

NDT-MENETELMÄT KOMPOSIITTIIEN LAADUNVARMISTUKSESSA

Kari Jääskeläinen, Mirja Andersson

Projektin toteutusaika 9-12/2009



SISÄLLYSLUETTELO

1 Selvityksen tausta	4
2 Selvityksen tavoite	4
3 Hartsien kovettumisen seurantaan soveltuvat tekniikat	5
3.1 Johdanto	5
3.2 Barcol-mittaus	6
3.3 Sähköisten ominaisuuksien mittaaminen.....	7
3.3.1 Johtokyvyn mittaaminen	7
3.3.2 Dielektrometria	8
3.3.3 Aika-alue-reflektometria.....	10
3.3.4 FEF-anturimenetelmä	12
3.3.5 Resistanssimittaus.....	13
3.3.6 Pietsosähköiset anturit.....	15
3.4 Akustiset menetelmät.....	15
3.5 Kuituoptiset mittausmenetelmät	17
3.5.1 Taitekertoimen mittaamiseen käytetyt anturit.....	18
3.5.2 Taitekerroinmittauksen kehitystilanne	20
3.6 Raman-spektroskopia	20
3.6.1 Mittausperiaate	20
3.6.2 Kaupalliset Raman-spektroskopia-laitteet	22
3.7 IR-spektroskopia	23
3.8 UV-Vis- ja fluoresenssispektroskopia	24
3.8.1 Fluoresenssispektroskopia: mittausperiaate	24
3.8.2 Kaupalliset fluoresenssimittauslaitteet	25
3.9 Lämpötila-anturit	26
4 Komposiittirakenteiden vaurioiden tutkimistekniikat.....	28
4.1 Lämpökameramittaukset.....	28

4.1.1 Mittausperiaate ja sovellukset.....	28
4.1.2 Kaupalliset laitteistot.....	30
4.2 Lasershearografia (laser shearography).....	31
4.3 Ultraäänitarkastus.....	33
4.4 Muita vaurioiden tutkimismenetelmiä.....	36
4.5 Komposiittirakenteiden jännitysten mittaaminen.....	40
4.5.1 Kuituoptiset mittaussuomenetelmät.....	41
4.5.1.1 Fabry-Pérot-interferometrianturi.....	41
4.5.1.2 Takaisinsirontaan perustuvat anturit.....	42
4.5.1.3 Braggin hila-anturit.....	42
4.5.1.4 Kaupalliset kuituoptikkaan perustuvat laitteistot.....	42
4.5.2 Venymäliuska-anturit.....	43
5 Menetelmien käyttökelpoisuuden arviointi tuotantolaitoskäyttöön.....	44
5.1 Silloittumisen mittaussuomenetelmien vertailu ja arviointi.....	44
5.2 NDT-tutkimussuomenetelmien vertailua.....	47
5.3 Suosituksia jatkotoimenpiteiksi.....	48
6 Kirjallisuusviitteet.....	50

1 Selvityksen tausta

Yksi komposiittiveneen valmistuksen haasteista on toimiva laadunvarmistus. Erityisesti hartsien kovettumisen tuotannonaikaiseen seurantaan kaivataan luotettavia ja helppokäyttöisiä NDT (non-destructive testing) -menetelmiä. Menetelmien puuttuessa ylipitkä komposiittiveneen jälkikövetus uunissa ”varmuuden vuoksi” aiheuttaa kustannuksia, jotka voisivat olla vältettävissä uusien NDT-menetelmien käyttöönotolla. Veneen kovettumista voidaan käytännössä seurata mm. lämpökameralla ja Raman/IR-spektroskooppisesti. Näiden lisäksi uudempia menetelmiä ovat erilaiset laseria hyödyntävät rakennekuvantamismenetelmät. Uusien menetelmien kehitystyön lisäksi viime vuosina on laitevalmistajien toimesta panostettu voimakkaasti laitekoon pienentämiseen. Tästä syystä on markkinoille tai pilot-vaiheeseen voitu tuoda yhä enemmän kannettavia NDT-laitteistoja. Komposiittien tuotannonaikainen laadunvalvonta on tärkeää veneiden valmistajien lisäksi myös muille komposiittituotteiden valmistajille.

2 Selvityksen tavoite

Selvitystyön tavoitteena on saada uusin tieto hartsien kovettumisen seurantaan soveltuvien menetelmien ja kannettavien NDT-laitteiden kypsyysasteesta sekä selvittää mahdolliset kaupalliset ja pilot-laitteet tuotantolaitoskäyttöön. Selvityksen tulosten pohjalta voidaan valmistella uusien lupaavien menetelmien käyttöönottoa edistävä hanke.

Selvityksessä on ensin käyty läpi hartsien kovettumisen mittaamiseen soveltuvat tekniikat luvussa 3 ja sitten komposiittirakenteiden vaurioiden havaitsemistekniikoita ja sisäisten jännitysten mittaamenetelmiä luvussa 4. Tekniikoissa on pyritty pysymään kannettavien ja on-line- sekä tuotantolaitoskäyttöön sopivien mittaamenetelmien piirissä, mutta joitakin kehitettäviä potentiaalisia menetelmiä on käsitelty, vaikka ne ovat vasta tutkimus- ja laboratoriotestausvaiheessa, jos menetelmän on katsottu olevan sellainen, että siitä voi olla tulossa menetelmä tuotantokäyttöä varten. Myös menetelmiä, joissa mittaussanturi tai valokuitu valetaan komposiittirakenteen sisälle, on käsitelty, koska useita sellaisia menetelmiä käytetään silloittumisasteen arviointiin ja joitakin sellaisia menetelmiä voidaan käyttää komposiittirakenteen ominaisuuksien (esim. jännityksen tai lämpötilan) mittaamiseen varsinaisessa käytössä tai rakenteiden korjaus- tai huoltotilanteissa. Menetelmien vertailu, käyttökelpoisuuden arviointi tuotantolaitosten käyttöön ja ehdotuksia jatkotoimenpiteiksi on käsitelty luvussa 5.

3 Hartsien kovettumisen seurantaan soveltuvat tekniikat

3.1 Johdanto

Hartsien kovettumisen mittaamisella voi olla komposiittirakenteiden valmistamisessa useita eri käyttötarkoituksia. Yleisesti ottaen hartsien kovettumisaste halutaan tietää, koska kovettumisasteen perusteella voidaan päätellä, milloin valmistettuja tuotteita voidaan jatkokäsitellä tai milloin tuote on käsitelty valmiiksi. Tämän lisäksi kovettumisasteen mittaamista voidaan käyttää tuotantoprosessien laajempaan hallintaan, kuten komposiittirakenteiden silloittumisen mallintamiseen prosessinohjauksen välineeksi tai laadunvalvontatyökaluksi, jolla voidaan taata tuotteiden laatu asiakkaille. /1/

Komposiittirakenteiden valmistuksessa silloitettavat päähartsit ovat epoksi-, polyesteri-, fenoli- ja vinyylesterihartsit. Erilaisia rakenteiden valmistusmenetelmiä on hyvin paljon, osa on työvoimavaltaisia (kuten käsinlaminointimenetelmät) ja osa pääomavaltaisia ja automatisoituja (kuten muotti-valu- ja autoklaavimenetelmät). /1/

Hartsien silloittumisreaktion voidaan ajatella koostuvan kahdesta vaiheesta: nestemäisen hartsin polymeroitumisreaktiosta, jonka aikana verkottuminen alkaa ja päättyy geeliytymispisteeseen. Usein hartsia voidaan muovata tai injektoida melko hyvin ennen geeliytymispistettä, mutta ei sen jälkeen. Geeliytymispisteen jälkeen hartsit muuttuu hitaasti lasimaiseksi rakenteeksi lujitteineen ja eksotermisen silloittumisreaktion huippulämpötila on lasittumislämpötila. Tämän jälkeen silloittumislämpötila laskee. Usein silloittuminen päätetään jälkikovuudella korotetussa lämpötilassa. Silloittumisen jälkeen voidaan ajatella materiaalin muutosvaiheena olevan vielä rakenteen hajoaminen käytön aikana (silloittumisrakenteen kemiallinen tai mekaaninen muutos, joka ei yleensä ole haluttu muutos). /1/

Epätäydellisellä silloittumisella on yleensä negatiivisia vaikutuksia komposiittirakenteiden ominaisuuksiin, kuten alentunut lasittumislämpötila ja mekaaniset ominaisuudet, huono sidos lujitteen tai muiden rakennekerrosten kanssa tai pinnan pehmeys. Uusien raaka-aineiden käyttöönotossa silloittumisen tarkkailulla voidaan usein lyhentää raaka-aineiden kokeiluvaiheita ja koesarjoja ennen tuotantovaihetta. /1/

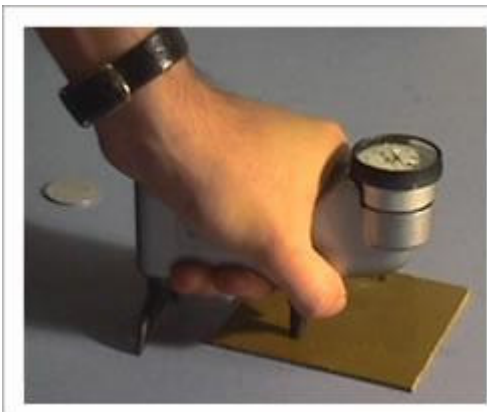
Tässä luvussa on kuvattu aluksi usein käytetty Barcol-kovuusmittaus, joka on pitkään käytössä ollut menetelmä. Sen jälkeen on käsitelty mm. sähköisiä, akustisia, (kuitu)optisia ja lämpötilaan perustuvia tekniikoita. Tekniikoista on pyritty esittämään mittauksen periaate ja mittausjärjestely, jotta lukija saa käsityksen siitä, mitä laitteita mittausjärjestelyyn kuuluu. Menetelmän kehitysvaihe ja löytyneet kaupalliset sovellukset tai menetelmää kehittäviä tutkimuslaitoksia on mainittu.

Sähköisissä mittauksissa käytetään hyväksi mm. johtokyvyn, kapasitanssin, dielektrisyysvakion ja dielektrisyysväiön mittaamista. Optisten ominaisuuksien mittaamiseen kuuluvat kuituoptiset menetelmät, infrapuna- ja UV-säteilymittaukset sekä taitekertoimen mittausta. /2/.

Spektroskooppiset mittaukset (infrapuna- ja UV/Vis-mittaukset) mittaavat tavallisesti kemiallisia muutoksia hartsin komponenteissa (tai kemiallisissa sidoksissa) ja silloittumisaste on suoraan verrannollinen mitattaviin kemiallisiin muutoksiin (esim. hartsin jonkin funktionaalisen ryhmän muutoksiin). Näihin menetelmiin liittyvät anturit ovat usein valokuitua käyttäviä ja ne voidaan usein liittää kiinteäksi osaksi komposiittirakennetta. /2/

3.2 Barcol-mittaus

Barcol-mittaus on pitkään käytössä ollut muovien ja metallien kovuusmittausmenetelmä, jolla saadaan epäsuoraa tietoa hartsien silloittumisesta, sillä yleensä hartsien kovuus kasvaa silloittumisen edetessä. /3/ Barcol-mittaus perustuu näytteeseen painetun neulamaisen mittapään tunkeutumissyvyyden mittaamiseen, kuten useimmat kovuusmittaukset. Barcol-mittaus tehdään kevyellä kannettavalla mittarilla, jossa on tukijalat, painantaneula, 100 väliin jaettu kovuusmittari ja painantakahva. Kaupallisia tuotteita on yleisesti saatavilla. Mittarista on valmistettu myös kaupallisia digitaalisia malleja /4/.



