
- Laaja valikoima eri toimittajia ja materiaaleja
- Voidaan käyttää suurempi määrä ja pidempiä kuituja, kuin ruiskutus-menetelmällä

Haitat (Gurit 2010, s. 48):

- Hartsin sekoitus, hartsin sisältö laminaatissa ja laminaatin laatu ovat riippuvaisia työntekijän taidoista levittää hartsia
- Ei pystytä valmistamaan vähähartsisia laminaatteja
- Hartsin terveys- ja turvallisuusnäkökohdat
- Matalan viskositeetin hartsit vaatteita lävistäviä
- Hartsien korkea styreenipitoisuus ilmassa on haitallista
- Hartsien tulee olla matalaviskositeettisia levitettäväksi käsin, mikä vaikuttaa niiden mekaanisiin ja lämpö-ominaisuuksiin

### 4.3 Tyhjiösäkkimenetelmä (Vacuum Bagging)

Menetelmä on periaatteessa jatkettu malli käsivaraisesta prosessista. Menetelmässä sovelletaan painetta, jonka avulla lujitetaan hartsin imeytymistä ja lujittumista laminaattiin. Muovinen kalvo asetetaan ja tiivistetään märän laminaatin päälle, minkä jälkeen tilasta imetään pois ilma (kuva 11). Menetelmää käytetään muun muassa suurten ainutlaatuisten risteilyveneiden, kilpa-autojen komponenttien sekä veneiden ydinrunkojen valmistukseen. (Gurit 2010, s. 49.)



**Kuva 11.** Tyhjiösäkkimenetelmä (mukaillen Gurit 2010, s. 49).

Edut (Gurit 2010, s. 49):

- Menetelmällä voidaan saavuttaa korkeampi kuitupitoisuus laminaateilla, kuin mitä normaalilla käsivaraisella menetelmällä
- Saavutetaan pienempi määrä ilmakoloja, kuin käsivaraisella menetelmällä
- Hartsin saadaan sekoittumaan kuituihin paremmin paineen avulla
- Käytettävä muovinen kalvo ja tyhjiö vähentävät menetelmän terveyshaittoja

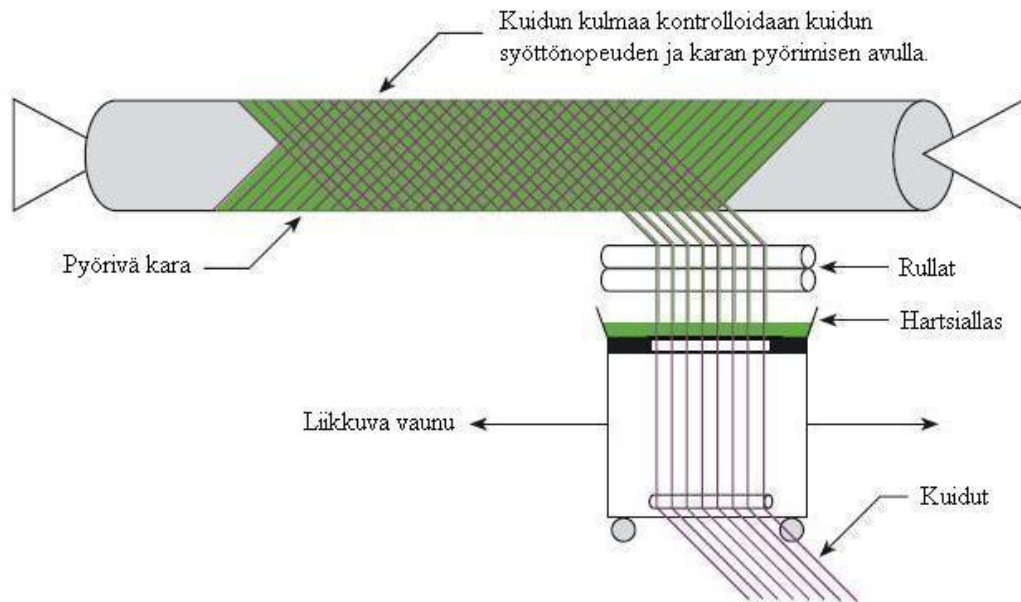
Haitat (Gurit 2010, s. 49):

- Menetelmä vaatii työntekijältä paljon taitoa
- Hartsin sekoitus ja levityksen kontrollointi ovat riippuvaisia työntekijän taidoista

### 4.4 Kuitukelaus (Filament Winding)

Tätä menetelmää käytetään pääasiassa ontoille, ympyränmuotoisille tai ovaaleille kappaleille, kuten putkille ja tankeille. Kuitunauhat kulkevat hartsialtaan läpi ennen niiden

kietomista muotin ympärille, kuten kuvasta 12 nähdään. Kietomista ja kuitujen muodostamaa kuviota kontrolloidaan kuidun syöttönopeuden ja muotin pyörimisen avulla. Tyypillisiä tuotteita menetelmälle ovat kemialliset varastosäiliöt ja putket, kaasupullot sekä palomiesten happipullot. (Gurit 2010, s. 50.)



**Kuva 12.** Kuitukelaus (mukaiillen Gurit 2010, s. 50).

Edut (Gurit 2010, s. 50):

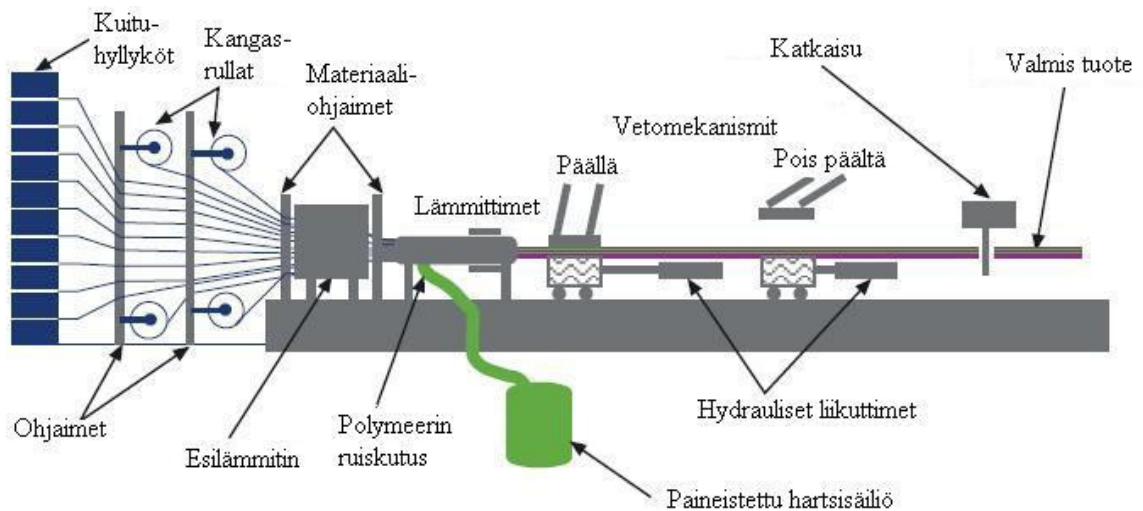
- Voi olla erittäin nopea menetelmä, minkä tähden myös taloudellinen
- Hartsin liittyminen yksittäisiin kuituihin onnistuu helposti
- Kuitujen kustannukset saadaan minimoitua, sillä niitä ei tarvitse erikseen kutoa ennen komposiitin valmistusta
- Laminaatin rakenteelliset ominaisuudet saadaan erittäin hyviksi, sillä pitkät kuidut saadaan asetettua monimutkaisiin kuvioihin vastaamaan kuormien vaikutusta

Haitat (Gurit 2010, s. 50):

- Menetelmää voidaan käyttää vain kuperan muotoisiin komponentteihin
- Kuituja ei saada asetettua karan pituussuuntaisesti
- Muotin kustannukset voivat olla korkeat suurien komponenttien kohdalla
- Valmiin komponentin pinta jää kosmeettisesti rumaksi
- Joudutaan käyttämään matalaviskositeettisiä hartseja, jotka ovat haitallisia terveydelle

#### 4.5 Pultrusio (Pultrusion)

Menetelmässä kuidut vedetään hartsialtaan läpi ja sen jälkeen lämmitetyn muotin läpi (kuva 13). Muotti kontrolloi hartsin määrää sekä luo komposiitille sen viimeisen muodon komposiitin kulkiessa muotin läpi. Kovettunut materiaali leikataan sen jälkeen oikeanpituiseksi kappaleiksi. Menetelmässä voidaan käyttää myös kuitukankaita, jos halutaan kuitujen olevan muussa kulmassa kuin  $0^\circ$ . Vaikka pultrusiossa valmistetaan poikkileikkaukseltaan samankokoisia kappaleita, voidaan poikkileikkaukseen tehdä muutoksia kesken vetoa. Tyypillisiä valmistettavia tuotteita ovat palkit ja kannatinpalkit, joita käytetään kattorakenteissa, siltarakenteissa, tikapuissa sekä kehikoissa. (Gurit 2010, s. 51.)



**Kuva 13.** Pultrusio (mukailten Gurit 2010, s. 51).

Edut (Gurit 2010, s. 51):

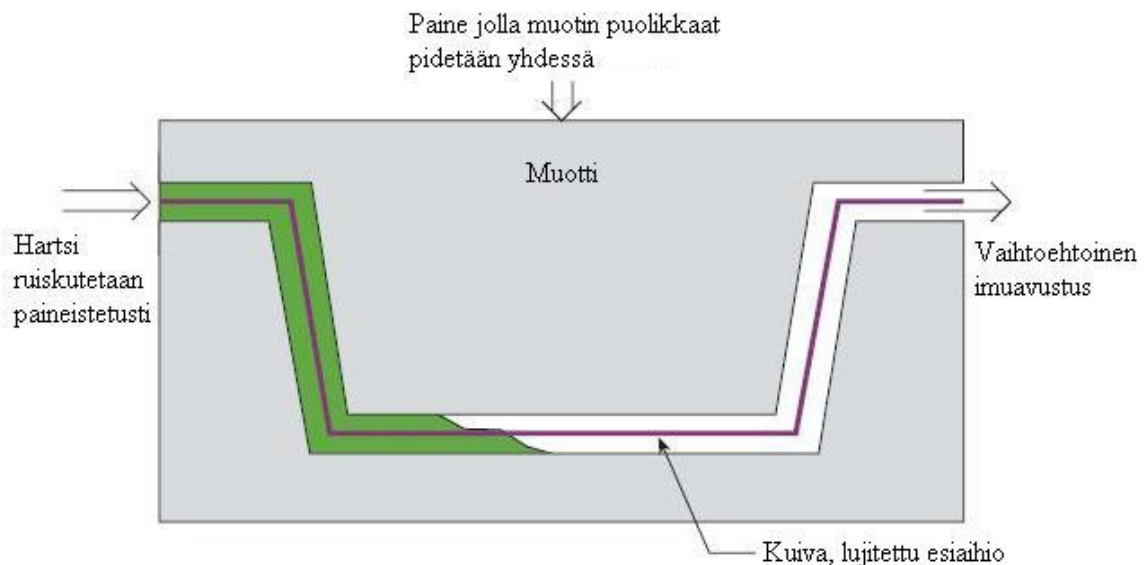
- Menetelmä voi olla erittäin nopea ja siten myös taloudellinen
- Hartsin pitoisuutta voidaan tarkasti säädellä
- Kuitujen kustannukset saadaan minimoitua
- Laminaattien rakenteellisista ominaisuuksista voidaan saada erittäin hyvät, sillä profiileissa on suorat kuidut sekä kuitupitoisuudet voidaan säätää tarkasti
- Hartsien käyttö voidaan suorittaa suljetussa tilassa, joten voidaan välttyä haihtuvilta päästöiltä

Haitat (Gurit 2010, s. 51):

- Rajoittunut poikkileikkaukseltaan samanmuotoisten kappaleiden valmistukseen
- Lämmitettyjen muottien kustannukset voivat olla kalliit

#### 4.6 RTM-menetelmä (Resin Transfer Moulding)

Kuitumatot asetellaan kuivana muottiin sen muotoisesti ja ne pysyvät muotissa sidosaineen avulla. Muotin vastakappale painetaan sen jälkeen alas toista muottia vasten ja hartsi ruiskutetaan aukkoon (kuva 14). Hartsin imeytymiseen kuitumattoihin voidaan auttaa muodostamalla onkaloon tyhjiö. Menetelmän nimi on silloin VARI-menetelmä (Vacuum Assisted Resin Injection). Kun kaikki kuitumatot ovat märkiä hartsista, suljetaan hartsin sisääntuloreiät ja laminaatin annetaan kuivua. Hartsin ruiskutus onkaloon ja sen kuivuminen voidaan suorittaa joko huoneenlämmössä tai kohotetussa lämpötilassa. (Gurit 2010, s. 52.)