KUVA 1. Barcol-kovuusmittaus /3/

Mittarin tukijalat ja painantaneula asetetaan mitattavalle komposiittialustalle siten, että painantaneula painaa kohtisuoraan pintaa vasten ja kahvasta painetaan neula komposiittiin (kuva 1), kunnes mitta-asteikko antaa maksimilukeman, joka on komposiitin kovuus ja joka indikoi hartsin kovettumisastetta. Menetelmä vaatii kalibroinnin erilaisille hartseille. Itse kovuudenmittausmenetelmä on standardoitu mm. ASTM-standardissa D 2583 /5/. Komposiittien epähomogeenisuudesta johtuen suositellaan tehtäväksi 5-29 mittausta riippuen mitattavan

materiaalin kovuustasosta, jotta saadaan luotettava mittauskeskiarvo. Kovemmat materiaalit vaativat vähemmän toistomittauksia. /5/

Barcol-mittaus saattaa jättää pienen mittausjäljen komposiittipintaan. Mittaus on pistemäinen mittaus näytteen pinnasta ja mittaus voidaan tehdä missä mittarin asennossa tahansa sellaiselta alueelta, johon mittari ja mittaajan käsi mahtuvat. Mittaukseen liittyviä virhelähteitä ovat mm. alustan epätasaisuus ja silmämääräisesti luettavan kovuuden lukematarkkuus. Mittaus ei ole luotettava alle 1,5 mm paksuista näytteistä, alle 3 mm:n etäisyydellä näytteen reunasta tai toisesta mittauspisteestä. /5/

Samaan mittausperiaatteeseen perustuvia muita mittauslaitteita, kuten Shore D -mittaria, voidaan ilmeisesti käyttää samalla tavalla välillisesti hartsin silloittumisasteen arviointiin, jos mittarin kovuuslukema on kalibroitu etukäteen hartsin eri silloittumisasteen kanssa.

Kaupalliset Barcol-mittarit

Manuaalisia Barcol-mittareita valmistavat mm. Barber-Colman Co. (Yhdysvalloissa) ja Elcometer ja toimittavat mm. InstruCon Inc. Yhdysvalloissa ja Sheen Instruments Iso-Britanniassa. Digitaalisia mittareita toimittaa mm. Qualitest International Inc. (mm. mittarimalli HPE II).

3.3 Sähköisten ominaisuuksien mittaaminen

3.3.1 Johtokyvyn mittaaminen

Johtokyvyn mittaamista on käytetty epäsuoraan komposiittihartsien kovettumisasteen mittaamiseen pitkän ajan. Menetelmä perustuu hartsissa olevien johtavien ionien (usein epäpuhtauksien, kuten epoksihartsissa olevien kloridien) johtokyvyn mittaamiseen. Hartsin kovettuessa ionien liike pienenee ja johtokyvyn alenemisesta voidaan päätellä hartsin kovettumisaste. /6/

3.3.2 Dielektrometria

Mittausperiaate

Dielektrometria on mittaustekniikka, jossa komposiittirakenteen osan kahdelle pinnalle asetettujen elektrodien väliin johdetaan vaihtojännite ja elektrodien väliin muodostuva virta mitataan. Komposiittirakenteen dipolit (esim. kemiallisten yhdisteiden varaukselliset osat) pyrkivät orientoitumaan sähkökentässä ja varaukselliset ionit liikkumaan siinä. Tunnettaessa vaihtojännitteen taajuus sekä elektrodien etäisyys ja pinta-ala, voidaan mittausvasteen (virran) amplitudin ja vaiheen muutoksista laskea materiaalin dielektrisiä ominaisuuksia, kuten dielektrisyysvakio ja -häviö. Näiden ominaisuuksien muutoksista voidaan päätellä hartsin kovettumisaste. /6/

Useimmilla polymeereillä sähköinen resistiivisyys on polymeerin viskositeetin ja kovettumisasteen funktio ja resistiivisyys voidaan laskea dielektrisyyshäviöstä, joka saadaan laskettua mittaamalla amplitudin ja vaiheen muutokset. Dielektrisyyshäviö muodostuu dipolikomponentista ja ionikomponentista. /6/

Pinta-antureissa elektrodien viivanleveys ja viivaetäisyys määrittelee sen, kuinka syväälle materiaaliin sähkökenttä ulottuu eli sen, kuinka syväältä materiaalista mittausvaste tulee. Esim. Micromet Instrumentsin MS-25 pinta-anturin viivaleveys ja -etäisyys ovat 25 mikrometriä ja mittausvaste tulee noin 25 mikrometrin syvyydeltä mitattavasta hartsista. /6/

Dielektristen ominaisuuksien mittaamisessa tuotanto-olosuhteissa saattaa esiintyä sähköisiä häiriöitä ja laitteita on suojattava esim. käytettäessä johtavia kuituja rakenteissa /2/. Anturin on oltava eristetty sähköä johtavista pinnoista ja antureiden suojana käytetäänkin PTFE-kalvoja tai lasikuitupintoja, joiden läpi hartsi pääsee virtaamaan. /1/

Mittaustekniikan yhtenä ongelmana on se, että hartsin viskositeetin ja silloittumisasteen päättelyminen kapasitanssi- ja dielektrisyyshäviömittauksen tuloksista ei ole aina yksinkertaista /2/. Ilmeisesti menetelmässä täytyy tehdä kalibrointimittauksia, joissa mitatun dielektrisyyshäviön yhteys silloittumisasteeseen tai viskositeettiin määritetään. Laboratoriomittauksissa on käytetty ohuiden (noin 30 mikrometriä) kalvojen silloittamista UV-valolla ja silloittumisasteen mittaamista FTIR-tekniikalla dielektrisyysmittauksen rinnalla. Tuloksista muodostetaan logaritminen resistiivisyys silloittumisasteen funktiona, jota käytetään kalibrintisuorana. /6/

Dielektrometrian turi liitetään osaksi komposiittirakennetta tai asetetaan sen päälle hartsin valutilanteessa. Anturia ei voi käyttää sähköä johtavien hiilikuitujen tai grafiitin kanssa kontaktissa, vaan anturi on silloin suojaputkessa, johon hartsin täytyy päästä. Tällöin hartsin on oltava myös hyvin juoksevaa, jotta se täyttää suojaputken. Siten aivan hartsivalun alussa hartsin viskositeetin mittaaminen on hankalaa. /2/

Dielektrometrisiä mittauksia on kehitetty ja tutkittu UV-kovetettavilla epoksi- ja akrylaattihartseilla. Mittaustekniikkaa on suositeltu käytettäväksi mm. UV-kovetettavien pinnoitteiden, komposiittien ja liimojen kovettumisasteen mittaamiseen. /6/ Lisäksi dielektrometrimittaus sopii puristusmuovattavien ureaformaldehydi-hartsien (UF) kovettumisasteen mittaamiseen, mutta puristusmuovauksessa fenoliformaldehydi-hartsien (PF) reaktiotuotteet häiritsevät mittausta ja silloin on käytettävä muita menetelmiä /7/.

Kaupalliset mittauslaitteet

Kaupallisia dielektrometrejä on olemassa. Kaupallisilla laitteilla on joissakin mittauksissa havaittu helposti hartsin alhaisimman viskositeetin esiintymiskohta ja lähes täydellisen silloittumisen kohta. Ongelmia on ollut viskositeetin ja silloittumisasteen aikariippuvuuden tarkassa mittaamisessa. Siten menetelmä sopii kyllä silloittumisen tarkkailuun, mutta ei välttämättä sen ohjaamiseen. /2/

Dielektrisiä antureita ja mittauslaitteita valmistaa mm. Micromet Instruments Inc. Yhdysvalloissa. Anturit ovat kokoluokaltaan noin 0,15 mm paksuja ja anturin pinta-ala on 2,5 cm x 1 cm. /2/ Mm. Micromet Instruments valmistaa antureita, jotka voidaan joko asentaa molemmin puolin mitattavaa rakennetta (ns. bulk field -tyyppi) tai pinta-antureita, jotka asennetaan vain yhteen mitattavan rakenteen pintaan (ns. fringe field -tyyppi). Kuvassa 2 on esitetty vasemmalla Micrometin pinta-antureita ja oikealla hartsiin valettavia antureita. /6/ Joissakin anturityypeissä on mukana termopari lämpötilan mittaamista varten ja Micrometin mittauslaitteisiin voidaan kytkeä myös analogisia antureita (esim. J- ja K-tyypin termopareja tai paineantureita). Bulk field -anturi voi olla myös yhden elektrodin sisältävä malli, jolloin toisena elektrodina voidaan käyttää komposiittivalumuotin vastakkaista seinämää elektrodin edessä. Anturi voidaan viedä jopa 30 metrin etäisyydelle signaaligeneraattori-detektori-yksiköstä. /8/

Netzsch valmistaa dielektrometrialaitteistoja, joissa käytetään mm. Micromet Instrumentsin antureita. Netzschin dielektrometrialikoimassa on tuotteita erikseen eri tyyppisiin tarkoituksiin, mm. alipaine-hartsivalun monitorointiin, komposiiteille, UV-kovetettaville hartseille, maalien kovettumisen tarkkailemiseen jne. /8/

Yksi laitteistovalmistaja on Signature Control Systems Inc. (USA), joka valmistaa laitteistoja mm. muottivalujärjestelmiin liitettäväksi. Yritys valmistaa myös mittaustantureita. Silloittumisasteen mittausrjestemät sopivat erityisesti muottivalujärjestelmiin, joissa anturit asetetaan muotin sisäpintaan ja ovat siten toistuvasti käytettävissä silloittumisen monitorointiin. Järjestelmien sanotaan sopivan myös sähköä johtavien lujiterakenteiden silloittumisen mittaamiseen. Osa Signature Control Systemsin järjestelmistä on ilmeisesti myös resistanssia tai impedanssia mittaavia. /9/

Laitteissa käytettävät vaihtojännitteen taajuudet ovat valittavissa kymmenistä hertseistä gigahertzeihin saakka. /2/



KUVA 2. Dielektrisiä antureita (Micromet Instruments Inc.). Vasemmalla pinta-antureita ja oikealla hartsiin valettavia antureita. /8/

3.3.3 Aika-alue-reflektometria

Mittausperiaate ja sovelluksia

Aika-alue-reflektometria (time-domain reflectometry, TDR) on tekniikka, jossa mitattavaan materiaaliin kiinnitetyn anturin kautta lähetetään nopea jännitepulssi, joka sisältää useita taajuuksia yhtä aikaa. Materiaalista heijastunut signaali mitataan joko ajan funktiona tai taajuutena. Heijastuneen signaalin avulla voidaan päätellä materiaalin silloittumisaste. Menetelmä on dielektrometrian muunnos, jota käytetään esimerkiksi maanalaisten sähkökaapelien vaurioiden tarkastamiseen. /10/ Tätä käyttötarkoitusta varten on olemassa kaupallisia laitteita yleisesti saatavana ja laitteet voivat soveltua myös hartsien silloittumisen mittaamiseen, kun mukaan liitetään oikean tyyppinen mittaustanturi.

Mittauslaitteisto käsittää esim. HP54750-oskilloskoopin, jolla tuotetaan 20 GHz:n taajuinen 35 millisekunnin jännitepulssi 50 ohmin signaalijohtoon, joka on valettu tutkittavaan komposiittirakenteeseen. Signaalin mittaus tapahtuu tietokoneella. Kannettava yksikkö voi käsittää esim. Hyperlabs HL1500 TDR -lähteen ja detektorin, jolla tuotetaan 2 GHz:n taajuinen 200 millisekunnin pulssi. Signaalijohdon päässä on kondensaattorianturi, josta lähtee magneettikenttä tutkittavaan komposiittiin ja anturin vasteen perusteella mitataan muutoksia hartsin permittiivisyydessä, kuten dielektrometriassakin. /10/

Hager mainitsee menetelmän eduksi sen, että mittausanturit ovat pieniä, hartsista mitataan hartsin polaarisien ryhmien ominaisuuksia eikä esim. epäpuhtausionien liikkuvuutta, mikroaaltotekniikan luotettavuus tehdaskäytössä ja mahdollisuus mitata rakenteen vaurioita myös komposiittirakenteen ollessa käyttökohteessaan. /10/

Hager mittasi epoksihartsin kovettumista 4 pikofaradin kapasitiivisella anturilla. Mittauksesta saatiin häviömoduli ja taajuus ajan funktiona. Laboratoriokalibroinnilla mitattiin viskositeetin muutos taajuuden funktiona samoissa olosuhteissa reometrillä. Lisäksi mitattiin epoksihartsilla esi-meytetyn hiilikuitulaminaatin silloittumista 0,9 mm:n mikromekaanisella anturilla kuumennusohjelman mukaisesti. Anturi suojattiin lasikuidulla, jotta sillä ei ole kontaktia hiilikuituun. Viskositeettimittauksesta laskettu ennustettu viskositeetti ja mitattu viskositeetti vastasivat hyvin toisiaan. Käyttämällä jännitesignaalin amplitudin muutosmittausta ajan funktiona pystyttiin liittämään permittiivisyyden ja amplitudin muutokset hartsin kovettumisasteeseen. Kalibroititekniikkana laboriomiittauksissa oli FTIR-mittaus, jossa mitattiin epoksiryhmän absorptiota alueella 906 (1/cm). /10/

Mittausanturit

Aika-alue-reflektometriassa käytettävät mittausanturit ovat sylinterimäisiä tai litteitä kapasitiivisia antureita. Anturit suunnitellaan siten, että niissä on sopiva impedanssi ja kapasitanssi halutulle käyttötaajuudelle. Eri anturigeometrioita on olemassa. Koaksiaalinen anturi saadaan 0,9 mm:n kaapelista poistamalla pintaeriste osalta matkasta anturin päästä ja liittämällä päähän suojus, joka päästää valettavan hartsin kosketukseen kaapelin kanssa. Kemiallisella etsauksella tai pinnoituksella voidaan tehdä muita koaksiaalisia anturimalleja. /10/

Litteä johtoanturi on helpoin ratkaisu halvan hintansa ja helpon valmistettavuuden vuoksi. Sekä anturi että kaapelointi painetaan elektroniikan piirilevyyn ja antureita voidaan valmistaa helposti suurina sarjoina leikaten sitten yksittäiset anturit piirilevystä irti. Anturin pinta-ala on 5 x 10 mm ja keskellä on tuntoelektrodi, jossa on hammasmaiset levennykset sivuille pinta-alan lisäämiseksi ja ympärillä on signaalijohto, jolla jännitepulssi tuodaan hartsiin. Anturiin kiinnitetään koaksiaalinen kaapeli, jolla jännitepulssi ja anturin signaali kulkevat jännitegeneraattori-tietokoneyksikön välillä.

Anturit jäävät komposiittiin pysyviksi. Antureita on mahdollisuus pienentää edelleen eri valmistustekniikoita käyttämällä. /10/

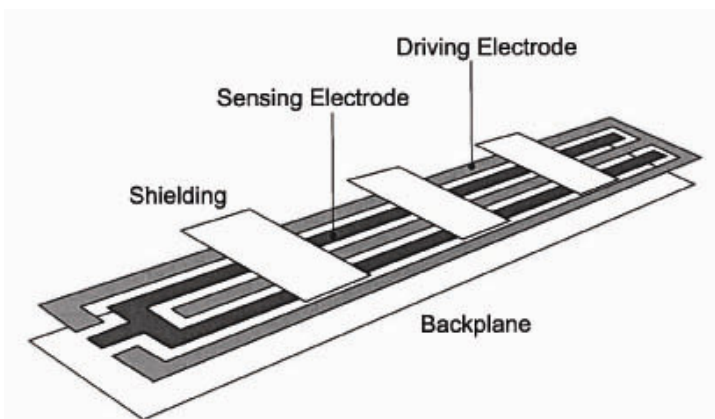
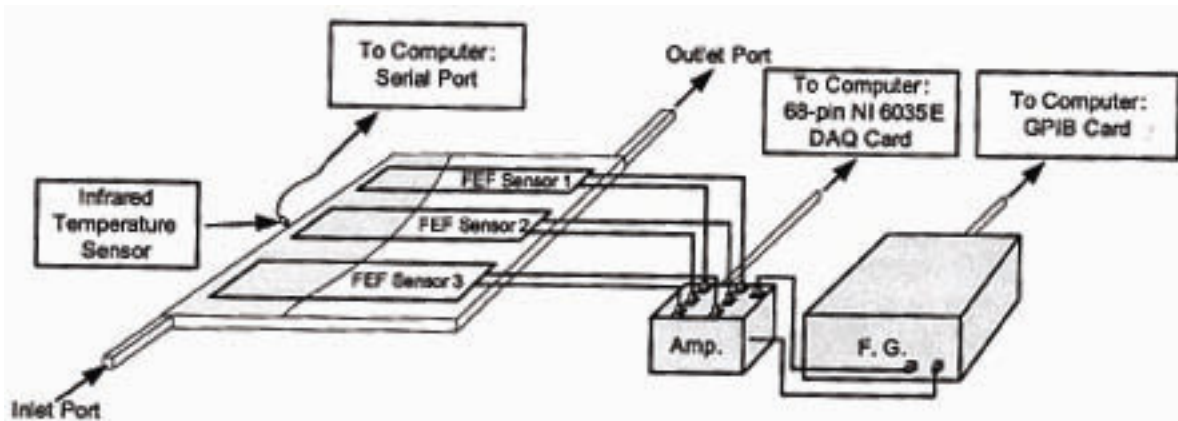
Liikuteltavia TDR-signaaligeneraattoreita ja mittauslaitteita valmistavat mm. Megger Group Inc. (USA), InterEng GmbH (Saksa), Fluke ja useat muut sähkölaitevalmistajat. Kapasitiivisia antureita on saatavana kaupallisina tuotteina ja eri valmistajia ovat mm. Lion Precision Inc. (USA), Feteris Components B.V. (Alankomaat) ja Physik Instrumente (Saksa).

3.3.4 FEF-anturimenetelmä

FEF-antureita (fringing electric field sensors) on käytetty alipainehartsivalun (VARTM) muotin täyttymisen (hartsirintaman etenemisen) ja silloittumisen mittaamiseen. Menetelmää on kokeiltu tuotantokokoisille valukappaleille. FEF-anturit ovat mekaanisesti joustavia ja optisesti läpinäkyviä. Anturit eivät jää hartsiin, vaan ne teipataan muotin pintaan ja voidaan käyttää uudelleen. Antureilla ei ole suoraa kontaktia hartsiin. Muotin täytyttyä dielektrometrimittausta FEF-antureilla käytetään silloittumisasteen mittaamiseen. Kokeilussa on käytetty polyesterihartsia ja anturit sopivat sekä lasi- että hiilikuituvahvisteisten komposiittirakenteiden kanssa käytettäväksi. Hartsin silloittumisen aikana hartsin dielektrinen permittiivisyys muuttuu ja se näkyy mittauselektrodin kapasitanssin ja konduktanssin alenemisena. Muotin täyttymisen aikana mitataan antureiden vahvistusta ja vaihetta 1 kHz:n taajuudella. Täyttymisen jälkeen mittausantureiden vahvistusta ja vaihetta mitataan joillakin määrätyillä taajuuksilla alueella 50-1000 Hz. Antureiden vahvistus kasvaa hartsirintaman edetessä muotissa. /11/

Mittausjärjestely ja FEF-anturin rakenne ovat kuvassa 3. Mittausjärjestelmään kuuluvat FEF-anturit, funktiogeneraattori, jolla annetaan herätesignaali anturin ohjauselektrodiin (driving electrode), signaalivahvistin ja tietokone mittauselektrodin (sensing electrode) jännitteen vaiheen ja vahvistuksen mittaamiseksi. Lämpötilan mittausanturi on mukana, koska permittiivisyys on myös lämpötilan funktio. Anturirakenne voidaan rakentaa kupariteipistä muovikalvolle käyttämällä taustana lisäksi hopeaoksidikalvoa (tyyppiä AgHT-4) PET-kalvon päällä. Rowe kuvaa anturin rakenteen tarkasti artikkelissaan. Anturi on 26 cm pitkä ja 6,4 cm leveä. Anturit ovat hyvin taipuisia ja niitä voidaan käyttää eri muotoisilla pinnoilla. /11/

Menetelmän käyttäminen vaatii työtilan eristämistä niin, että ympäristön sähköiset häiriöt, erityisesti 60 hertsin taajuinen ympäristöstä tuleva häiriö, saadaan minimoitua. /11/



KUVA 3. FEF-anturin rakenne. /11/

3.3.5 Resistanssimittaus

Mittausperiaate ja sovelluksia

Muottivalun hartsirintaman etenemisen ja hartsin kovettumisen monitorointiin on käytetty tasajänniteresistanssin mittaamista siten, että hartsivalumuottiin on asetettu ristikkäiseen muotoon termoparijohtimien muodostama verkosto. Verkosto voidaan tehdä kahdella eri tavalla: tehdään kaksi päällekkäistä yhdensuuntaisten termoparijohtojen muodostamaa viivastoa (joiden välissä on esim. ohut lasikuitumatto eristeenä) lasikuituvahvisteeseen sisään tai tehdään valumuotin pintaan yksittäisten anturien pistemäinen verkosto. Mittaus perustuu siihen, että hartsin kastellessa kaksi samassa mittauspisteessä olevaa johtoa muodostuu sähköinen yhteys kahden pisteen välille ja sähköisen yhteyden aiheuttama jännitehäviö tai resistanssin muutos mittauspiirissä havaitaan. Tällä perusteella tiedetään, missä kohtaa hartsirintama etenee. Resistanssin mittaus vastaa dielektrometrin mittausta ionikomponentin mittaamista dipolikomponentin sijaan. /12/