**Kuva 14.** RTM-menetelmä (mukaiillen Gurit 2010, s. 52).

Edut (Gurit 2010, s. 52):

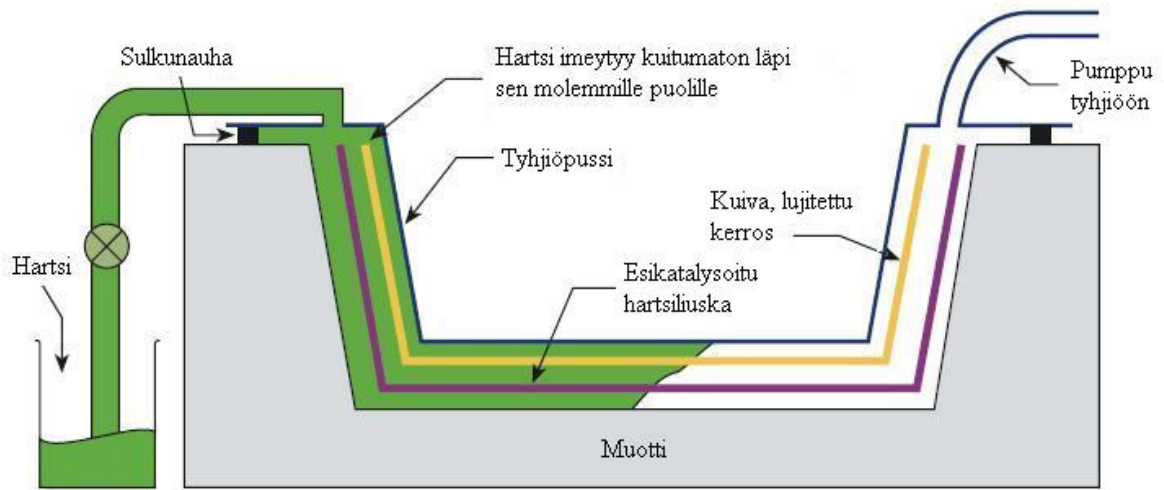
- Menetelmällä voidaan saavuttaa korkea kuitupitoisuus laminaateilla, sekä pieni ilmakolojen määrä komposiitissa
- Hyvät terveys-, turvallisuus- ja ympäristötekijät, sillä menetelmä tapahtuu suljetussa tilassa
- Valmiin komponentin molemmat pinnat saadaan valmistettua muotin avulla

Haitat (Gurit 2010, s. 52):

- Vastaavat muotit ovat kalliita sekä painavia, koska ne joutuvat kestäämään painetta
- Periaatteessa rajoittunut pieniin komponentteihin

#### 4.7 Alipainevalumenetelmä (Other Infusion Processes)

Kankaat laitetaan muottiin kuivana pinona, kuten hartsin siirtymis-muovauksessa. Kuitumatto peitetään sen jälkeen kudotulla kankaalla. Tämän jälkeen koko kuiva pino vakuumpakataan, minkä jälkeen hartsin annetaan virrata laminaattiin (kuva 15). Hartsin jakautuminen tasaisesti laminaattiin onnistuu sen virratessa päälle asetetun kankaan läpi. Tyypillisiä käyttökohteita menetelmälle ovat pienet jahdit, junien ja kuorma-autojen korin paneelit. (Gurit 2010, s. 53.)



**Kuva 15.** Alipainevalumenetelmä (mukailen Gurit 2010, s. 53).

Edut (Gurit 2010, s. 53):

- Paljon matalammat työkalukustannukset, sillä toinen puoli muotista on vakuumpussi, ja päämuotilta vaaditaan vähemmän kestävyttä
- Voidaan valmistaa suuria kappaleita
- Voidaan mahdollisesti käyttää perinteistä käsivaraista menetelmää
- Ydinmateriaalit voidaan valmistaa yhdellä toimenpiteellä

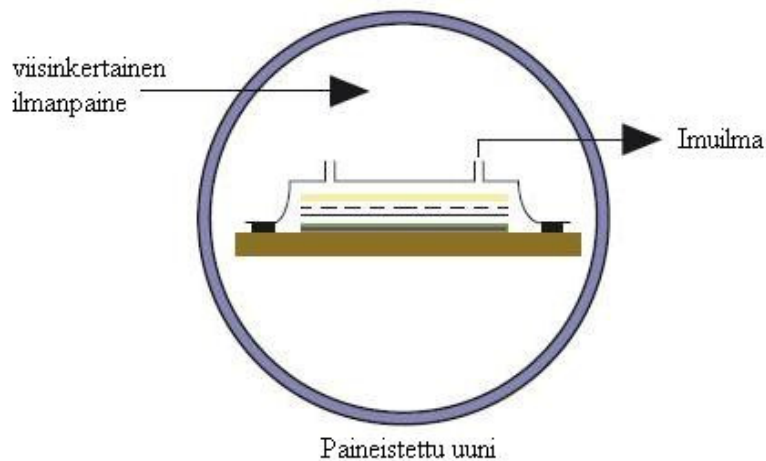
Haitat (Gurit 2010, s. 53):

- Suhteellisen vaikea prosessi suorittaa hyvin
- Hartsien viskositeettien on oltava matala, joten mekaaniset ominaisuudet kärsivät

- Voi ilmentyä hartsittomia alueita, jolloin kallista materiaalia kuluu hukkaan

#### 4.8 Prepreg-menetelmä (Prepregs)

Menetelmässä käytetään kankaita ja kuituja, jotka ovat esikyllästetty hartsilla lämmön, paineen tai liuottimen avulla materiaalin valmistajan toimesta. Varastointiaikaa pidennettäväksi näitä materiaaleja säilytetään jäädytettynä. Nämä esikyllästetyt kuitukankaat asetellaan käsin tai koneistetusti muotin pinnalle, pakataan tyhjiöön ja lämmitetään tyypillisesti 120–180 °C:een. Tämän avulla hartsin liukenee uudelleen ja jäähmettyy myöhemmin. Menetelmän parantamiseksi voidaan käyttää myös paineistettua uunia (kuva 16), jolla voidaan saada jopa viisinkertainen ilmanpaine laminaatille. Menetelmän käyttökohteina ovat lentokoneiden rakenteelliset komponentit, kuten siivet ja pyrstön osat, F1-autot, urheiluvälineet kuten tennismailat sekä sukset. (Gurit 2010, s. 54.)



**Kuva 16.** Prepreg-menetelmä (mukaiillen Gurit 2010, s. 54).

Edut (Gurit 2010, s. 54):

- Hartsin määrä voidaan tarkasti määrittää materiaalin valmistajan taholta. Voidaan täten saavuttaa korkea kuitupitoisuus turvallisesti
- Materiaalilla on erinomaiset terveyst-, turvallisuus- ja puhtausominaisuudet
- Kuitukustannukset on minimoitu yksisuuntaisiin nauhoihin, sillä kuituja ei tarvitse etukäteen muokata kankaiksi
- Hartsin kemialliset ominaisuudet voidaan optimoida mekaanisiin ja lämpötilaominaisuuksiin
- Pidennetyt työajat, jotta voidaan helposti toteuttaa optimaaliset ja monimutkaiset asetelmat

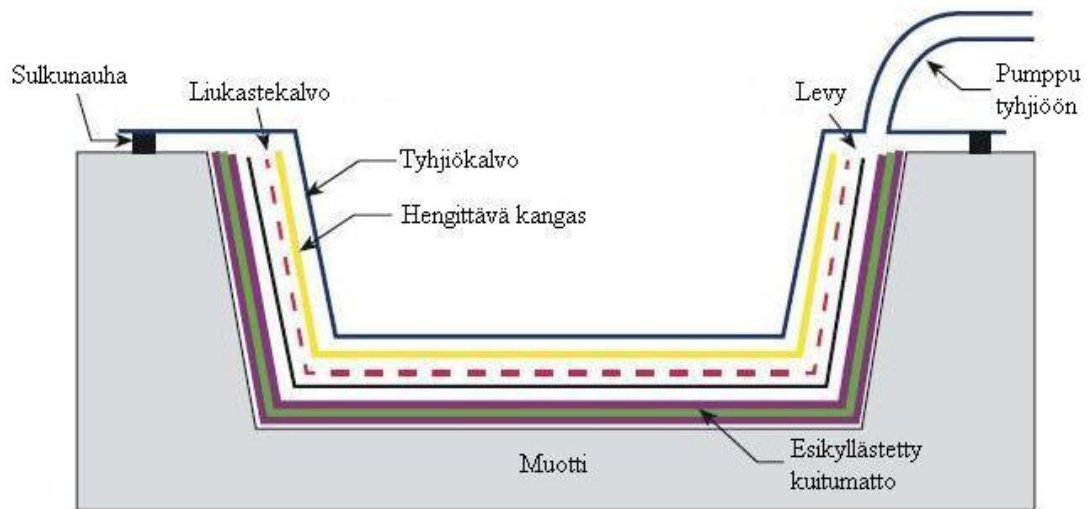
- Mahdolliset automatisoinnit ja työvoiman vähennykset

Haitat (Gurit 2010, s. 54):

- Materiaalikustannukset ovat vielä korkeammat, kuin Prepreg-menetelmän kohdalla
- Tarvitaan yleensä lisäpainoja komponentin kovettamiseen
- Muottien on kestävä prosessin vaatimat lämpötilat
- Komposiitin ydinmateriaalin on kestävä prosessin vaatimat lämpötilat ja paine

#### 4.9 Matalan lämpötilan prepreg-menetelmä (Low Temp Curing Prepregs)

Matalan lämpötilan Prepreg-menetelmä on aivan samanlainen kuin perinteinen Prepreg-menetelmä, mutta hartsin ominaisuudet ovat sellaiset, että se kuivuu lämpötilavälillä 60–120 °C. Hartsin juoksevan ominaisuuden takia voidaan käyttää pelkästään tyhjiöpakkauksen painetta eikä tarvita lisäpainoja. Kuvassa 17 on havainnollistettu menetelmää tarkemmin. (Gurit 2010, s. 55.)



**Kuva 17.** Matalan lämpötilan Prepreg-menetelmä (mukaillen Gurit 2010, s. 55).

Edut (Gurit 2010, s. 55):

- Kaikki samat edut kuin perinteisen Prepreg-menetelmän yhteydessä
- Voidaan käyttää halvempia muotteja matalan käyttölämpötilan takia
- Voidaan valmistaa helposti suuria rakenteita, sillä tarvitaan vain tyhjiöpakkauksen luoma paine, ja lämmittämiseen kelpaa jaettu uuni, eli kappaletta ei tarvitse laittaa kokonaan uuniin
- Voidaan käyttää tavanomaista PVC-vaahtoa ydinmateriaalina



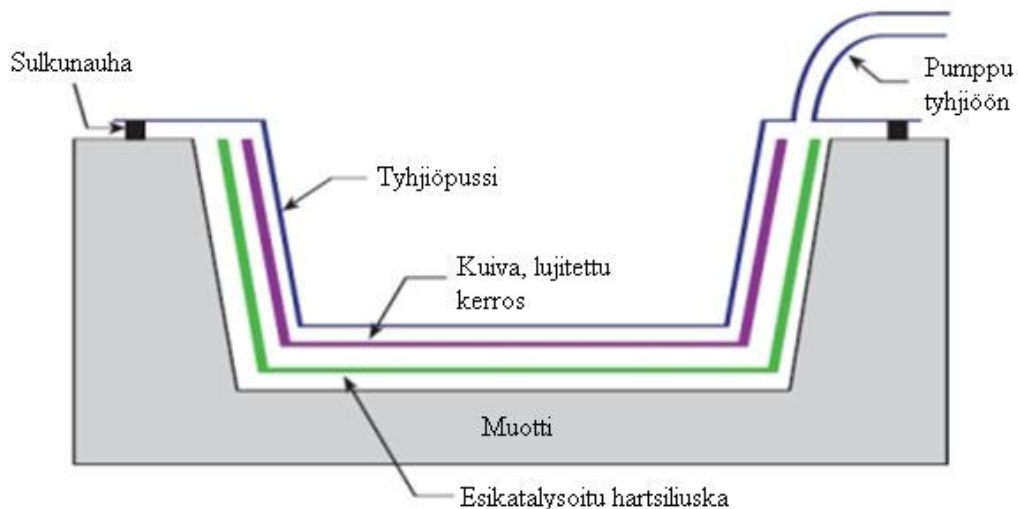
- Matalat energiakustannukset

Haitat (Gurit 2010, s. 55):

- Tarvitsee uunin sekä tyhjiöpakkausmenetelmän
- Muottien on kestävä huoneenlämpötilaa korkeammat lämpötilat, tyypillisesti 60–100 °C
- Ylimääräisiä kustannuksia huoneenlämpötilaa korkeampien lämpötilojen käytöstä

#### 4.10 Hartsikalvoinjektio (Resin Film Infusion)

Kuivat kuitukankaat asetellaan limittäin puolijähmeälle hartsikerroksen päälle. Sen jälkeen asetelma tyhjiöpakataan kalvon alle ja siitä imetään ilma ulos (kuva 18). Seuraavaksi pakkaus lämmitetään, jotta hartsi sulaisi täydellisesti ja virtaisi kuitujen rakoihin, minkä jälkeen sen annetaan jähmettyä. Tyypillisiä valmistuskohteita menetelmälle ovat lentokoneiden suojakuvut sekä sukellusveneiden kaikuluotaimien kuvut. (Gurit 2010, s. 56).