Eri mittausverkostoilla on hyvät ja huonot puolensa. Päällekkäisen viivaston kanssa voidaan mitata useita mittauspisteitä pienellä mittauskanavien lukumäärällä mutta menetelmä on huono, jos hartsi ei ole sähköä johtavaa. Lisäksi verkosto pitää tehdä jokaiselle kappaleelle erikseen eikä hartsin viskositeetin muutosta voi mitata. Lisäksi oikosulut aiheuttavat vääriä lukemia. Pistemäisen verkoston käyttö valumuotin pinnassa vaatii mittauskanavan jokaiselle anturille, mutta myös hartsin viskositeettia voidaan mitata. Viskositeettimittaus voidaan yhdistää hartsin kovettumisasteen laskentaan. Lisäksi samalla mittausverkostolla voidaan mitata jokaisesta valukappaleesta hartsirintaman etenemistä ja hartsin viskositeetin muutosta. /12/

Resistanssimittausta epoksihartsikomposiittirakenteiden korjaamislaminoinnilla on käyttänyt myös Buczek, joka käytti yhtenä edullisena resistanssianturina termoparijohtoja, joiden päät oli leikattu auki. Toisena anturityyppinä oli korjattavaan komposiittirakenteeseen lujitteeksi jäävät kaksi hiilikuitumattoa yhdensuuntaisesti asennettuna. Kolmas resistanssimittaus tehtiin kytkemällä korjattavan komposiittirakenteen hiilikuitulujite johdolla toiseksi elektrodiksi ja korjauspaikkakomposiitin hiilikuitumatto toiseksi. Kaikki menetelmät osoittautuivat käyttökelpoisiksi hartsin kovettumisen arvioimisessa. /13/

Buczekin käyttämässä menetelmässä, missä kytkettiin materiaalin hiilikuitumatot elektrodeiksi, pidettiin erittäin hyvänä sitä, että jos korjattavassa rakenteessa on jäljellä silloittumattomia osia missä tahansa kohdassa, hiilikuitumatto antaa alhaisen resistanssiarvon ja tiedon, että osa korjattavasta komposiitista ei ole kovettunut loppuun, ja kun resistanssi on täysin silloittuneen rakenteen resistanssitasolla, missään kohdassa, missä on hiilikuitulujitemattoa, ei enää ole kovettumatonta hartsia. Usein yksittäisten mittausanturien käytöllä ei voida kattaa koko komposiittirakennetta niin hyvin, kuin kytkemällä itse rakenteen hiilikuitulujite elektrodeiksi. On huomattava, että erillisten hiilikuitulujitemattojen ollessa kosketuksissa toisiinsa, oikosulku tekee menetelmästä käyttökeltottoman. /13/

Kaupalliset mittauslaitteet

Resistanssimittauslaitteistosta on tehty hiilikuitulujitteisten epoksihartsikomposiittien korjaussilloittamista varten kannettava laitteisto. Laitteiston valmistaja on Aerospace Service & Controls (ASC). Laitteessa on neljä kuumennusmattoa (laajennettavissa 16:een), venturivakuunit alipaineen kehittämistä varten, 4 resistanssimittauskanavaa, 18 tyypin J termoparianturia, tietokone, kosketusnäyttö, näppäimistö, tiedontallennusasemat ja tulostin. /13/ Kannettava laitteisto on kehitetty ilmeisesti 1990-luvun lopussa eikä laitteiston täysin kaupallisesta versiosta tai päivitystilanteesta ole tietoa.

Yhdysvaltalainen Signature Control Systems Inc. valmistaa resistanssi- ja impedanssimittaukseen perustuvia kaupallisia mittausrjestelmiä, joilla voidaan monitoroida ja säätää komposiittirakenteiden silloittumista. /14/

3.3.6 Pietsosähköiset anturit

Pietsosähköisten anturien mittausperiaatteena on, että anturiin kohdistuva mekaaninen muodonmuutos aiheuttaa anturin sähköisten ominaisuuksien muutoksia. Muutokset voidaan mitata hartsin silloittumisasteen funktiona ja sen jälkeen mitata silloittumisastetta pietsosähköisellä anturilla. Mm. hartsin kimmokertoimen, massan ja vaimennuksen muutokset heijastuvat anturin kapasitanssiin, induktanssiin ja resistanssiin. /1/

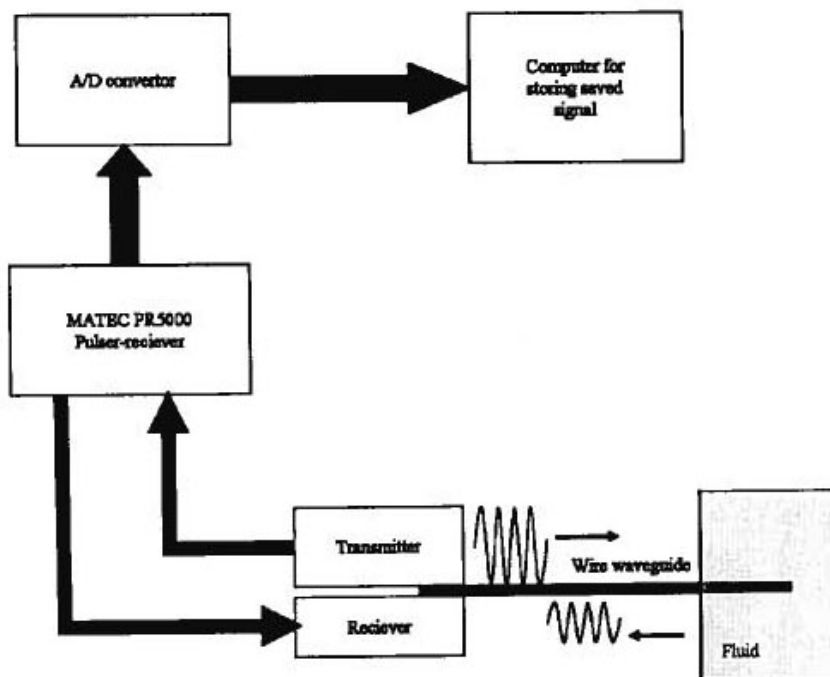
3.4 Akustiset menetelmät

Akustisista menetelmistä ultraäänen käyttö perustuu ultraäänen etenemisnopeuden ja heijastumisen mittaamiseen materiaaleista. Ultraäänimittauksen tulokset korreloivat usein jollakin tavalla silloittumisasteen, huokoisuuden, viskositeetin tai muiden komposiittirakenteiden ominaisuuksien kanssa. Ultraäänimittauksia käytetään myös vaurioiden havaitsemiseen ja kuitujen tilavuusosuuden mittaamiseen laminaateista. /2/ Ultraäänimittauksilla on havaittu mm. epoksihartsin kimmokertoimen muutosta hartsin lasittumispisteessä /15/. Epoksihartsin kovettumisenaikaisen ultraäänimittauksen ja mekaanisten ominaisuuksien välillä voi olla erittäin hyvä korrelaatio, mikä tukee ultraäänimittauksen käyttöä korvaavana menetelmänä ainetta rikkoville menetelmille tuotannonjälkeisessä rakenteiden laaduntarkkailussa ja lujuuden arvioinnissa. /1/

Ultraäänileikkaussignaalin (torsional mode) käyttö silloittumisasteen mittaamiseen on myös mahdollista. Leikkaussignaali on herkempi silloittumisasteen arviointiin silloittumisreaktion loppupuolella kuin alussa. /1/

Ultraääntä on käytetty mm. hartsivalumuotin täyttymisen ja polyvinyyliesterihartsin kovettumisasteen mittaamiseen 0,5 MHz:n taajuisella leikkaussignaalilla, joka voidaan johtaa komposiittirakenteeseen tai valumuottiin esim. 0,5 mm:n halkaisijaisella kuparijohtimella. Laboratoriokokeessa tuotettiin pulssintuottajalla (MATEC PR5000 Pulser-receiver) leikkaussignaali, joka johdettiin kahdella 0,5 MHz:n pietsosähköisellä muuntajalla (Panametrics V151 Videoscan Y-Cut; PZT shear wave probe) kuparijohtimeen. Toinen muuntaja oli

signaalilähteenä ja toinen vastaanottajana. Hartsirintamasta heijastunut äänisignaali muutettiin A/D-muuntimella (National Instruments PCI 5102) digitaaliseksi ja signaalin kulkuajasta laskettiin hartsirintaman etenemiskohta. Mittausjärjestely on esitetty kuvassa 4. Muotin täytyttyä saman signaalin amplitudia käytettiin hartsin silloittumisen mittaamiseen. Silloittumisen mittaamisessa mittaussignaali heijastuu kuparijohtimessa takaisin siitä kohdasta, jossa johdin kohtaa hartsirintaman. Silloittumisen edetessä signaalin amplitudi kasvaa ja amplitudin tasaantumisesta voidaan todeta ainakin silloittumisen päättyminen. Silloittumisasteen mittauksen erottelukyky jää epäselväksi Kartikin tutkimuksessa. /16/



KUVA 4. Ultraäänen käyttäminen hartsirintaman paikan ja hartsin silloittumisasteen mittaamisessa. /16/

Akustisella emissiolla voidaan tarkkailla silloittumisen jäähtymisvaiheita ja havaita esim. komposiittien murtumistilanteita lämpöjännityksen vuoksi. Ongelmia syntyy mittauksissa, kun erilaiset silloittumisessa muuttuvat ominaisuudet vaikuttavat yhtä aikaa. Silloin voi olla vaikea määrittellä, mistä ilmiöstä akustisella emissiolla saadut mittaustulokset johtuvat. /2/

Ultraääntä tai akustista emissiota ei ole otettu laajaan käyttöön silloittumisasteen mittaamenetelmänä, vaikka ultraääni on jo luotettavaa tekniikkaa ja ultraäänitekniikka on yksi hyvin potentiaalinen silloittumisasteen mittaamisen menetelmä, jolla voi olla merkittäviä muoviteollisuudessa. /1, 2/

3.5 Kuituoptiset mittausmenetelmät

Kuituoptisia mittauksia on käytetty laajasti lujitemuovirakenteiden käytönaikaiseen kunnonvalvontaan ja niiden käyttöä on laajennettu silloittumisasteen mittaamiseen. Hartsissa olevaan valokuituun kohdistuu jännityksiä silloittumisen aikana ja jännitysten muutos voidaan yhdistää silloittumisasteeseen. Valokuitujen käytön ongelmia ovat mm. kuitujen päiden oikea asettelu toistensa suhteen ja kuitujen kytkentäpäiden löytäminen mittauslaitteiden kytkentää varten komposiittiosan laminoinnin ja prosessoinnin jälkeen. /1/

Hartsien kovettumisasteen mittaamisessa tavalliset kuituoptiset menetelmät perustuvat Fabry-Pérot-anturiin tai Braggin hila-anturiin. Fabry-Pérot-anturin käytössä silloittumisasteen mittaamiseksi mitataan silloittumisen aikaisen jännityksen aiheuttamaa pituuden muutosta kahden valokuiden päiden välillä. Muutos ei riipu silloittumislämpötilasta alueella 38-180 °C, jos valokuidut ja niitä yhteen kiinnittävä kapillaari ovat kvartsisia. Hartsin jännityksen ja silloittumisasteen välillä on yhteys, jota käytetään hyväksi mittauksessa. Braggin hila-anturi on hyvin herkkä lämpötilan muutoksille, koska lämpötila vaikuttaa sekä taitekertoimeen että valokuidussa olevan hilakuvion mittoihin. /1/

Molempien tyyppisiä antureita on käytetty mm. epoksihartsien ja -liimojen sekä hiilikuitulaminaattien silloittumisasteen mittaamiseen jännitystä mittaamalla. Silloittumisvaiheet on pystytty tunnistamaan mittaustietojen pohjalta. /1/

Hartsin taitekertoimen mittaaminen valokuidun avulla on epäsuora silloittumisasteen mittausmenetelmä, joka perustuu siihen, että hartsin taitekerroin muuttuu silloittumisen aikana. Menetelmä on yksinkertainen, edullinen ja tehokas. /2/ Taitekertoimen mittaamisessa valokuituanturit ovat heijastus-, transmissio- tai seisova-aaltoantureita (evanescent wave). Heijastusanturi on valokuidun pää hartsissa. Valokuidusta tuleva valo heijastuu hartsista takaisin valokuitua pitkin ja jokin valon ominaisuus mitataan. Transmissioanturissa kahden valokuidun päät ovat hartsissa vastakkain ja hartsin virtaa valun aikana valokuidun päiden väliin. Valo kulkee pienen matkan hartsissa kuidusta toiseen vuorovaikuttaen hartsin kanssa ja kuidun päässä jokin valon muuttuva ominaisuus mitataan. Seisova-aaltoanturissa valokuidun suoja-pinnoite on poistettu lyhyeltä matkalta ja valo vuorovaikuttaa tällä matkalla seinämän toisella puolella olevan hartsin kanssa. Muutoksia valon ominaisuuksissa mitataan valokuidun kuljettua kuidun läpi. /1/

Taitekertoimen mittauksessa valokuitu pistetään silloitettavan rakenteen sisälle. Valokuitu asetetaan komposiittirakenteeseen silloittamattoman hartsin sekaan. Valokuituun johdetaan halutun tyyppinen valo. Valokuidun toinen pää johdetaan detektoriin, joka havaitsee toisesta päästä valokuitua pitkin tulevan valon. Detektorina voi ilmeisesti olla esim. valodiodi. Esim. valon määrän muutosta mitataan hartsin silloittumisen aikana kun hartsin taitekerroin lähestyy

valokuidussa olevan valmiiksi silloitetun hartsin taitekerrointa. Havaitun valon määrä pienenee silloittumisen edetessä. /2/

Valokuituantureita on käytetty silloittumisasteen mittaamisen lisäksi mm. lämpötilan, paineen, venymän (rakenteiden sisäisten jännitysten), magneettisten ja kemiallisten ominaisuuksien mittaamiseen, pyörimisliikkeen, värähtelyn, siirtymän, virtaaman ja biolääketieteellisten suureiden mittaamiseen. Suurin osa antureista tehdään venymän ja lämpötilan mittaamista varten. /17/ Kuituoptisia jännitysten mittaamismenetelmiä on käsitelty lisää luvussa 4 kuten kuituoptisten mittausten etuja ja haittojakin.

3.5.1 Taitekertoimen mittaamiseen käytetyt anturit

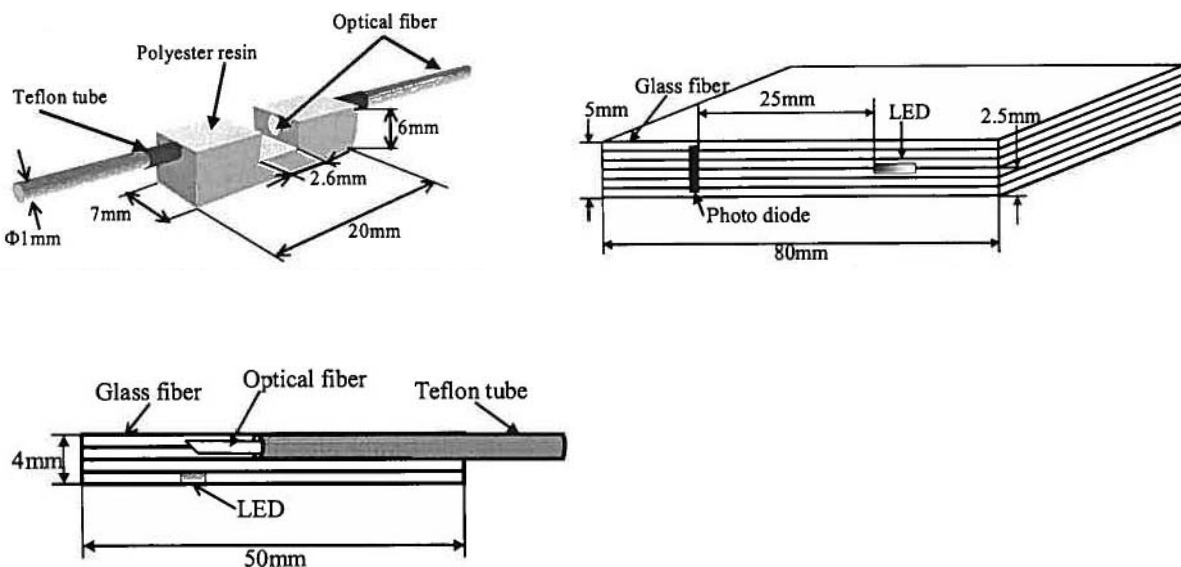
Taitekertoimen mittaamiseksi yhdestä pisteestä on saatavana kaupallisia antureita, mutta ne ovat kalliita ja niitä voidaan käyttää vain kerran hartsiin valettaessa. Antureita valmistaa mm. Photonetics Inc. (Metricor-tuotteet). Photoneticsin antureilla voi mitata yhtä aikaa painetta, lämpötilaa ja taitekerrointa. Kuituoptisten antureiden signaalissa ei ole sähköistä kohinaa ja niiden erottelukyky on noin 1 % koko mittausalueella. Tämänhetkiset kuituoptiset anturit mittaavat kuitenkin taitekerrointa vain arvoon 1,52 asti, kun esimerkiksi epoksihartsin taitekerroin silloittuneena on 1,59. /2/

Anturi, jossa kahden valokuidun osan välissä on silloitettua hartsia, ei vaadi erillistä kalibrointia silloin, kun anturissa oleva hartsia on samaa kuin komposiittirakenteen valmistamisessa käytettävä hartsia. Valolähteenä kuidun toisessa päässä on laserdiodi. Anturissa olevan hartsin sisäisen kokonaisheijastuksen rajakulma muuttuu komposiitin hartsin silloittumisen edetessä. Tämä pienentää sensorille tulevan valon määrää. Silloittumisasteen lähestyessä 100 %:a sensorille tulevan valon määrä lähestyy nollaa. Anturimateriaali on edullista kommunikaatiotekniikassa käytettyä valokuitua, laserdiodeja ja detektoreita. /2/

Hartsin taitekerroin muuttuu 2-3 % silloittumisen aikana. Jos taitekerroinanturilla halutaan havaita epoksihartsin geelitysmispiste (jolloin hartsin taitekerroin on noin 1,57), niin esimerkiksi 100 mikrometrin halkaisijaiseen valokuituun on asetettava noin 0,65 mm:n pituinen silloittuneen hartsin liitos väliin. Hartsiliitosten on oltava mahdollisimman lyhyitä, jotta hartsiliitoksen matkalla ei tapahdu kovin monia valon heijastuksia, joissa voi tapahtua sironthäviöitä. /2/

Epoksihartsin taitekertoimen mittaamiseksi valokuitujen avulla on päällystetty kiillotettuja valokuitupintoja ohuella metallikalvolla, jolloin on saatu seurattua myös epoksihartsien kovettumista taitekertoimen muutoksen avulla. /15/

Todoroki on esittänyt erilaisia mittausgeometrioita valon intensiteetin mittaamiseksi hartsin silloittuessa komposiittirakenteessa. Mittauksessa silloitettiin polyesterihartsia joko yksin tai lasikuitulujiterakenteessa ja käytetyt valokuidut, LED-valolähde ja detektorina toimiva valodiode jäivät silloittuneeseen komposiittirakenteeseen sisään. Siksi nämä komponentit ovat kooltaan pieniä. /18/



KUVA 5. Valon intensiteetin muutoksiin perustuvan hartsin silloittumismittauksen mittausjärjestelyjä. /18/

Todorokin mittauksessa on käytetty kolmea eri mittausjärjestelyä anturien sijoittamisessa hartsiin ja lasikuitulujiterakenteeseen. Mittausjärjestelyt on esitetty kuvassa 5. Ylhäällä vasemmalla on rakenne, jossa vain valokuidut silloittuvat hartsiin ja valokuidun pää suojataan Teflonvaipalla silloittamalla päät etukäteen hartsiliitokseen. Ylhäällä oikealla on järjestely, jossa valoa tuottava LED-lähde silloitetaan valodiodin mukana hartsiin. Alhaalla on järjestely, jossa valoa tuottava LED-lähde silloitetaan lähelle valokuidun päätä. LED-valo kulkee hartsissa sekä lasikuitulujitteessa ja hartsin kovettuessa sen taitekerroin lähestyy lasikuidun taitekerrointa. Siten koko komposiitin läpinäkyvyys valolle kasvaa, jolloin valokuidulle tai -diodille tulevan valon voimakkuus kasvaa. /18/

3.5.2 Taitekerroinmittauksen kehitystilanne

Lujitteen ja hartsin laminoinnissa tuotannon aikana raakahartsia on käytettävissä valmiina. Raakahartsia pitää silloittaa valokuitupalojen väliin ja sitten asentaa valmistettu kuituoptynen anturi valmistettavaan komposiittirakenteeseen haluttuun kohtaan. On ehdotettu, että esi-imeytetyistä komposiittirakenteista voitaisiin uuttaa silloittamatonta hartsia antureiden valmistamiseksi sopivilla liuottimilla. Hartseista ainakin epoksihartsi on suhteellisen homogeenista taitekerroinantureissa käytettäväksi. Epoksihartsiin jää silloitettaessa vähän vikoja, jotka haittaavat valon kulkua anturissa. /2/

Valokuitujen ja hartsianturiosan liittäminen toisiinsa on Vodickan mukaan vaikein tehtävä, osittain epoksihartsin hauraan luonteen vuoksi. Liittämistä varten pitäisi olla olemassa jokin pieni laite, jonka avulla joko valmiiksi silloitettu hartsin kappale liitetään valokuituun tai raakahartsia silloitetaan suoraan valokuituun. Kun anturi on silloitettu ja valmis, koko yhdistelmä asennetaan komposiittirakenteeseen haluttuun kohtaan. Asennuksessa ja sen jälkeisessä komposiittirakenteen käsittelyssä anturi saattaa vaurioitua, jolloin valosignaali valokuidusta katkeaa. /2/

Anturi ja mittaustekniikka koostuvat seuraavista osista: /2/

1. valokuitu (kommunikaatiosovelluslaatua, kulutustarvike),
2. (epoksi)hartsi (kulutustarvike),
3. laserdiodi, jolla saadaan aikaan noin 850 nm:n aallonpituuden säteilyä,
4. valodetektor ja
5. tiedontallennusyksikkö.

Kaikkia tarvikkeita mittaussuomenetelmän rakentamiseksi on saatavana valmiina. Valokuidun hinta on 1-5 euroa/metri /19/.