**Kuva 18.** Hartsikalvoinjektio

Edut (Gurit 2010, s. 56):

- Menetelmällä voidaan saavuttaa korkea kuitupitoisuus laminaateilla, sekä pieni ilmakolojen määrä komposiitissa
- Menetelmällä hyvät terveys-, turvallisuus- ja puhtausominaisuudet
- Hartsille korkeat mekaaniset ominaisuudet alun jähmeän muodon ja lämmittämisen takia

- Potentiaalisesti matalammat kustannukset, mutta silti suurin osa eduista, kuin esikyllästetyt-menetelmällä
- Pienempi mahdollisuus kuiville aluille, sillä hartsi kulkee kankaan läpi

Haitat (Gurit 2010, s. 56):

- Ei laajassa käytössä, muuten kuin ilmailu- ja avaruusteollisuudessa
- Tarvitsee uunin sekä tyhjiöpakkausmenetelmän
- Muottien tulee kestää prosessin lämpötilat
- Komposiitin ydinmateriaalin on kestävä prosessin vaatimat lämpötilat

## 5 TYÖSTÄMINEN

Komposiitit tuovat koneensuunnittelulle uusia mahdollisuuksia tuottaa uudenlaisia tuotteita verrattuna metalleihin. Komposiittien työstäminen on kuitenkin vaikeaa. Tämä johtuu niiden epähomogeenisesta ja anistrooppisesta laadusta ja niiden sisältävien lujitteiden korkeasta abrasiivisesta vaikutuksesta. Komposiittiin voi työstämisen aikana tulla suuriakin vaurioita ja työkalut voivat kulua normaalia enemmän. Tavanomaisia työstömenetelmiä, kuten sorvausta, porausta ja jyrsimistä käytetään komposiittien työstämiseen, sillä ne ovat yleisiä työstömenetelmiä ja niistä on paljon kokemusta. Jotkut materiaalit joita käytetään komposiittien vahvistamiseen, kuten lasi, grafiitti, boori, alumiinioksidi ja piikarbidi ovat erittäin abrasiivisia ja kovia, joskus jopa yhtä kovia tai kovempia kuin työkalun materiaali. Kuitenkin komposiiteille voidaan käyttää normaaleja edellä mainittuja työstömenetelmiä, sillä lujitemateriaalit ovat hauraita ja materiaalin irtautuminen tapahtuu haurasmurtumalla, eikä niinkään plastisella muodonmuutoksella työkalun edellä. Työkalun materiaali onkin valittava huolellisesti, jotta työkalun kulumisen saadaan minimoitua lujitemateriaalin kovien kuluttavien ainesosien takia. (Teti 2002, s. 611.)

Komposiittien työstäminen riippuu matriisimateriaalin ominaisuuksista, lujitemateriaalin ominaisuuksista sekä lujitemateriaalin suhteellisesta pitoisuudesta matriisimateriaalissa. Oikean työstömenetelmän valinta on riippuvainen suoritettavan työstön laadusta,

kappaleen geometriasta ja koosta, lopputuloksen ja tarkkuuden vaatimuksista, sekä työstettävien kappaleiden määrästä. Työstömenetelmän valintaan vaikuttavat lisäksi myös kappaleen monimuotoisuus ja materiaali, käytössä olevat koneet ja työkalut, valmistusaikataulu, pääomavaatimukset, turvallisuusnäkökulmat sekä kokonaiskustannukset. (Teti 2002, s. 611.)

Komposiittimateriaalin työstäminen eroaa merkittävästi perinteisestä metallien ja niiden seosten työstämisestä. Työkalu kohtaa työstön aikana matriisimateriaalin sekä lujitemateriaalin, joiden ominaisuudet voivat olla aivan erilaiset, ja siten luoda erilaisen reaktion työkalulle. Tästä johtuen komposiittien työstäminen vaatii erityistä huomiota terän geometrian ja kulumiskestävyyden suhteen. Näin ollen työkalun kulumisen muoto ja sen kehittyminen on otettava tarkasti huomioon muodostettaessa oikeaa terävalintaa. (Teti 2002, s. 611.)

#### 5.1 Laminaattikomposiittien poraaminen

Laminaattikomposiittien työstämisessä on muutamia ongelmakohtia. Laminaattikomposiitit ovat erittäin kestäviä kohtisuorasti vaikuttaville voimille ja niillä on alhainen delaminaation kestävyys. Näillä komposiiteilla onkin suuri taipumus delaminoitua eli eri materiaalikerrokset voivat irrota toisistaan tai kuidut voivat irrota matriisimateriaalista. Delaminaatio muodostuu, kun porauksen yhteydessä poranterää painava voima ylittää tietyn kynnyksarvon. Yksi keino näiden ongelmien ehkäisyyn poraamisen yhteydessä on työstövoimien muuttaminen kesken työstöä porattavan kohdan ohentuessa. Delaminaation muodostuminen onkin yhteydessä työstöparametreihin ja komposiitin ominaisuuksiin. (Dharan & Won 2000, s. 415.)

Delaminoitumista komposiitissa porauksen yhteydessä voi tapahtua sekä poran ulostulon että sisään menon yhteydessä. Ulostulon yhteydessä tapahtuva delaminaatio on purseiden työntymistä ulos, ja sisään menon yhteydessä kuoriutumista ylöspäin. (Dharan & Won 2000, s. 416.)

Porauksen yhteydessä muodostuu aina voima, joka työntää komposiittimateriaalin sisällä laminaatteja ja kuituja muodostuvan reiän ulkokehälle. Poran lähestyessä kappaleen loppua poraamaton osuus ohenee, jolloin vastus muodonmuutokselle vähenee. Jossain kohtaa

voima ylittää laminaattien sisäisen sidoslujouden, jolloin tapahtuu delaminoitumista. (Dharan & Won 2000, s. 417.)

Alkuvaiheessa porausta terän kärki hankaa laminaattia. Seuraavaksi liikkuaan syvemmälle komposiittiin poranterä vetää materiaalia ylöspäin pitkin muodostunutta reikää. Leikkautunut materiaali tällöin kulkeutuu ylöspäin ennen kuin se on kokonaan työstetty irti. Tästä aiheutuu kuoriva voima ylöspäin, joka erottaa ylempiä laminaatteja poraamattomasta osasta. (Dharan & Won 2000, s. 417.)

### 5.2 Polymeerimatriisikomposiittien työstäminen

Polymeerimatriisikomposiitit koostuvat yleisimmin lujiteaineista, jotka ovat vahvoja ja hauraita kuituja ja matriisimateriaalista, joka on yleensä pehmeää ja sitkeää. Tässä tapauksessa kyseessä on kuitulujitteiset muovit. Kuidut voivat olla pitkiä eli jatkuvia tai lyhyitä eli epäjatkuvia. Pitkät kuidut voivat taas olla kaikki yhdensuuntaisesti tai ne voivat olla kudottuna kankaaksi tai verkoksi. Yksisuuntaiset kuidut takaavat näissä komposiiteissa parhaimmat mekaaniset ominaisuudet. Lasikuitumuovit ovat yleisimpiä ottaen huomioon niiden korkeat mekaaniset ominaisuudet. Hiilikuitu- ja aramidikuitulujitteiset komposiitit taas omaavat korkeammat ominaislujuudet, ominaisjäykkyydet sekä kevyemmän painon. Ne ovat kuitenkin paljon kalliimpia ja niitä käytetäänkin vain paikoissa, joissa suorituskyky menee kustannusten edelle. Aramidikuitulujitteisiä komposiitteja käytetään hiilikuitulujitteisten sijasta paikoissa, joissa lujuus, keveys ja sitkeys ovat tärkeitä näkökohtia, ja joissa jäykkyys ja korkea lämpötilankestävyys taas eivät ole. (Teti 2002, s. 612.)

### 5.3 Kuitulujitteisten komposiittien työstäminen

Sorvaus, poraus, jrsintä sekä sahaus kuuluvat kuitulujitteisten komposiittien tärkeimpiin työstömenetelmiin. Sorvaus eroaa jrsinnästä ja sahauksesta suurimmaksi osaksi sen takia, että työkalun leikkaava pinta on koko ajan kosketuksissa työstettävään materiaaliin. Kuitujen ja matriisimateriaalin vaikutukset terään työstön aikana muodostavat työstöstä kuitenkin lähes jatkuvaa. (Teti 2002, s. 614.)

Kuitulujitteisten komposiittien työstämiseen vaikuttavat suurimmaksi osaksi kuitujen ja matriisimateriaalin fysikaaliset ominaisuudet, mutta myös kuitujen suuntautuneisuus ja

tilavuusosuus. Lasi- ja hiilikuidut katkeavat haurasmurtumalla taivutettaessa, mutta aramidikuidut leikkautuvat murtumalla taivutettaessa ja repeytyvät vetolujuuden alaisina. Lyhytkuituisten komposiittien työstäminen taas on paljon helpompaa kuin pitkiä yhdensuuntaisia kuituja sisältävien komposiittien. Vaikka kuitulujitteisten komposiittien työstämisestä ei yleensä suositella, ei siltä kuitenkaan voida välttyä, jos halutaan muokata kappale lopulliseen muotoonsa, viimeistellä tuotteen pintaa tai päästä tavanomaisesti tuotettujen kappaleiden mittatarkkuuteen. Sorvausta käytetään pyörähdyssymmetristen kappaleiden, kuten laakerien, karojen, akseleiden tai rullien, valmistukseen. (Teti 2002, s. 614.)

Sorvauksen aikana voi teräpalaan kohdistua eri kulumismuotoja, kuten abraasiota, adheesiota, hapettumista ja teräpalan pinnan vaurioita. Kuitulujitteisten komposiittien sorvauksessa kuitenkin yleisimmät kulumismuodot ovat abraasio, teräpalan pinnan vauriot sekä joissain tapauksissa adheesio. Teräpalan kulumisen johtuu suurimmaksi osaksi kuitujen fysikaalisista ja mekaanisista ominaisuuksista. Lasi- ja hiilikuidut kuluttavat teräpalaa enimmäkseen abrasiivisesti, koska ne ovat erittäin abrasiivisia luonteeltaan. Aramidikuidut sen sijaan huonontavat teräpalaa niiden huonon lämmönjohtavuuden ja venyvän/mukautuvan luonteensa takia. Adhesiivista kulumista voidaan havaita, kun hiiltyneitä partikkeleja tai sulaa matriisimateriaalia asettuu työkalun pinnalle. (Teti 2002, s. 614.)

Kuitulujitteisten komposiittien työstäminen valmistuksen jälkeen on hyvinkin yleistä. Yksi esimerkki automatisoiduista keinoista on vesisuihkuleikkaus, mutta perinteisiä menetelmiä, jotka eivät ole niinkään automatisoituja, käytetään myös paljon. Taulukossa 1, joka jatkuu seuraavalla sivulla, on esitetty kuitulujitteisten komposiittien työstämiseen muutamia perusneuvoja. (Beckwith 2009, s. 1.)

*Taulukko 1. Perusohjeita kuitulujitteisten komposiittien työstämiseen. (Beckwith 2009, s. 1).*

Huomioitava asia	Ratkaisu
Työkalun terävyys	Kaikki työstö-, poraus ja leikkaustyökalut on pidettävä terävinä, jotta voidaan vähentää kulumista, pistesyöpymistä ja delaminaatiota.

*Taulukko 1 jatkuu. Perusohjeita kuitulujitteisten komposiittien työstämiseen. (Beckwith 2009, s. 1).*

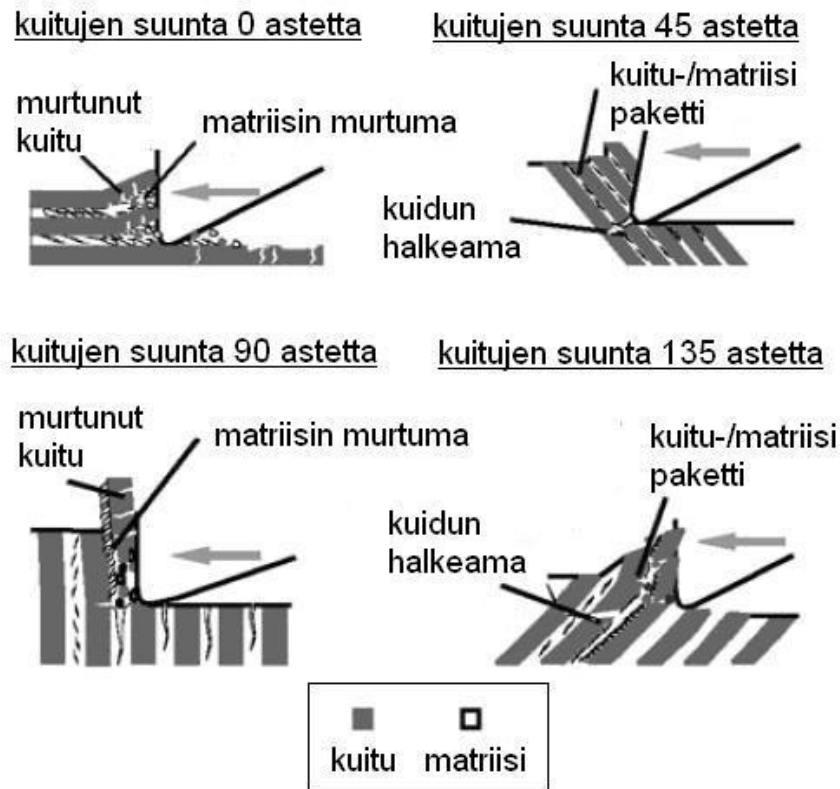
<b>Huomioitava asia</b>	<b>Ratkaisu</b>
Lastuamismesteen käyttö	Vähentää lämmön kehittymistä, kontrolloi pölyä ja minimoi hiukkasten aiheuttamia ongelmia
Ylikuumentuminen	Ylikuumentuminen aiheuttaa mahdollisesti vahinkoja, kuten kuitujen tai hartsin mikrohajoamista, delaminaatiota reunojen yhteydessä, matriisimateriaalin mekaanisten ominaisuuksien huononemista tai kosmeettisia väri vaihteluita.
Pölyäminen	Kuitupöly on aina kerättävä jollain menetelmällä kuivatyöstössä.
Sähkökomponenttien suojaaminen	CNC-työstökoneiden sähkömoottorit, tietokoneohjausjärjestelmät ja muut sähköiset laitteet on suojattava hiilikuitupölyltä. Hiilikuitu on erittäin sähköjohtavaa. Hiilikuitupöly on myös ei-toivottua maalauspuisteiden luona.
Työstönopeus ja syötön arvot	Työstönopeus, porausarvot ja syötön arvot valitaan oikein työstettävän materiaalin suhteen. Aramidikuitulujitteiset käyttäytyvät aivan eri tavalla kuin lasi- tai hiilikuitulujitteiset.

Perinteisiä allotettuja teriä käytetään myös kuitulujitteisten komposiittien viimeistelyyn. Nämä ovat pikateräs- ja karbidityökaluja, jotka ovat yleisiä ja joita käytetään usein työstämiseen. Kovametalli ja mieluiten yksikiteiset teräpalat ovat suositeltuja, kun halutaan työstää lasikuitukomposiitteja. Kuitenkin monikiteiset timanttityökalut ovat enemmän suositeltuja, koska ne kuluvat vähemmän kuin pikaterästyökalut. Taulukosta 2 nähdään joitakin suositeltuja parametrejä monikiteisille timanttityökaluille. (Beckwith 2009, s. 1.)

Taulukko 2. Suositeltuja työstöparametreja lasi-, hiili- ja graphitekuitukomposiiteille (Beckwith 2009, s. 1).

Työstöparametri	Lasikuitukomposiitti	Hiili- tai grafiittikuitukomposiitti
Nirkonsäde (mm)	0.76 - 2.29	0.51-1.02
Sivupäästökulma (astetta)	5-20	5-20
Rintakulma (astetta)	0-5	0-5
Nopeus (kierrosta/min)	400-3600	500-2000
Leikkaussyvyys (mm)	0.25 ja suurempi	0.03 ja suurempi
Syöttö (mm/rad)	0.03-0.25	0.13-0.38

Kuitulujitteisia komposiitteja työstettäessä on hyvä tietää mihin suuntaan työkaluun nähden kuidut kulkevat materiaalissa. Kun kuidut ovat 0 asteessa työkaluun nähden (kuva 19), kohdistuu laminaattiin ja kuituihin kohtisuora voima. Samalla terän alapuolelle jäävään materiaaliin kohdistuu painava voima. Tässä tapauksessa materiaaliin tulevat ongelmat terän etupuolelle ovat delaminaatio, matriisimateriaalin murtuminen tai kuitujen ja matriisimateriaalin irtoaminen toisistaan. Työkalun kulman muuttuessa 45 asteeseen, joutuvat kuidut enemmän painavan voiman alaisiksi, jolloin ne taipuvat ja voivat katketa. Tämä voi johtaa työstämättömän, komposiitin sisällä olevien kuitujen, katkeamiseen. Työstettäessä kuitulujitteisia komposiitteja huonoimmat kuitujen suunnat työkaluun nähden ovatkin 30 – 60 asteen välillä. Tällöin pinnanlaadusta tulee huono. Kun työkalun ja kuitujen kohtaamiskulma on 90 astetta, taipuvat kuidut ja repeävät irti. Aikaisempaan 0 asteen kulmaan verrattuna jokainen kuitu leikataan erikseen irti. Myös tässä voi ongelmia esiintyä työstämättömällä alueella, komposiitin sisällä, matriisin murtumisena. Paremmat olosuhteet saadaan 135 asteen kulmassa. Kuituihin kohdistuu tällöin taivuttava ja venyttävä voima, ja kuidut voivat katkeilla nippuina. Ongelmia voi tuottaa kuitujen tulo ulos materiaalista liian vähäisestä matriisimateriaaliin kiinnittymisen ansiosta. (Teti 2002, s. 613.)



**Kuva 19.** Leikkausmekanismit kuitulujitteisille komposiiteille (mukaillen Teti 2002, s. 614).

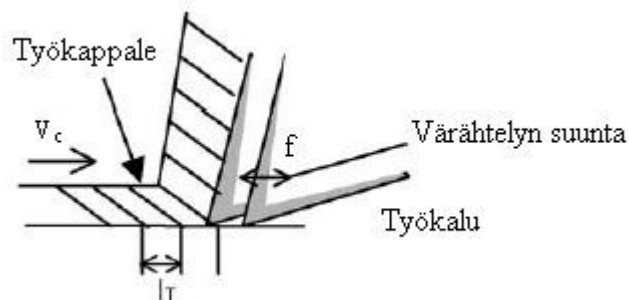
Työkalun materiaalin ja geometrian oikeanlaisella valinnalla saavutetaan erinomaisia sorvaustuloksia. Lasikuitukomposiittia ja hiilikuitukomposiittia sorvattaessa timanttipäällysteisillä työkaluilla yleisimmät terän kulumismuodot ovat leikkaussärmän tylsistyminen, päällystemateriaalin poiskuluminen, leikkaussärmän vetäytyminen ja kuoppakuluminen. Työkappaleen pinnanlaadun lopputulos riippuu erittäin paljon syötöstä ja teräpalasta. Voimakkaimmat teräpalan kulumismuodot ovat kuitulujitteisia komposiitteja sorvattaessa viistekuluminen, sekä leikkaussärmän vetäytyminen ja pyöristyminen. Terän kulumisen nopeus riippuu komposiitin kuitujen laadusta. Kuoppakulumista taas ei esiinny niinkään paljoa ja se johtuu suurimmaksi osaksi epäyhtenäisestä lastunmuodostumisesta sorvauksen aikana. Tästä johtuen säröt teräpalan pinnalla ovat harvinaisia, mutta säröt teräpalan kyljessä ovat yleisiä. Valittaessa suuri päästökulma voidaan pidentää teräpalan ikää, mikä kuitenkin johtaa teräpalan heikkenemiseen, mikä voi edistää särmän lohkeilua. Joka teräpalalle tuleekin määrittää oma päästökulma. (Teti 2002, s. 614.)



Työkalun kuluminen hiilikuitulujitteisia komposiitteja sorvattaessa eroaa merkittävästi lasikuitulujitteisten komposiittien sorvauksesta. Hiilikuitulujitteisia komposiitteja sorvattaessa työkalun tasaisempi kuluminen, verrattuna leikkuunopeuteen, on vähäisempi kuin lasikuitulujitteisilla komposiiteilla, koska hiilikuidut johtavat hyvin lämpöä, mikä johtaa alhaisempaan työstölämpötilaan. Tästä johtuen hiilikuitulujitteisille komposiiteille voidaan käyttää suurempia leikkuunopeuksia, kuin lasikuitulujitteisille komposiiteille. (Teti 2002, s. 615.)

### 5.3.1 Ultraäänien hyödyntäminen sorvauksessa

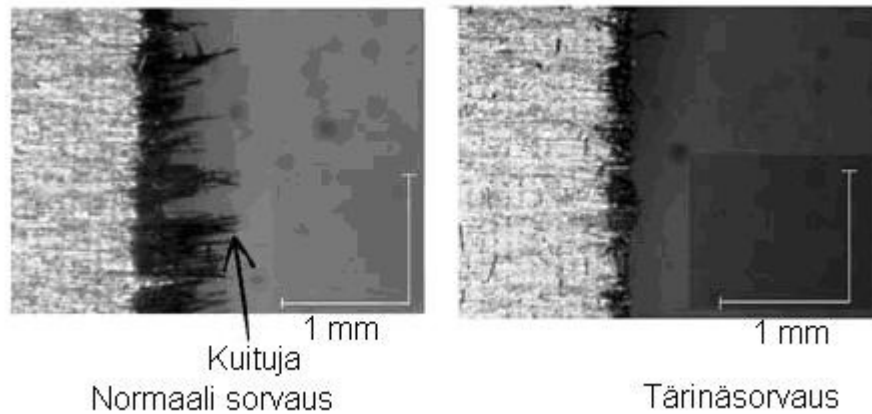
Teräpalassa tapahtuvat lämpötilakuormitukset ovat suoraan verrannolliset leikkuunopeuteen. Timanttipeällysteisen teräpalan suuren lämmönjohtavuuden ansiosta voidaan toimia suuremmissa työstölämpötiloissa, minkä ansiosta voidaan käyttää suurempia leikkuunopeuksia. Koska hiilikuitulujitteisia komposiitteja on vaikea työstää tehokkaasti, voidaan niiden työstämisen apuna käyttää ultraäänistä värähtelyä. Ultraääninen värähtely auttaa pääsemään työkappaleen parempaan pinnanlaatuun, kun kyseessä on vaikeasti työstettävät materiaalit. Ultraäänisen värähtelyn hyödyntäminen perustuu siihen, että teräpalan yläpinta ei ole koko aikaa kosketuksissa muodostuviin lastuihin (kuva 20). Leikkuunopeus ei kuitenkaan saa ylittää värähtelynopeutta, sillä silloin teräpalan yläpinta ja lastu ovat kosketuksissa koko ajan. (Teti 2002, s. 616.)