3.6 Raman-spektroskopia

3.6.1 Mittausperiaate

Raman-spektroskopiassa käytetään laserilla tuotettua UV-säteilyä, jolla hartsissa saadaan aikaan Raman-siirtynyttä säteilyä. Näytteestä emittoituva Raman-säteilyspektri voidaan mitata ja spektrin yksityiskohdat voidaan yhdistää hartsin kemiallisen rakenteen muutoksiin. Esimerkiksi Raman-

spektrin alueen 3004 (1/cm) absorptio pienenee epoksihartsien silloittumisen edetessä. /15/
Polyesteri- ja vinyliesterihartsien kovettumista on tutkittu mittaamalla C=C-kaksoissidokseen liittyvää piikkiä 1620 (1/cm) tai epoksihartsien C-H-piikkiä alueella 2870-3000 (1/cm). /20/

Usean tyyppisiä lasereita käytetään Raman-säteilyn aikaansaamiseen: argonia, kryptonaa, helium-neon-seosta, Nd:YAG-seosta ja diodeja. Eri lähteistä saadaan eri aallonpituuden valoa. /15/

Menetelmän etuina on, että se mittaa suoraan kemiallisia muutoksia hartsissa ja että silloittumisastetta voidaan seurata jopa 98 %:iin asti, mikä on kilpailevilla menetelmillä usein hankalaa. /15/
Raman-spektroskopiämittausten tarkkuus voi olla jopa 1 %:n luokkaa ja vaikka lähes täysin silloittuneessa rakenteessa mittaustarkkuus alenee, sillä ei ole enää merkitystä käytännön sovelluksissa yli 99 %:n silloittumisasteessa. /1/

Menetelmällä on Vodickan mukaan alhainen herkkyys silloittumisasteen mittaamisessa ja se vaatii kallista instrumentointia, mutta joissakin tutkimuksissa on huomattu, että menetelmän kustannuksia voidaan alentaa käyttämällä esim. 200 mikrometrin siikavalokuituja. /2/ Laitteiston hintaa voidaan alentaa käyttämällä silloittamisessa tarvittavana säteilylähteenä samaa laseria, jolla saadaan aikaan Raman-säteily spektrin mittaamista varten. Laser voidaan korvata myös valodiodilla, joka emittoi halutun aallonpituuden säteilyä. Silloittumisessa vaadittava teho on useista milliwateista satoihin milliwatteihin materiaalista ja silloittumispinta-alasta riippuen. Sama teho riittää hyvin Raman-säteilyn tuottamiseen ja Raman-emissiota voidaan tehostaa 1000-10000-kertaiseksi. Siten spektrometrin herkkyyden ei tarvitse olla kovin suuri, mikä alentaa spektrometrin hintaa. Raman-spektrin perusteella laserin toimintaa voidaan säätää silloittumisen aikana esim. muuttamalla tehoa, pulssileveyttä, intensiteettiä tai pulssien kestoja. /20/

Wang on esittänyt UV-kovetettaville liimoille laitteistoa, jossa on laseriodi, josta saatavalla lasersäteellä on alle yhden nanometrin viivanleveys. Lasersäteen halkaisija on 1,5 mm. Säteilidetektorina on yleiskäyttöön tarkoitettu CCD-spektrometri, jossa on dispergoiva hila ja CCD-kenno. Spektrometri mittaa alueen 300-750 nm spektrin alle yhden nanometrin erottelukyvyllä. Yhden spektrin mittaaminen kestää 30 sekuntia. /20/

Lämpökovetettaville epoksihartseille voidaan käyttää 785 nm:n NIR-laseriodia, jonka teho on 600 mW ja viivanleveys alle 0,5 nm. CCD-spektrometri mittaa 750-1050 nm:n alueen spektrin 10 (1/cm):n erottelukyvyllä. Epoksinäyte (pinta-ala 3 x 3 mm) kuumenee noin 80 °C:seen ja 75 minuutin silloittumisen aikana spektri voidaan mitata 3 minuutin välein. /20/

Raman-spektrofotometriä hintaa on alentanut diodilaserien käyttöönotto. Ne ovat edullisia, pienikokoisia ja luotettavia (jopa yli 10000 tunnin käyttöajan omaavia). Tyypillinen laser on nykyään yli 300 mW:n tehoinen suurtehodiilaser, jonka tuottaman valon aallonpituus vaihtelee 630:sta

980:een nanometriin, tavallisesti käytetään 785 nm:n aallonpituutta. Nämä laserit vaativat kuitenkin laitteisiin taajuusstabilisaattorin ja viivanleveyden kaventajan. Laserien viivanleveys on tyypillisesti alle 1 (1/cm). Tällaisten Raman-spektrofotometriä hintaluokka vuonna 2004 oli 10 000-25 000 dollaria. /21/

Detektoreina CCD-kennot ovat korvanneet vanhemmat detektoritekniikat. CCD-kenno havaitsee 400-1100 nm:n alueen säteilyn. Kennojen käyttöönotto on lyhentänyt mittaustiedon käsittelyaikaa. Tyypillinen integrointi-aika on alle 30 s. Raman-mitta-anturissa on kaksi valokuitua, toisella näytteeseen johdetaan laservalo ja toisella Raman-säteily johdetaan detektoriin. Useimpiin tarpeisiin (nestemäisille ja kiinteille näytteille) riittää 6 (1/cm):n erottelukyky. Vaadittaessa korkeampaa erottelukykyä, hinta nousee kalliimman laserin vuoksi. /21/

3.6.2 Kaupalliset Raman-spektroskopialaitteet

Kaupallisia on-line-mittausjärjestelmiä toimittavat ja valmistavat mm. yhdysvaltalaiset Real-Time Analyzers (RTA) ja Enwave Optronics Inc. Real-Time Analyzersin mittauslaitteistoon kuuluu noin 15 kg:n painoinen spektrofotometri valokuitukaapeleineen, jonka avulla mittauspiste voi olla jopa 200 metrin päässä spektrofotometrissä ja tietokoneesta, jolla mittaustiedot käsitellään. Spektrofotometrissä on 1 watin tehoinen 1064 nm:n tai 785 nm:n aallonpituuden tuottava Nd:YAG-laser ja Raman-spektri voidaan mitata alueelta 150-3350 (1/cm). /22/

Enwave Optronicsin kannettavissa laitteistoissa (kuva 4) on esim. 785 nm:n laser, teho voidaan säätää alueella 0-300 mW, detektorina on CCD-kenno, Raman-spektri voidaan mitata alueelta 100-3300 (1/cm) ja laitteiston paino on noin 3 kg. /23/



KUVA 4. Kannettava Raman-spektrofotometri (Enwave Optronics Inc.) /23/

3.7 IR-spektroskopia

FTIR-spektroskopiaa voidaan käyttää valokuitujen kanssa mittaamaan hartsien kemiallisia muutoksia. Esimerkiksi epoksihartseihin voidaan silloittaa fluoridi- tai kalkogenedivalokuituja, kuidun toisesta päästä kuituun syötetään valoa, valon keski-IR-säteily vuorovaikuttaa kuidun rajalla olevan hartsin kanssa aiheuttaen tiettyjen aallonpituuksien absorptiota (alueella 1200-5000 (1/cm)), keski-IR-spektri mitataan kuidun toisesta päästä detektorilla ja tiettyjen spektrin alueiden absorptioon muutokset voidaan yhdistää hartsin kemiallisten ryhmien muutoksiin ja silloittumisasteen muutokseen. /15/

FTIR-tekniikan etuina ovat perinteinen, hyvin tunnettu tekniikka sekä mahdollisuus nopeisiin spektrin mittauksiin (yli 10 spektriä/min) ja silloittumisreaktion vaiheiden tutkimiseen mittaustuloksista. Laboratorion ulkopuolisessa käytössä tekniikan soveltamista rajoittavat mm. kalliit ja hauraat valokuidut. /15/ Joissakin infrapunasäteilyä käyttävissä sovelluksissa tarvitaan hyvin kalliita erikoiskuituja (ryhmän 16 alkuaineita sisältäviä ns. kalkogenedikuituja), jotka läpäisevät IR-säteilyä. /2/ FTIR-spektroskopiaa on käytetty valokuitujen kanssa mm. kuitukelauksessa käytetyn hartsin amiinikonsentraation mittaamiseen tuotanto-olosuhteissa. /1/

Kemometrinen laskentamenetelmien kehittyminen on mahdollistanut NIR-spektroskopian käytön monissa sovelluksissa. NIR-alueella valokuituna voidaan käyttää paremmin tuotantolaitoksiin sopivaa edullista piidioksidivalokuitua./15/ Lisäksi pintaa koskettamattomia NIR-sovelluksia on kehitetty mm. tuotannonaikaiseen on-line-laadunvalvontaan eri teollisuudenaloilla. Esimerkiksi esi-meitettyjen fenolihartsikankaiden hartsipitoisuuden ja haihtuvien aineiden pitoisuuden mittaamiseen on-line-NIR-mittauksella on kehitetty menetelmä. Menetelmässä käytettiin

kemometrisiä laskentamenetelmiä analyysimallin luomiseksi. On-line-laitteisto käsitti kaksi NIR-spektrofotometriä (Brukerin valmistamia malleja), diffuusioheijastusspektrin mittaamista, kullattua peiliä esi-meitytetyn maton alla NIR-spektrin laadun parantamiseksi ja maton mukana liikkuvaa säteilijä-detektoriyhdistelmää. Säteilylähde (volframilanka) oli 17 cm:n etäisyydellä matosta ja diffuusioheijastusspektri saatiin halkaisijaltaan 25 mm:n kokoiselta pyöreältä alueelta. Spektri mitattiin alueelta 4000-12000 (1/cm) erottelukyvyllä 8 (1/cm) ja detektorimateriaalina oli InGaAs. Säteenjakajana oli CaF₂-kide. /24/

Jiangin sovellus ei mittaa suoraan hartsin kovettumisastetta, mutta NIR-tekniikalla voi olla mahdollista mitata vastaavalla tavalla kovettumista, koska spektri kuvaa hartsin kemiallista koostumusta.

3.8 UV-Vis- ja fluoresenssispektroskopia

3.8.1 Fluoresenssispektroskopia: mittausperiaate

Epoksihartsin kovettumista voidaan seurata epäsuorasti fluoresenssisäteilyn intensiteetin muutoksena. Jos silloittamatonta epoksihartsia viritetään UV-valolla, viritystila vapautuu molekyylien liikkeenä, mutta jos hartsi silloittuu samaan aikaan ja molekyylien liike estyy ristisiltojen vuoksi, viritystila vapautuu fluoresenssisäteilyn kautta. Tällöin voidaan havaita hartsista tulevaa fluoresenssisäteilyä. Fluoresenssisäteilyn määrä kasvaa hartsin silloittuessa. Kun hartsi alkaa kovettua, komposiittirakenne täytyy tutkittavalla alueella virittää UV-valon avulla, jotta fluoresenssisäteilyä saadaan aikaan. Virittämiseen sopii valokuitu, joka on valettu komposiittirakenteen sisään tai valokuitu, joka viedään lähelle näytteen pintaa /25/. Menetelmä on siis joko näytettä koskettava tai koskettamaton. Samaa valokuitua pitkin voidaan johtaa fluoresenssisäteily sopivalle detektorille, jonka signaali on verrannollinen silloittumisasteeseen. /15/

Pelkät hartsin komponentit eivät aina ole fluoresoivia, vaan fluoresoivia yhdisteitä, jotka eivät osallistu hartsin silloittumiseen, täytyy lisätä hyvin pieninä määrinä hartsiin, jotta silloittumisasteen seuraaminen tällä tekniikalla onnistuu. Muutkin tekijät, kuin hartsin silloittumisaste saattavat vaikuttaa menetelmällä tuotetun fluoresenssispektrin ulkonäköön. Menetelmän yhdistäminen esi-meitytettyjen komposiittien käyttöön on hankalaa, eikä UV-Vis-tekniikoita ole käytetty laajasti tuotannonaikaiseen seurantaan. /2/ Fluoresoivaa ainetta voidaan lisätä hartsiin 0,001-0,1 massaprosenttia.