**Kuva 20.** Ultraäänisorvauksen periaatekuva.  $v_c$  = leikkausnopeus,  $f$  = värähtelyn taajuus,  $l_T$  = leikkuuetäisyys yhden värähtelyperiodin aikana. (Teti 2002, s. 616.)

Ultraäänisen värähtelyn tehokkuus perustuu voimakkaasti leikkausetäisyyteen yhden värähtelyperiodin aikana. Yhden periodin täytyy olla pienempi, kuin kuidun halkaisija, jotta menetelmää voidaan hyödyntää tehokkaasti. Kun käytetään pienempää värähtelyperiodia kuin kuidun halkaisija, voidaan matriisimateriaali ja kuidut katkaista erikseen. Tästä seuraa ettei kuidut estä matriisimateriaalin leikkausta, mikä johtaa

parempaan pinnanlaatuun jopa terän ollessa 90 asteen kulmassa kuituihin nähden. Kuvasta 21 voidaan nähdä normaalin sorvauksen ja ultraäänivusteisen sorvauksen pinnanlaatujen eroja. (Teti 2002, s. 616.)



**Kuva 21.** Mikroskooppikuva normaalista sekä ultraäänisestä sorvausjäljestä kuitujen ollessa 90 asteen kulmassa terään nähden (mukaiillen Teti 2002, s. 617).

#### 5.4 Metallimatriisien työstäminen

Metallimatriisikomposiitteja käytetään paikoissa, jotka sisältävät korkeampia lämpötiloja, kuin mitä polymeerimatriisikomposiitit kestäisivät. Suurin osa näistä komposiiteista valmistetaan ilmailu- ja avaruusteollisuudelle, mutta myös autoteollisuus käyttää nykypäivänä näitä muun muassa moottorin osien valmistuksessa. Komposiittien kuidut voivat olla joko jatkuvia tai epäjatkuvia, tai ne voivat koostua partikkeleista. Jatkuvien kuitujen avulla lujitetuista metallimatriisikomposiiteista saadaan korkeimmat jäykkyyks- ja lujuusominaisuudet. (Teti 2002, s. 612.)

Myöhemmin käyttöön tulleita lujitemateriaaleja metallimatriisikomposiiteille partikkeliin, lyhyiden kuitujen ja pitkien kuitujen muodossa ovat piikarbidi, alumiinioksidi ja grafiitti. Alumiini-, magnesium- ja titaaniseokset ovat yleisimpiä käytössä olevia matriisimateriaaleja metallimatriisikomposiiteissa. (Teti 2002, s. 612.)

Metallimatriisikomposiittien työstämisen suurin ongelma on suuri työkalun kuluminen. Se saattaa johtaa joissakin tapauksissa epätaloudelliseen tilanteeseen tai voi tehdä työstämisestä mahdotonta. Työkalun suuri kuluminen johtuu erittäin kovista ja hiovista lujitemateriaaleista. Suurin syy tähän on työkalun terän suora kontakti lujitepartikkeliin ja

–kuitujen kanssa, mikä aiheutuu sekä mekaanisesta vaikutuksesta että lämpötilan vaikutuksesta. Suurin kulumismekanismi on abraasio, joka johtuu terään kohdistuvista iskuista sekä partikkelien liukuvasta liikkeestä kaltevuuskulmaan ja päästökulmaan nähden. Lämpötilan vaikutus terän kulumiseen johtuu kuumista kohdista, jotka muodostuvat mikroskooppisen pienistä terän ja lujitemateriaalin kohtaamisista. (Teti 2002, s. 624.)

#### 5.4.1 Sorvaus

Metallimatriisikomposiitteja sorvattaessa päästään pienimpään teräpalan kulumiseen timattiteräpaloilla. Lisäksi karbidi- ja timattiterillä sorvattaessa teräpalan kuluminen ei ole riippuvainen leikkuunopeudesta, toisin kuin keraamisilla työkaluilla kuluminen kasvaa leikkuunopeuden kasvaessa. Tämä tapahtuma ilmenee vain tapauksissa, jossa työstettävä materiaali sisältää piikarbideja, joten muissa tapauksissa keraamisten työkalujen kuluminen on riippumaton leikkuunopeudesta. Leikkuunesteen käyttö ei vaikuta myöskään teräpalan kulumiseen. Syötön muuttamisella ei ole vaikutusta terän kulumiselle, toisin kuin leikkuupituudella suhteellisesti. Edellisten kohtien perusteella voidaan päätellä metallimatriisien sorvauksessa terän kulumisen johtuvan vain mekaanisesta abrasiivisesta kulumisesta. (Teti 2002, s. 626.)

## 6 KOMPOSIITTIEIN YHDISTÄMINEN METALLIIN

Komposiittien yhdistämiseen metalleihin käytetään mekaanisia kiinnikkeitä, liimoja tai molempien yhdistelmiä. Tiettyjen komposiittien yhdistämiseen käytettävä yhdistämistekniikka riippuu erityisesti kyseessä olevasta sovelluksesta ja materiaalien koostumuksesta. Esimerkiksi lentokoneiteollisuudessa komposiitit liitetään metalleihin yleensä käyttäen mekaanisia kiinnikkeitä ja liimoja, kun taas autoteollisuudessa komposiitit yhdistetään metalleihin yleensä käyttämällä vain liimoja. (Machine Design 2002.)

Teoriassa kaikki komposiitit voitaisiin yhdistää liimaamalla. Kuitenkin monet valmistajat välttävät liimaliitoksia paikoissa, joissa liitokseen kohdistuu suuria rasituksia. Tästä

johtuen kiinnikkeiden käyttöä suositaankin vielä monien liitosten yhteydessä. Joskus jotkut rakenteet tai komponentit voivat olla niin suuria, että se itsessään estää erityisten liimaukseen tarvittavien apuvälineiden käytön, jolloin mekaanisten kiinnikkeiden käyttö tulee jo sitä kautta halvemmaksi. (Machine Design 2002.)

### 6.1 Kuitulujitteisten komposiittien yhdistäminen

Mekaanisiin kiinnikkeisiin luetellaan muun muassa nitit, nastat, kaksiosaiset pultit ja sokeat kiinnikkeet, jotka on valmistettu titaanista, ruostumattomasta teräksestä tai alumiinista. Näitä kaikkia käytetään komposiittimateriaalien kiinnitykseen. Kiinnikkeiden käyttöön ja valintaan, yhdistettäessä komposiittimateriaaleja, vaikuttavat monet tekijät (Machine Design 2002):

- kiinnikkeen ja komponentin erilainen lämpölaajeneminen
- poraamisen aiheuttamat rakenteelliset muutokset komposiitissa, sekä rasiusten aiheuttamat delaminaatiot kiinnikkeiden kohdalla
- veden tunkeutuminen komposiittiin kiinnikkeiden kohdalla
- mahdollinen galvaaninen korrosio liitoksen kohdalla
- kiinnitysmekanismien ylimääräinen paino
- kiinnikkeen tiivistävyys etenkin polttoainetankin kohdalla

Alumiinista ja ruostumattomasta teräksestä valmistetut kiinnikkeet laajenevat ja kutistuvat suurten lämpömuutosten vaikutuksesta, kuten esimerkiksi lentokoneissa. Hiilikuitukomposiittien yhteydessä tämänlainen lämmön aiheuttama kiinnikkeiden koon muutos voi johtaa liitosten kiristysten löystymiseen. Jotta liitoksesta saadaan haluttu, on mahdolliset muutokset kiristyksissä määritettävä ennen kuin valitaan kiinnitysmekanismit. (Machine Design 2002.)

Komposiittien yhdistämiseen käytettävien kiinnikkeiden tulisi olla sen tapaisia, että ne jakavat muodostuvat voimat mahdollisimman laajalle alueelle. Tällä tavalla voidaan estää mahdollista komposiitin murskautumista. Kiinnikkeet tulee myös asentaa lähekkäin toisiaan, jotta voidaan välttyä komposiitin hiertymiseltä kiinnikkeen ulostuloreiässä. Huonot tai vajaat kiinnitykset voivat aiheuttaa delaminaatiota komposiiteissa. Erityisen kauluksen omaavat kiinnikkeet voivat vähentää ulostuloreiän mahdollisia vaurioita ja

mahdollistaa hyvän sovituksen. Kiinnikkeet voidaan myös kiinnittää liiman avulla, mikä voi vähentää hiertymisen mahdollisuutta. (Machine Design 2002.)

Hiilikuitukomposiittia leikatessa tai porattaessa kuidut sen sisällä tulevat näkyviin. Nämä kuidut voivat imeä itseensä kosteutta, mikä heikentää materiaalia ja lisää siihen painoa. Tiivistaineilla saadaan estettyä kosteuden imeytyminen, mutta se vaikeuttaa materiaalin yhdistämistä ja tuo lisäkustannuksia. Täten häviää myös komposiitin kuitujen ja kiinnikkeiden välillä ollut mahdollinen sähköinen jatkuvuus. Kauluksellisten kiinnikkeiden käytöllä voidaan saada vähennettyä tätä veden imeytymistä. (Machine Design 2002.)

Hiilikuitukomposiitit voivat syöpyä galvaanisesti, jos käytetään alumiinisia kiinnikkeitä. Tämä johtuu alumiinin ja hiilikuitujen kemiallisesta reaktiosta. Kiinnikkeiden pinnoittamisella voidaan estää korrosio, mutta se lisää kustannuksia ja rakenteiden yhdistämiseen käytettävää aikaa. Alumiiniset kiinnikkeet ovat usein korvattavissa paljon kalliimmilla titaanisilla ja ruostumattomasta teräksestä valmistetuilla kiinnikkeillä, kun yhdistettävänä on hiilikuitukomposiitti. (Machine Design 2002.)

## 6.2 Metallimatriisien yhdistäminen

Jotta voitaisiin valmistaa erilaisia kokonaisuuksia, jotka sisältävät metallimatriisikomponentteja, on niitä pystyttävä yhdistämään joillakin menetelmillä samanlaisiin tai erilaisiin materiaaleihin. Metallimatriisikomposiitit käyttävät hyväkseen erilaisia ei-metallisia partikkeleja lujitemateriaaleina, kuten piikarbidia, grafiittia, alumiinioksidia sekä boorikarbidia, joten nämä materiaalit tuovat mukanaan muutamia rajoituksia tai voivat vaatia joitakin menetelmien muutoksia perinteisiin homogeenisten metallien yhdistämiseen verrattuna. (U.S. Department of Defense 2002, s. 40.)

Perinteisten menetelmien käyttö metallimatriisikomposiittien yhdistämiseen riippuu seuraavien muuttujien yhdistelmästä: (1) lujitemateriaalin seossuhteesta matriisimateriaaliin nähden, (2) yhdistettävien metallien sulamislämpötiloista ja (3) lämpöenergian hallinnasta. Metallimatriisikomposiitit sisältävät erilaisia ei-metallisia lujitemateriaaleja, joten mitä suurempi määrä komposiitista on lujitemateriaalia, sitä vaikeampaa on käyttää perinteisiä yhdistämismenetelmiä. Epäyhtenäisesti lujitetut metallimatriisikomposiitit on helpompi yhdistää kuin yhtenäiset metallimatriisit. Yhdistettäessä metallimatriisia sulamislämpötilan yläpuolella, voi matriisimateriaalin ja

lujitemateriaalin sula olemus muokata komposiitin materiaaliominaisuuksia tai johtaa ei-toivottuihin kemiallisiin reaktioihin. Tästä johtuen mitä korkeampi on matriisimateriaalin sulamislämpötila, sitä vaikeampaa on käyttää perinteisiä sulahitsausta käyttäviä yhdistämismenetelmiä. Vaikka yleisimpien yhdistämismenetelmien käyttö vaatii korkeaa prosessilämpötilaa, on korkean lämpötilan käyttö ei-toivottua. Tästä johtuen automatisoitujen yhdistämismenetelmien tai joidenkin muiden erikoismenetelmien käyttö voi olla suositeltavaa, jos pystytään tarkasti kontrolloimaan lämmöntuontia ja minimoimaan prosessiin käytettävä aika. (U.S. Department of Defense 2002, s. 40–41.)

Metallimatriisien yhdistämismenetelmät voidaan jakaa kolmeen pääryhmään: kiinteässä olomuodossa tapahtuvaan, fuusioon sekä muihin prosesseihin. Kiinteässä olomuodossa yhdistäminen tapahtuu lämpötilassa, joka on yhdistettävien päämetallien sulamislämpötilojen alapuolella. Fuusiossa yhdistäminen tapahtuu yhdistettävien päämetallien sulamislämpötilojen yläpuolella. Muilla yhdistämismenetelmillä prosessi tapahtuu yleensä päämetallien sulamislämpötilojen alapuolella käyttäen lisäainetta hyväksi. (U.S. Department of Defense 2002, s. 43.)

Tyypillinen metallimatriisikomposiitti sisältää ei-metallista lujitemateriaalia 5–60 % komposiitin kokonaistilavuudesta. Ei-metallisista lujitemateriaaleista johtuen metallimatriisikomposiitit ovat erittäin kulumisenkestäviä ja kovia leikata käyttäen normaaleja metallinleikkaustyökaluja ja -sahoja liitospintoja valmisteltaessa. Yhdistettävien pintojen leikkaus- ja poraus on suoritettava tarkasti ja kontrolloidusti, jotta voidaan välttyä komposiittien reunojen repeytymiseltä ja tuottamasta suurta vahinkoa jatkuville kuiduille. Metallimatriisikomposiittien yhdistäminen on melko uusi menetelmä ja monet tärkeät yksityiskohdat ovat vielä selvittämättä. (U.S. Department of Defense 2002, s. 40–41.)

### 6.3 Liimaliitokset

Komposiittien liimaliitokset eivät yleensä heikkene, kun niitä joudutaan poraamaan tai muuten työstämään. Liimaliitoksia käytetään, kun kootaan esimerkiksi roottoreiden lapoja tai lentokoneiden siipiä, ja joskus myös rakenteellisten komponenttien yhdistämisessä. Liimaliitoksen luotettavuus voi joskus olla kyseenalainen, mutta kiinnikkeiden käyttö voidaan joissakin tapauksissa luokitella lujiteaineiden käytöksi. (Machine Design 2002.)

Liimaamiseen käytetään useimmiten seuraavia liimoja: epoksia, akryyliä ja uretaania. Epoksit soveltuvat erityisen luotettavasti epoksi-pohjaisten komposiittien yhdistämiseen, koska niillä on samanlaisia ominaisuuksia keskenään. (Machine Design 2002.)

### 6.3.1 Liimaliitoksen valmistus

Komposiittien pinnat, jotka aiotaan liittää liimaamalla, on valmistettava huolellisesti, jotta voidaan saavuttaa korkealaatuinen liimaliitos. Valmistelut riippuvat kuitenkin käytettävästä liimasta. Suositeltuja valmisteluja monien komposiittien liimaamiselle on yhdistettävien pintojen pyyhkiminen liuottimella ylimääräisen pölyn, lian ja öljyn poistamiseen, sekä pintojen karhentamiseen. Karhentaminen on kuitenkin suoritettava varovaisesti, jotta välttyään komposiitin ja kuitujen vahingoittumiselta. (Machine Design 2002.)

Joissain tapauksissa joudutaan liitos pohjustamaan toisella aineella ennen liimakerroksen levittämistä. Kun yhdistetään komposiitteja metalleihin, voidaan metallin yhdistettävä pinta esikäsitellä puhaltamalla hiekalla tai metallioksideilla, hiertää teräsharjalla tai työstää pinta muuten karheaksi. Metallipinnat voidaan myös käsitellä kemiallisesti. Jotta voidaan suojata juuri valmistettu metallipinta korroosiolta ja likaantumiselta, on liima levitettävä siihen mahdollisimman nopeasti. (Machine Design 2002.)

Liima voidaan tuoda liitospinnoille monella eri tavalla. Jotkut nestemäiset liimat mitataan ja levitetään pinnoille pumppujen avulla tai muiden liimoja säännöstelevien koneiden avulla. Liimoja voidaan tietenkin myös levittää ja sivellä liitospinnoille liitosten yhteydessä, jotka eivät vaadi tarkkaa liiman levitystä ja liiman määrän hallintaa. Liimaa ei ole yleensä vahvistettu lisäaineilla, joten liima on tyypillisesti lujuudeltaan heikompaa kuin komposiittimateriaali. Tästä johtuen oikea menetelmä on käyttää vain sen verran liimaa, että liimattavat pinnat peittyvät. Jotta liimaa tulee juuri oikea määrä liitokseen, voidaan liima lisätä myös kalvona tai levynä. Myös tahnamaisia ja kiinteitä (pulverimaisia) liimoja voidaan käyttää, mutta silloin niiden tasaiseen levittämiseen on panostettava. (Strong & Beckwith, s. 6)

### 6.3.2 Liimaliitoksen lujuus

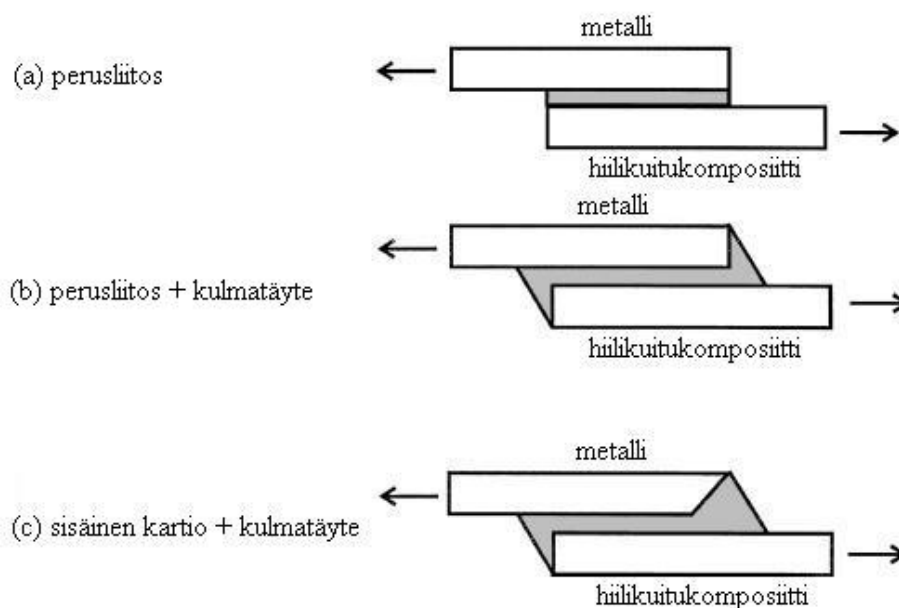
Liimaliitoksen lujuuden arviointi koneenrakennuksessa on tärkeää. Valitettavasti ei ole olemassa laajalti hyväksyttyä menetelmää liimaliitoksen lujuuden arviointiin. Liimaliitoksen lujuuden arviointi tulee vielä vaikeammaksi, kun otetaan huomioon pitkän

ajan kuluessa tapahtuva liitoksen lujuuden vanheneminen. (Ashcroft & Hughes & Shaw 2000, s. 158.)

Liimaliitos on mielenkiintoinen sen takia, että se sallii tasaisen voimien siirtymisen rakenteen sisällä, ja siten vähentää pienelle alueelle kohdistuvia voimia, joita voi tulla pulttien ja muiden kiinnikkeiden kohdalla. (Adams & Comyn 2000, s. 116.)

Komposiitin matriisimateriaalin on täytettävä monia vaatimuksia, joista vain yksi on lujuus. Lisäksi sen tulee olla samasta materiaaliperheestä kuin liima, joka on valittu sen lujuus- ja sitkeysominaisuuksien takia. Tästä johtuen, jos liimaliitokseen kohdistuu repivää kuormista, on olemassa suuri todennäköisyys, että komposiitti pettää ennen liimaliitosta. (Adams & Comyn 2000, s. 116.)

Komposiittimateriaalien suurin ongelma on voimien siirtyminen sekä vetolujuuden vaikutus. Erilaisella liimaliitoksella voidaan vähentää komposiitteihin kohdistuvia voimia. Kuvassa 22 on kolme erilaista liimaliitosta metallin ja hiilikuitukomposiitin välillä. Kaikissa kohdissa liitokseen ja materiaaleihin kohdistuu vetävä voimavaikutus. Liitosten lujuuden arvot suhteellisesti a:b:c ovat noin 1:2:5,5. Liitosten lujuuden arvot kasvavat sen takia, että komposiittiin kohdistuvia paikallisia voimavaikutuksia saadaan alennettua. (Adams & Comyn 2000, s. 116–117.)



**Kuva 22.** Periaatekuvat kolmesta erilaisesta liimaliitoksesta. (mukailten Adams & Comyn 2000, s. 117).

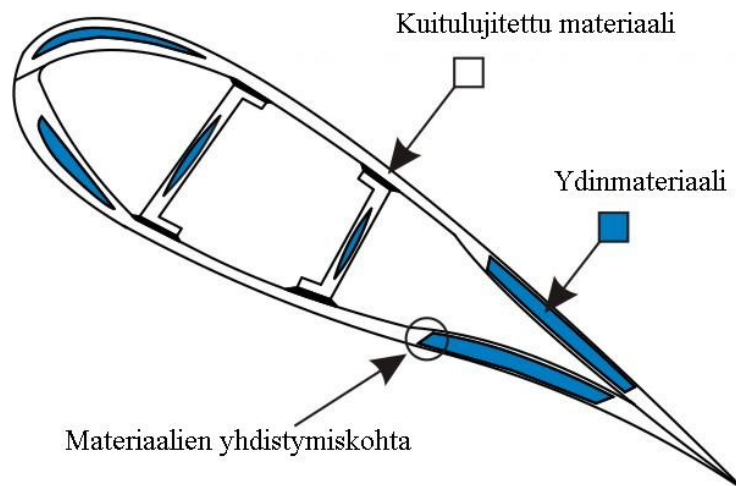


## 7 UUTUUSTUOTTEITA

Komposiittimateriaalit kehittyvät kovaa vauhtia nykypäivänä. Tämän päivän koneenrakennuksessa otetaan käyttöön entistä enemmän uusia innovatiivisia komposiittimateriaaleja.

### 7.1 Tuulivoimalan lavan ydinmateriaali

WebCore Technologies LLC, johtava komposiittirakenteiden ydinmateriaalien valmistaja, on kehittänyt uuden Tycor W –materiaalin tuulivoimaloiden lapojen ydinmateriaaliksi. Materiaali on korkealaatuinen vaihtoehto balsa-puulle ja vaahdolle (foam), joita käytetään yleisesti nykyaikana tuulivoimalan lavoissa ydinmateriaaleina (kuva 23). Uusi Tycor W -materiaali on kuitulujitteinen komposiittiydin, ja se on kehitetty vähentämään lapojen kokonaiskustannuksia sekä painoa. Tuote valmistetaan ISO 9001 laatustandardin mukaisesti. (JEC Composites 2010.)



**Kuva 23.** Halkileikkaus perinteisestä tuulivoimalan lavasta (mukaiillen Aalborg University).

Noin kaksi ja puoli senttimetriä paksu Tycor W säästää keskimäärin 0,23 kilogrammaa 0,1 neliometriä kohden, ja se vähentää myös valmistuksessa tarvittavan hartsin määrää 0,09 kilogrammaa 0,1 neliometriä kohden balsa-puuhun verrattuna. Tycor W:n ainutlaatuinen

sisäinen kuiturakenne helpottaa hartsin läpäisyä, mikä vähentää tarvittavan hartsin määrää. (JEC Composites 2010.)

WebCore:n tuotantoprosessi valmistaa Tycor W:n arkkikoot niin suuriksi, että niillä saadaan asiakkaan tuulivoimaloiden lapojen valmistus ydinmateriaalien osalta nostettua 10% verrattuna balsa-puuhun ja vaahtoon. Suurten arkkien ansiosta saavutetaan myös vähemmän liitoksia lapojen ytimiin, ja nopeampi lapojen valmistusnopeus. (JEC Composites 2010.)

Tycor W:n komposiittinen ydin on saastevapaa ja muuttumaton mittasuhteiltaan, mikä eliminoi epätasaisen ytimen kovettumisen tai huonon uuttamisen, mitä esiintyy tyypillisesti muiden ydinmateriaalien kuten balsa-puun kohdalla. (JEC Composites 2010.)