Joidenkin aineiden fluoresenssispektri siirtyy aallonpituudeltaan lyhyempään suuntaan silloittumisen edetessä ja kahden aallonpituuden suhdetta mittaamalla voidaan monitoroida hartsin

kovettumisastetta. Tällaista menetelmää on käytetty mm. Spectra Group Ltd:n silloittumisasteen mittausrakenteissa, jotka perustuvat fluoresenssin käyttöön. /26/ Vain yhden aallonpituuden mittaamisessa on ongelmia mm. hartsin geeliytymispisteen jälkeen ja taustan fluoresenssitason muutosten vuoksi. Siten eri aallonpituuksien intensiteettisuhteiden mittaaminen on luotettavampi menetelmä silloittumisasteen arvioinnissa. /25/

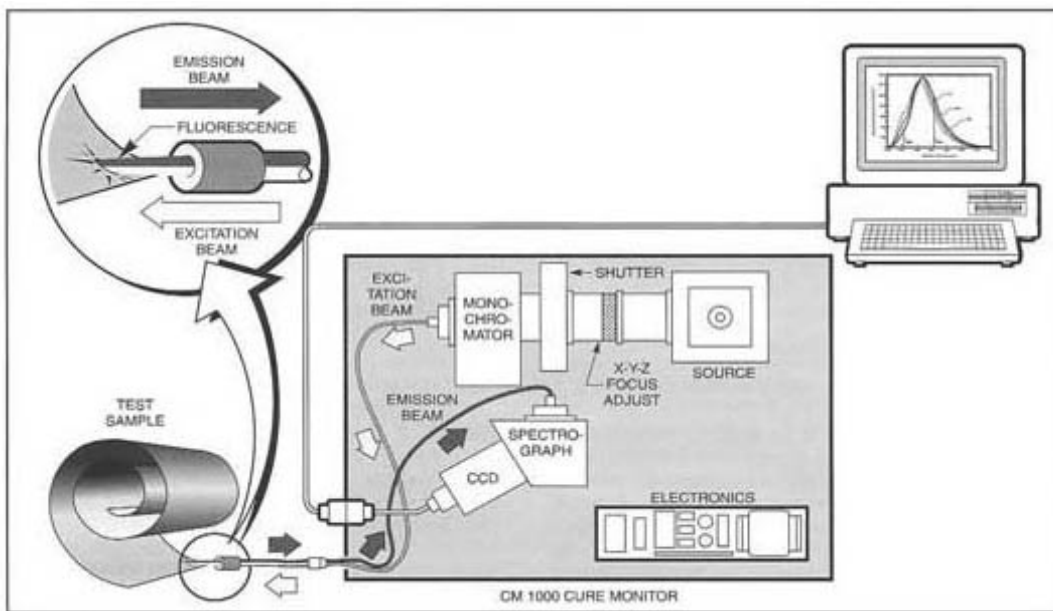
Akryyliimojen kovettumisen mittaamisessa fluoresenssimittauksilla on saatu joissakin tapauksissa enemmän informaatiota silloittumismekanismeista kuin FTIR-mittauksilla. /1/

3.8.2 Kaupalliset fluoresenssimittauslaitteet

Muun muassa Spectra Group Ltd. (USA) myy kaupallista fluoresenssispektrofotometriä (malli CM 1000 Cure Monitor), jota voidaan käyttää hartsien kovettumisasteen mittaamiseen (kuva 5). Fluoresoivina aineina on käytetty Spectra Group Ltd:n kehittämässä sovelluksissa mm. DASB:tä (5-dimetyyli-aminonafhtaleeni-1-sulfonyyli-n-butyylimidia) (0,1 m-%) painomusteessa ja akrylaattipinnoitteessa, kumariinia (0,02 m-%) akrylaattipinnoitteessa ja antrasenyylimidijohdannaisia (0,1 m-%) UV-kovetettavissa epoksisilikonipinnoitteissa. Fluoresenssimittaus kalibroidaan esim. laboratoriossa tehtävien FTIR-mittausten avulla. Kalibroinnin jälkeen silloittumisasteen mittaus fluoresenssianturilla voi tapahtua jopa alle sekunnissa. /26/

Menetelmän ilmoitetaan sopivan hyvin UV-kovetettaville, etyleeni-buteeni- ja lämpökovetettaville hartseille /26/. Blanchardin mukaan fluoresenssimittaus sopii metakrylaatti-, styreeni- ja vinyyliesterihartsien sekä tyydyttämättömien polyesterihartsien silloittumisasteen mittaamiseen /25/.

Mittauslaitteistoon kuuluu tietokoneyksikkö tiedon tallentamiseen ja laskentaan, mittauselektroniikka, joka sisältää UV-valolähteen fluoresenssisäteilyn virittämiseen ja CCD-kennon fluoresenssispektrin mittaamiseen ja kaksinkertainen valokuitu, jolla UV-valo johdetaan mittauskohtaan komposiittirakenteessa ja toisaalta mitataan fluoresenssisäteily. /27/



KUVA 5. Fluoresenssimittauslaitteisto (Spectra Group Ltd.) /27/

3.9 Lämpötila-anturit

Lämpötila-anturit (termoparit) ovat yleisimpiä käytettyjä anturityyppejä silloittumisen arvioimisessa, mutta ne antavat tietoa vain pieneltä alueelta ja niillä havaitaan pääasiassa vain silloittumisessa tapahtuva eksotermien reaktio lämpötilan nousuna eikä voida tavallisesti arvioida silloittumisastetta. Antureita on käytettävä vain kriittisimmillä alueilla silloitettavassa komposiittirakenteessa, ellei halua käyttää suurta määrää antureita. Lisäksi antureiden oikea asentaminen on tärkeää./2/ Lämpötila-antureissa mittausherkyys on usein kääntäen verrannollinen anturin mekaaniseen lujuuteen eli hyvin herkäät anturit ovat hauraita käytössä. /1/

Toisen tyyppisenä lämpötila-anturina on käytetty DSC-kalorimetreissä esiintyvää lämpövuota mittaavaa anturia, joilla mitataan eksotermisen silloittumisreaktion lämpövuoto ajan funktiona ja yhdistetään lämpövuoto silloittumisasteeseen. /2/

Yksi patenteissa /28/ esiintyvä sovellus on ohutkalvolämpövuotoanturi, jolla mitataan anturin läpi kulkeva lämpövuoto jatkuvatoimisessa lujitemuoviputkien valmistusprosessissa, missä lujitenauha kulkee prosessivaiheiden läpi ja nauhaa kuumennetaan samalla silloittumisen aikaansaamiseksi. Pintaa koskettamaton mittaus on tärkeä, koska prosessia ei voi pysäyttää jokaisen mittauksen ajaksi. Lämpövuotoantureina käytetään Omegan valmistamia ohutkalvoantureita, joissa kaksi ohutkalvolämpöpäriä on kiinnitetty Kapton-materiaalista valmistetun levyn pintoihin. Kun levyn termiset ominaisuudet tunnetaan ja lämpöpareilla mitataan lämpötila, voidaan laskea lämpövuoto. /28/

Walshin patentissa lämpövuon mittaus on kytketty prosessiin säätöpiiriksi siten, että lämpövuon mittauksista eri kohdista prosessia saadaan esim. lämpövuon komposiittimateriaalista prosessointiajan funktiona, lämpövuon verrataan aikaisempiin tietokannassa oleviin lämpövuoprofiileihin vastaavalle komposiitille ja siitä päätellään hartsin kovettumisaste ja sen mukaan säädetään esim. tuotantolinjan nopeutta tai joidenkin vaiheiden kuumennusvastuksia. Patentti esittelee vain mittausperiaatteen ja anturityypin. /28/

Lämmönjohtavuuden mittausta voidaan käyttää hartsin silloittumisasteen arviointiin välillisesti. Yleisesti lämmönjohtavuus kasvaa silloittumisen edetessä ja mittaamalla lämpötilaa silloittuvasta rakenteesta eri syvyyksiltä voidaan laskea lämmönjohtavuus, joka korreloi kimmokertoimen ja rakenteen mekaanisen lujuuden kanssa. Saavutettaessa ennalta määrätty lämmönjohtavuus voidaan todeta silloittumisen olevan päätöksessään. Tarkasti ajatellen lämmönjohtavuusmittaus soveltuu vain lasittumispiiristä edeltävään hartsin monitorointiin, mutta se antaa suuntaa antavia tuloksia myös lasimaisesta hartsista. /1/

Omega Engineering Inc. valmistaa erilaisia lämpövuon mittausantureita ja ohutlevyanturit voivat olla esim. 0,25 mm paksuja taipuisia lämpövuonantureita, jotka voidaan kiinnittää erilaisiin mitattaviin pintoihin hartsilla, liimalla tai teipillä tai joilla voi mitata pintaa koskettamattomasti lämpövuon. /29/

MAPE Engineering Switzerland SA (Sveitsi) myy lämpövuon mittaamiseen perustuvia kokonaisjärjestelmiä, joilla voidaan mitata mm. muottivalussa käytettävien komposiittien silloittumista. Järjestelmiin kuuluvat lämpövuon mittausanturit, jotka asetetaan sopiviin kohtiin valumuottia ja jotka kalibroidaan koeohjelmalla eli määritellään, millainen lämpövuon ajan funktiona saadaan onnistuneesta komposiittirakenteen silloittamisesta. Samalla voidaan määritellä silloittamisessa tarvittava lämpötilaprofiili. Käytön aikana lämpövuon muutoksista voidaan päätellä esim. muotin vajaatäyttövikoja ja ohjelmoita muottityökalu aukeamaan automaattisesti silloittumisen päätyttyä. /14/

MAPE:n lämpövuonantureihin kuuluu mm. metallimuotteihin asennettavia antureita, jotka tulevat noin 1 mm:n etäisyydelle hartsista muotin seinämään. Lisäksi tuotteisiin kuuluu alipainehartsivalussa muotin pintaan teipattavia lämpövuonantureita. MAPE Engineering Switzerland SA:n mittausjärjestelmiä käytetään mm. hartsivalussa, pultruusiossa ja puristusmuovauksessa. /30/

4 Komposiittirakenteiden vaurioiden tutkimistekniikat

Komposiittirakenteiden vaurioiden tutkimistekniikoista tässä käsitellään lämpökameramittaus, lasershearografia, ultraäänimittaus, kuituoptisten mittausten käyttö, radiografia, akustinen emissio, holografia, sähköisen potentiaalin muutosmittaus ja äänitarkastus.