## 7.2 Sähköä varastoiva komposiittimateriaali

Sähköä varastoiva komposiittimateriaali edustaa uutta kokeellista ideaa autonvalmistuksessa. Siinä on kehitetty prototyypimateriaali, joka voi varastoida itseensä sähköistä energiaa ja myös purkaa sitä. Materiaalin tärkeimpänä ominaisuutena on kuitenkin, että sitä voidaan käyttää auton rungon materiaalina, koska se on vahvaa ja kevyttä. Materiaalia on suunniteltu käytettävän hybridiautoissa, jolloin niistä saataisiin paljon kevyempiä ja energiatehokkaampia, jolloin niillä voitaisiin ajaa pidempiä matkoja latausten välillä. (The A to Z Nanotechnology 2010.)

Materiaalin kehittäjät Volvolla ovat sitä mieltä, että sillä on potentiaalia uuden teknologian joukossa tulevaisuudessa. Nykyiset hybridiautot tarvitsevat suuren määrän akkuja sähkömoottorin pyörittämiseen, joten ne ovat painavia ja kuluttavat paljon energiaa ja tarvitsevat latausta usein. Komposiitti koostuu hiilikuiduista ja polymeerihartsista ja siihen voidaan varastoida suuria määriä energiaa paljon nopeammin kuin tavallisiin akkuihin. Materiaali ei käytä hyväkseen kemiallista reaktiota, joten materiaali ei kulu tai tuhoudu, kuten normaalit akut. (The A to Z Nanotechnology 2010.)

Kehittäjät uskovat, että tätä kyseistä patentoitua materiaalia voitaisiin käyttää myös jokapäiväisessä käytössä. Potentiaalisia kohteita olisivat matkapuhelimet ja kannettavat tietokoneet, jolloin materiaalia voitaisiin käyttää laitteiden kuorissa akkuna. Tällöin ei tarvittaisi akkua matkapuhelimeen tai kannettavaan tietokoneeseen, jolloin niistä voitaisiin

valmistaa entistä pienempiä ja kevyempiä. Matkapuhelimesta voitaisiin tulevaisuudessa rakentaa jopa pankkikortin paksuisia, ainakin teoriassa, tai kannettavat tietokoneet voisivat toimia pidempiä aikoja akun varassa. (The A to Z Nanotechnology 2010.)

## 8 KIERRÄTYS

Komposiittien kierrätys ja hävittäminen on tärkeä osa niiden elinkaarta. Komposiittien kierrätys alkaa tulla entistäkin tärkeämmäksi tulevaisuudessa, sillä komposiittimateriaaleja käytetään yhä enemmän koneenrakennuksessa tällä hetkellä.

### 8.1 Komposiittien kierrätys lentokoneteollisuudessa

Eräs tuote, joka sisältää hiilikuitukomposiitteja ja on pinnoitettu kuudenarvoisella kromipinnoitteella, on vanhentuneet lentokoneet. Nämä komposiitit, jotka ovat pinnoitettu kuudenarvoisella kromilla, luokitellaan ongelmajätteeksi, eikä niitä sen takia voida hävittää viemällä kaatopaikalle. Tämänkaltaisten komposiittien kierrätykseen tulee panostaa eri tavalla, jotta ne eivät aiheuta ongelmia ihmisten terveydelle tai ympäristölle. (Boeing Environmental technotes 2003, s. 1.)

Polttaminen on yksi vaihtoehto komposiittien hävittämiselle. Komposiittien sisältäessä hiilikuitua ei niitä voida kuitenkaan polttaa normaalisti. Polttamisen yhteydessä voi vapautua luontoon pieniä hiilikuidun hiukkasia, jotka johtavat sähköä, mikä voi johtaa sähköisten häiriöiden muodostumiseen erinäisissä laitteissa lähialueilla. (Boeing Environmental technotes 2003, s. 2.)

Ensimmäinen askel komposiittien kierrätyksessä on lajitella komposiitit metalleista. Hiilikuitujen erottelu komposiiteista on kuitenkin vielä tärkeämpää. Aikaisemmin komposiittien kierrätys on käsittänyt hiontaa, leikkausta tai haketusta sopivan kokoisiksi paloiksi käytettäväksi täytemateriaalina uusissa komposiittimateriaaleissa. Jauhamisessa komposiitti jauhetaan hienoksi puruksi. Tämän menetelmän käyttö voi olla suotuista tietyille komposiiteille, kuten autoteollisuudessa käytettäville, jotka sisältävät tyypillisesti suuria määriä täyteaineita. Lentokoneissa olevat komposiitit sisältävät kuitenkin yleensä

arvokasta hiilikuitua ja sen talteen saamiseksi tehokkaasti on käytettävä eri menetelmiä. (Boeing Environmental technotes 2003, s. 3.)

Toisia menetelmiä, kuten hapolla liuottamista, voitaisiin käyttää kuitujen talteen ottamiseen. Menetelmä on kuitenkin melko epäkäytännöllinen ympäristölähtökohtaisesti ajatellen. Menetelmä käyttää hyväkseen haitallisia kemikaaleja ja lopputuotteena syntyy yhdisteitä, jotka tarvitsevat myöhempää jatkokäsittelyä. (Boeing Environmental technotes 2003, s. 3.)

Oikean kierrätysmenetelmän valinta on tärkeää. On epäkäytännöllistä ja tyhmää käyttää kierrätysmenetelmää, joka tuottaa haitallisia sivutuotteita, jotka vähentävät prosessin taloudellisia ja ympäristöllisiä etuja hyötyjen jäädessä pienemmiksi. (Boeing Environmental technotes 2003, s. 3.)

## 8.2 Tuulivoimalan lapojen kierrätys

Gloaali tuulivoimateollisuus kasvaa nopeasti sekä turbiinien määrässä että koossa. Samalla kun turbiinit kasvavat, kasvavat myös niiden lavat ja niihin tarvittavan materiaalin määrä. Tämä tuo ongelmia nuorelle tuulivoimateollisuudelle vanhenevien turbiinien sekä niiden osien purkamisesta, erottamisesta, kierrätyksestä sekä hävittämisestä. Tuulivoimaloiden siipien elinkaaren on ennustettu olevan noin 20–25 vuotta ja niiden kierrätykseen tarvitaan vielä paljon käytännön kokemusta. (Larsen 2009, s 70.)

Tuulivoimaloiden siipien vahvistamiseen käytetään tyypillisesti lasi- tai hiilikuituja sekä polymeeriä kuten polyesteriä tai epoksia. Ydinmateriaali valmistetaan polyvinyylidikloridista, PET-muovista tai balsa-puusta. Siivissä on myös liimaliitoksia, polyuretaani pinnoitteet sekä ukkosenjohdattimet. (Larsen 2009, s. 70.)

Tällä hetkellä on kolme eri vaihtoehtoa vanhentuneiden tuulivoimalan siipien jatkokäsittelyyn: kaatopaikka, polttaminen tai kierrätys. Ensimmäinen vaihtoehto on poistumassa käytöstä sen huonon ympäristövaikutuksen takia. Yleisin tapa on polttaminen. Polttamisen yhteydessä voidaan saada sivutuotteena energiaa ja lämpöä, mutta silti 60% romusta säilyy vielä tuhkana prosessin jälkeen. Komposiittien sisältämän epäorgaanisten yhdisteiden takia jäljelle jäänyt tuhka voi olla ympäristölle haitallista, ja jatkokäsittelystä

riippuen, viedään se kaatopaikalle tai kierrätetään rakennusmateriaalina. Epäorgaaniset yhdisteet muodostavat poltettaessa myös vaarallisia savukaasuja, ja lasikuituhiukkaset voivat tuoda ongelmia savukaasujen puhdistuskoneiston suodattimille. Polttoprosessia ennen on siivet irrotettava ja paloitetava kuljetusta varten, mikä voi olla haitallista työntekijöiden terveydelle. (Larsen 2009, s. 70.)

Viimeisenä vaihtoehtona on tuulivoimalan lapojen kierrätys. Tällä hetkellä on muutamia vakiintuneita tapoja kierrättää tuulivoimalan lapoja. Näillä menetelmillä kuitenkin vain 30% kuitulujitteisesta muovista saadaan uudelleenkäytettyä, jolloin suurin osa menee sementtiteollisuudelle täytemateriaaliksi. (Larsen 2009, s. 70.)

### 8.3.1 Kierrätysmenetelmiä

Yhdessä menetelmässä, joka kehitettiin 2003-2005 kokeellisessa muodossa kuitulujitteisten komposiittien kierrättämiseen, hartsi hakataan irti vasaroilla koneellisesti kuiturakenteesta. Tämän jälkeen kuidut päivitetään uudelleenaktivoimismenetelmällä kemiallisesti, jotta ne tarttuisivat paremmin uuteen matriisimateriaaliin. Kuidut myös erotellaan toisistaan pituussuuntaisesti ja niistä erotellaan epäpuhtauksia. Irrotettujen kuitujen sitomisessa uuteen hartsiin on kuitenkin ongelmansa, sillä kuiduissa on usein jäämiä edellisestä hartsiesta, mikä tekee niiden liittämistä vaikeampaa. Kuidut eivät myöskään ole yhtä pitkiä kuin alkuperäiset. Tuulivoimaloiden siipien kohdalla tarvitaan lisätyötä siipien leikkaamiseen pienemmiksi paloiksi. Tämä voidaan tehdä turbiinin lähellä kuljetuksen helpottamiseksi tavalliseen kaivinkoneeseen liitetyillä saksilla. (Larsen 2009, s. 71.)

Projektin aikana huomattiin kuitenkin, että kierrätetylle kuitulujitteiselle muoville ei ole samanlaista kysyntää, kuin esimerkiksi kierrätetylle teräkselle. Kierrätettyä kuitulujitteista muovia voidaan käyttää siloissa, betonin lujitemateriaalina, uusissa laminaattituotteissa, kierrätettyä polypropeenin hartsin vahvikkeena ja kerrosrakenteisissa komposiiteissa. (Larsen 2009, s. 71.)

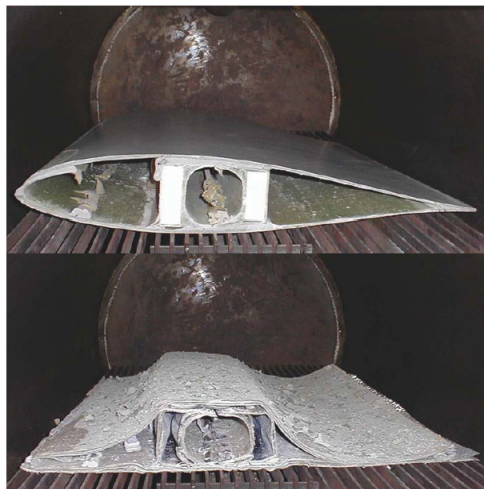
Yksi haaste kierrätetyn komposiitin käyttö uusissa tuotteissa on näiden uusien tuotteiden takuutodistuksissa. Yritysten käyttäessä kierrätettyä materiaalia, tuntevat yritykset ottavan riskin materiaalinkäytössä ja takuutodistusten vaarantuvan. Toinen haaste kierrätettyjen

kuitujen kohdalla on niiden lyhyempi pituus alkuperäisiin kuituihin nähden. Kierrätetyt kuidut saattavat myös sisältää jäämiä edellisestä hartsista ja ovat vaikeammin aseteltavissa halutun suuntaisesti. (Larsen 2009, s. 71.)

Komposiittien kierrättäminen mekaanisen murskauksen avulla ei vaikuta lasikuitujen vetolujuuden muuttumiseen. Kuitenkin edellä mainittu menetelmä tuottaa epäpuhdasta materiaalia. Yksi kierrätysvaihtoehto on kemiallinen liuottaminen. Tällä menetelmällä lasikuitujen vetolujuus säilyy ja niitä voidaan käyttää uudelleen osana uutta materiaalia. Menetelmässä käytetään kuitenkin aggressiivisia ja haitallisia kemikaaleja, ja menetelmä on kallis. (Larsen 2009, s. 71.)

### 8.3.2 Pyrolyysi

Hyvä menetelmä tuulivoimalan lapojen kierrättämiseen on kuivatislaus eli pyrolyysi sekä kaasutus. Vaikka kuidut menettävät kohtuullisen osan niiden vetolujuudesta, ja huolimatta tehtaan kalliista hinnasta, on lopputuote todella homogeeninen ja muovin energiasisältö saadaan talteen. Lopputuotteet ovat pääasiassa lämmönkestäviä eristemateriaaleja. Kuituja voidaan käyttää myös lujiteaineina liimoissa, kestumuoveissa, asfaltissa ja betonissa, sekä raaka-aineena uusille lasikuiduille. Komposiittien energiasisältö käytetään sähkön tuottamiseen, prosessin sähköntarpeeseen sekä kaukolämmön tuottamiseen. Hiilikuitujen kohdalla materiaaliominaisuuksien heikentyminen on erilaista. Kimmomoduuli pysyy ennallaan ja murtolujuus putoaa vain 5%. Kuvassa 24 on kuvattuna pala tuulivoimalan lapaa enne ja jälkeen pyrolyysin. (Larsen 2009, s. 72.)



**Kuva 24.** Tuulivoimalan lapa ennen ja jälkeen pyrolyysin (Larsen 2009, s. 71).

Pyrolyysiä käytettäessä ensimmäisessä vaiheessa tuulivoimalan siivet paloitellaan pienemmiksi paloiksi prosessin onnistumisen kannalta. Tehtaalla palat leikataan vielä pienemmiksi kämmenen kokoisiksi paloiksi. Materiaalia syötetään sen jälkeen jatkuvasti happi-vapaaseen pyörivään uuniin, jossa lämpötila on 500°C. Muovi muuttuu uunissa synteettiseksi kaasuksi. Kaasua käytetään sähköntuotantoon sekä pyörivien uunien lämmittämiseen. Seuraavaksi vuorossa on toinen pyörivä uuni, jossa lasikuitumateriaali puhdistetaan ilman avulla ja metallit poistetaan magneettien avulla. Myös jäljelle jäänyt pöly poistetaan. Lasikuitumateriaali on sekoittuneena pieneen määrään polypropeenikuituja, joten molemmat materiaalit kulkevat uunin läpi, jossa polypropeenikuidut sulavat ja muodostavat lasikuitujen kanssa vakaan laatan. (Larsen 2009, s. 72.)

Komposiittien kierrätyksen ongelmana on sen kalleus. Tällä hetkellä vanhentuneet tuulivoimalan siivet viedään kaatopaikoille, sillä se on yrityksille kaikista menetelmistä halvin. Tuulivoimalan siipien kierrätys on vielä melko ongelmallista, mutta kehitystä on tapahtunut kierrätystavoissa ja kierrätetyn materiaalin jatkokäytössä. Tuulivoimaloiden koon ja määrän kasvaessa on selvää, että tulevaisuudessa 15–20 vuoden päästä on selkeästi suurempi määrä kierrätettävää materiaalia. Yritykset ovatkin heränneet tähän tulevaan ongelmaan ja kehittelevät uusia kierrätysmenetelmiä sekä uusia materiaaleja tuulivoimaloiden siipiin. (Larsen 2009, s. 73.)

## 9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Komposiittimateriaalien käyttö tämän päivän koneenrakennuksessa tulisi olla selkeästi laajempaa komposiittien korkean vahvuuden ja jäykkyyden ansiosta suhteessa niiden keveyteen, verrattaessa esimerkiksi metalleihin. Onkin ihme ettei komposiittien täyttä potentiaalia ole otettu käyttöön aikaisemmin. Kuitenkin komposiittien valmistus, työstäminen, liittäminen sekä kierrätys aiheuttavat ongelmia sekä suurempia kustannuksia komposiittien käyttämiselle jokapäiväisten tuotteiden valmistukseen. Komposiittimateriaalien käyttö tällä hetkellä onkin yleistä paikoissa, joissa materiaaliominaisuudet voittavat kustannusten merkityksen.

Kuitulujitteisten komposiittien kohdalla mielenkiintoista on kuitujen vaikutus komposiitin ominaisuuksiin. Kuitujen suuntaus komposiittimateriaalissa kuormitussuuntaan nähden on yllättävän merkityksellistä. Pitkien kuitujen suuntaus kuormitussuuntaan nähden voi vaikuttaa jopa nelinkertaisesti komposiitin kestävyysrasituksen alaisena. Kerroksittain valmistettaessa laminaattikomposiittia kuitulevyjen suuntaus on tärkeää, jos tiedetään mistä suunnasta rasitukset tulevat. Tieto kuitujen suunnasta onkin todella merkittävä käytettäessä kuitulujitteisia komposiitteja koneenrakennuksessa ja koneensuunnittelussa.

Metallimatriisikomposiittien käyttö on kasvanut selkeästi viimeaikoina, mutta silti näiden komposiittien käyttöä voitaisiin lisätä tämän päivän koneenrakennuksessa. Tällä hetkellä eniten metallimatriisikomposiitteja käyttävät ilmailu- ja avaruusteollisuus, mutta myös kuluttajien tuotteissa, kuten esimerkiksi henkilöautoissa, ovat metallimatriisikomposiitit yleistyneet. Metallimatriisikomposiiteilla on uskomattoman monia eri mahdollisuuksia koneenrakennuksessa johtuen monista matriisi- sekä lujitemateriaalivaihtoehdoista. Metallimatriisikomposiittien käytöllä saataisiin selkeästi keveyttä ja muita materiaaliominaisuuksia koneenosissa, mikä avaisi uusia ulottuvuuksia koneenrakennuksessa. Metallimatriisien työstäminen on kuitenkin hankalaa ja työkaluja kuluttavaa, mikä tekee useimmissa tapauksissa näiden komposiittien käytöstä epätaloudellista.

Perinteisiä työstömenetelmiä käytetään kuitulujitteisten komposiittien työstämiseen, mutta silti niiden työstäminen on vaikeaa. Koska kuitulujitteiset komposiittimateriaalit eivät ole homogeenisia, eli sisältävät kahta tai useampaa materiaalia, tulee näiden komposiittien työstämisessä ottaa huomioon monia eri muuttujia. Kuitujen suunta materiaalissa verrattuna terän kulkusuuntaan vaikuttaa yllättävän paljon komposiitin pinnanlaatuun ja työstön onnistumiseen. Pinnanlaatuun voidaan vaikuttaa huomattavasti käyttämällä sorvauksessa hyväksi ultraääntä, jolloin pinnanlaadusta saadaan selkeästi parempaa.

Komposiittimateriaalien yhdistäminen on yksi mielenkiintoisimmista ja tärkeimmistä seikoista, valmistuksen jälkeen, puhuttaessa komposiittien käytöstä koneenrakennuksessa. Paikoissa joissa joudutaan käyttämään kiinnikkeitä liimaamisen sijasta, tulee monia erilaisia muuttujia kiinnikkeiden suhteen. Täytyy ottaa huomioon muun muassa kiinnikkeiden lämpölaajeneminen, poraamisen aiheuttamat muutokset komposiitissa,



veden tunkeutuminen, mahdollinen galvaaninen korroosio. Galvaaninen korroosio voi aiheutua kun käytetään hiilikuitukomposiittien liittämiseen alumiinisia kiinnikkeitä. Jopa näinkin pienellä asialla, kuin kiinnikkeet, voi olla suuri merkitys esimerkiksi lentokoneiden siipien yhdistämisessä runkoon, mikä edellyttää täsmälleen oikean materiaalin valintaa kiinnikkeisiin.

Uutuustuotteista mielenkiintoinen on sähköä varaava komposiittimateriaali. Tämän tapaisella materiaalilla olisi hurjan paljon käyttöä tulevaisuudessa, kun kaikista tuotteista halutaan tehdä mahdollisimman pieniä ja kevyitä. Materiaali joka olisi tuotteen rakenteellisena osana ja toimisi samalla akkana on mullistava ajatus tulevaisuuden koneenrakennuksessa.

Kierrätys on tärkeä osa komposiittien elinkaaren suunnittelua. Komposiittien käytön lisääntyessä koneenrakennuksessa on onneksi myös kierrätyksen merkitys kasvanut merkittävästi. On harmi, ettei kierrätysmenetelmiä ole tutkittu aikaisemmin tai kehitetty niitä tarpeeksi. Harmillista on myös kierrätysmenetelmien kalleus verrattuna kaatopaikkojen käytön edullisuuteen. Kierrätys tuntuu olevan myös hirveän vaikeaa, sillä kuitujen talteenotto yhdessä kuitujen laadun säilyttämisen ja ympäristövaikutusten kanssa on ongelmallista. Kierrätetyn komposiittimateriaalin uudelleenkäyttöä pitäisi myös lisätä, sillä tällä hetkellä sen suosio on melko vähäistä. Komposiittimateriaalien huippuhyvien ominaisuuksien ja uusien sovellusten myötä myös niiden ympäristölliset vaikutukset ovat kasvaneet verrattaessa perinteisiin materiaaleihin. Niiden ominaisuudet ovat monissa tapauksissa parempia kuin esimerkiksi metallien, mutta myös niiden kierrätys ja uudelleenkäyttö on vaikeampaa.

## LÄHTEET

Aalborg University. Department of Mechanical Engineering. [osaston www-sivu]. [viitattu 31.8.2010]. Saatavissa: <http://www.me.aau.dk/MUST/DMO/Background>

Adams, R.D. & Comyn, J. 2000. Assembly Automation. Volume 20, Number 2. Joining using adhesives. 109–117 s.

Ashcroft, I.A. & Hughes, D.J. & Shaw, S.J. 2000. Assembly Automation. Volume 20, Number 2. Adhesive bonding of fibre reinforced polymer composite materials. 150–161 s.

Beckwith, S. 2009. SAMPE Journal, Volume 45, No. 2, Drilling, Cutting, Machining Composite Materials and Structures.

Boeing Environmental technotes. November 2003. Volume 8, number 4. Composite Recycling and Disposal An Environmental R&D Issue. 4 s.

Dharan, C & Won, M. 2000. International Journal of Machine Tools & Manufacture 40. Machining Parameters for an Intelligent Machining System for Composite Laminates. 415–426 s.

Farmingdale State Collage. 2004. MET205 – Material Science. [kurssin www-sivu]. Composites. [viitattu 20.8.2010]. Saatavissa: <http://info.lu.farmingdale.edu/depts/met/met205/composites.html>

Gurit 2009. Wind Energy Composite Materials Handbook. Section 6: Guide to Composites. [verkkodokumentti]. [viitattu 20.6.2010]. 72 s. Saatavissa PDF-tiedostona: [http://gurit.com/core/core\\_picker/download.asp?id=2487](http://gurit.com/core/core_picker/download.asp?id=2487)

JEC Composites. [www-sivu]. 2010. Core material dedicated to wind blade manufacturing. [viitattu 31.8.2010]. Saatavissa: <http://www.jeccomposites.com/composites-news/6971/composites-core-material.html>

Kainer, K. 2006. Metal Matrix Composites: Custom-made Materials for Automotive and Aerospace Engineering. Basics of Metal Matrix Composites. 323 s. ISBN: 3-527-31360-5.

Larsen, K. 2009. Renewable energy focus -magazine. January/February 2009. Recycling wind turbine blades. 70–73 s.

Machine Design. [www-sivu]. Joining Composites. 2002. [viitattu 6.5.2010]. Saatavissa: <http://machinedesign.com/article/joining-composites-1115>

NDT-Resource Center. [www-sivu]. Structure of Materials. Composite Structures. [viitattu 30.8.2010]. Saatavissa: [http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Structure/composite\\_class.htm](http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Structure/composite_class.htm)

Tampereen teknillinen yliopisto. Materiaaliopin laitos. Materiaalit ja materiaalien valinta. 2004. [kurssin www-sivu]. [viitattu 6.5.2010]. Saatavissa: [http://www.ims.tut.fi/vmv/2004/vmv\\_4\\_5.php](http://www.ims.tut.fi/vmv/2004/vmv_4_5.php)

Teti, R. 2002. CIRP Annals - Manufacturing Technology. Volume 51, Issue 2. Machining of Composite Materials. 611–634 s.

The A to Z Nanotechnology [www-sivu]. 2010. New Composite Material that Could Revolutionise Car Design and Manufacturing. [viitattu 6.5.2010]. Saatavissa: <http://www.azonano.com/news.asp?NewsID=15790>

U.S. Department of Defense. 2002. Military Handbook - MIL-HDBK-17-4A: Composite Materials Handbook, Volume 4 - Metal Matrix Composites. Electronic ISBN 978-59124-487-5. 307 s.

Strong, B. & Beckwith, S. Joining Composite Materials – Mechanical or Adhesive? [verkkodokumentti]. [viitattu 30.8.2010]. 11 s. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://strong.groups.et.byu.net/pages/articles/articles/joining2.pdf>