Komposiittirakenteiden yleisiä vaurioita ovat huokoisuus, matriisisäröt, kuitu/matriisi-sidoksen vauriot, kuitujen katkeaminen, eri laminaattikerrosten delaminoituminen, vierasesineet komposiitissa sekä epätasainen hartsin tai lujitteen jakautuminen. Käytännössä rakenteiden kokonaisvaltainen tarkastus vaatii aina useamman toisiaan täydentävän menetelmän käyttämistä. /31/

Komposiittirakenteiden jännitysten mittausmenetelmistä käsitellään kuituoptisia menetelmiä ja venymäliuska-antureiden käyttöä jännitysten mittaamisessa.

4.1 Lämpökameramittaukset

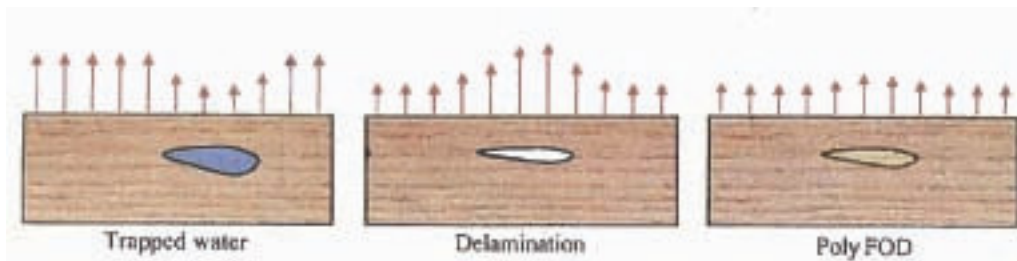
4.1.1 Mittausperiaate ja sovellukset

Lämpökameramittauksia (termografia, thermal wave imaging, TWI) on aikaisemmin pidetty ultraääni (UÄ)- ja röntgentutkimusten täydentäjänä komposiittirakenteiden laaduntarkkailussa, mutta nykyään sitä käytetään jopa ainoana rakenteiden laaduntarkastusmenetelmänä. Siihen ovat vaikuttaneet signaalinkäsittelyn paraneminen, eri mittausstrategioiden käyttömahdollisuus ja mittauksen perusluonteen parempi tuntemus. Menetelmän herkkyyks, nopeus, kaarevien muotojen mittausmahdollisuudet ja pintaa koskettamaton mittaus ovat tehneet menetelmästä yhtä tehokkaan kuin UÄ- ja röntgenmenetelmät. Aikaisemmin mittaustulosten tulkinta vaati hyvin osaavaa ja kokenutta henkilöstöä, mutta mm. infrapunakamerateknologian, tiedonkäsittelyn ja tiedonsiirtonopeuksien parantuminen on muuttanut tilannetta lämpökameramittauksen eduksi. Menetelmällä voidaan tutkia mm. pinnanalaisia iskuvaurioita, kosteuden tunkeutumista rakenteisiin, lujitekuitujen suuntautumista, delaminoitumista, adheesiomurtumia, korjausrakentamisen onnistumista, huokoisuutta, hartsin jakautumista komposiittirakenteessa, näytteen paksuutta ja lämpödiffuusio-ominaisuuksia. /32/

Lämpökameramittauksessa komposiittirakenteen pintaa lämmitetään hetkellisesti valolla ja sen jälkeen mitataan IR-kameralla rakenteen pintalämpötilan muutosta ajan funktiona. Erilaisten rakenteen sisäisten vikojen kohdalla rakenteen pintalämpötila muuttuu eri tavalla kuin vikakohdan ympäristön lämpötila. Vaurion syvyys voidaan mitata siitä, kuinka nopeasti lämpövuon muutos

muun rakenteen suhteen tapahtuu vauriokohdassa. /32/ Komposiittirakenteita voidaan lämmittää myös muilla keinoilla mittausta varten, esim. ilmapuhaltimilla, sähkövastuskuumentimilla tai komposiittien silloittamisessa käytettävien lämpöhuopien avulla /33/.

Kuvassa 6 on joidenkin komposiittirakenteiden vaurioiden aiheuttama pintalämpötilan muutos, kun lämpökameramittauksen kontrasti on parhaimmillaan. Kuvassa vasemmalla laminaatissa oleva vesi aiheuttaa pintalämpötilan laskun, koska vesi imee tehokkaasti komposiittirakenteen lämmön ja vauriokohta näkyy lämpökameramittauksessa viileämpänä kuin ympäristö. Kuvan 6 keskellä oleva delaminoitumisvika näkyy ympäristöä korkeampana pinnan lämpötilana, koska delaminoituneen kohdan kaasutila ei johda lämpöä rakenteen sisälle yhtä paljon kuin vauriokohdan ympäristö. Iskumainen vaurio (kuvassa 6 oikealla), joka aiheuttaa komposiitin sisäisen murtuman, näkyy lievänä pinta-lämpötilan nousuna ympäristöön nähden lämpökameramittauksella. /32/



KUVA 6. Komposiittien joitakin tyypillisiä vaurioita. Punaiset nuolet esittävät suhteellisen pintalämpötilan eron lämpökameramittauksen maksimikontrastivaiheessa. /32/

Menetelmän etuja ovat, että tutkittava rakenne voidaan tarkastaa yhdeltä puolelta (ei tarvita pääsyä molemmiin puolin rakennetta), menetelmä on pintaa koskettamaton, suuria pintoja voidaan tutkia nopeasti (lämpökuvauksen nopeus on noin 20 sekuntia per neliöjalka) ja sekä kaarevia että litteitä pintoja voidaan tarkastaa /32/. Lisäksi laitteistokomponentit (lämpökamera, lämpölamput, tietokone, kuvansiirtäjäohjelmat) ovat yleisesti saatavilla ja suhteellisen edullisia. Lisäksi menetelmä on turvallinen käyttäjille verrattuna esimerkiksi röntgentutkimukseen ja mittaustieto on laadultaan kuvallista, mikä helpottaa tietojen tulkintaa. /33/

Lämpökameramittausten tiedonkäsittelyssä käytetään IR-kameran kuvien signaalirekonstruktioita (TSR, thermographic signal reconstruction), jolla vaurioiden syvyyserotellukykyä ja ääriarvoja voidaan parantaa huomattavasti ja jolla voidaan pienentää mittaustiedon muistitarvetta tallennuslaitteen muistissa. Menetelmän kokeilemiseksi on mitattu mm. hiilikuitulujitteista epoksihartsikomposiittia, johon on tarkoituksellisesti laminoitu ohuita vaahtomuovi- ja Teflonlevyjä. Kolme millimetriä paksu komposiittilevyrakenteen tutkittiin kaupallisella EchoTherm-laitteistolla ja mittaustiedot käsiteltiin TSR-laskentamenetelmällä. Menetelmällä pystyttiin erottamaan hyvin halkaisijaltaan 6,5 mm:n Teflonlevyt rakenteessa noin 1,3 mm:n syvyyserotellukyvyllä. Tiedonkäsittelyssä 5 sekunnin (300 valokuvan) mittaustietojen TSR-laskentakäsittely kestää 1

GHz:n prosessorilla varustetulla tietokoneella noin 10 sekuntia. Shepardin mukaan tiedonkäsittelyohjelmalla erilliset lämpökameran kuvat tutkittavasta rakenteesta voidaan yhdistää tietokoneella siten, että saadaan rakenteen kokonaiskuva, josta voidaan tutkia rakenteen eri alueita. /32/

4.1.2 Kaupalliset laitteistot

Kaupallisissa mittauslaitteissa tyypillinen lämpölähde, jolla kuvattava rakenne valaistetaan, on 2-5 millisekuntia kestävä ksenonsalamavalo. Paksummissa rakenteissa valopulssi kestää hieman pitempään. Lämpökameravaihtoehtoja on useita. Suurten vikojen havaitsemiseen riittää jäähdyttämätön edullinen kamera, mutta pienempien vikojen tutkimisessa käytetään korkealuokkaisia, InSb- tai QWIP-detektoreilla varustettuja kameroita. Yksittäinen lämpökuva voidaan ottaa alueelta, joka on pinta-alaltaan 4,5 x 6 tuumaa - 12 x 12 tuumaa ja kuvausaika on 2-20 sekuntia rakenteen paksuudesta ja termisistä ominaisuuksista riippuen. /32/ Joissakin tapauksissa lämpökameraksi saattavat sopia nykyaikaiset infrapunakiikarit, jos ne ovat kytkettävissä tiedontallennuslaitteisiin. /33/

Kaupallisia laitteita valmistaa mm. Thermal Wave Imaging Inc. (TWI) (Yhdysvallat). Laitteisto on teollisuuskäyttöön sopiva pyörillä liikkuva tai kiinteäksi asennettava yksikkö. TWI:n valmistamia eri malleja ovat mm. EchoTherm ja ThermoScope II. Kuvassa 7 on yksi lämpökameramalli käytössä lentokoneen rakenteen tutkimuksessa (vasemmalla) ja kiinteänä kamerana komposiittiosan tarkastuksessa (oikealla). /32/



KUVA 7. Lämpökameramittaus käytössä rakennetutkimuksessa. /32/

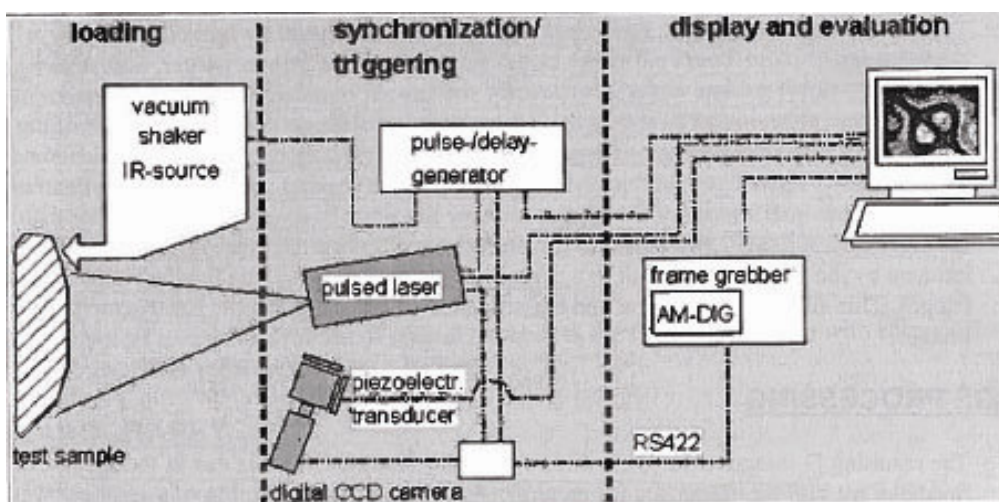
4.2 Lasershearografia (laser shearography)

Mittausperiaate ja sovelluksia

Lasershearografia (tavallisesti shearografia) on näytteen pintaa koskettamaton optinen mittaus, jolla tutkitaan näytteen sisäisiä vikoja, kun näytettä jännitetään staattisesti tai dynaamisesti tietyllä voimalla. Menetelmässä näytteen pinta valaistetaan laajennetulla lasersäteellä ja pinta kuvataan CCD-kameralla, jossa on erityinen optinen leikkauselementti (shearing element). Pinnasta otetaan kaksi sivusuunnassa siirtynyttä kuvaa, joiden sijoittaminen päällekkäin tuo esiin pinnan alaisia vaurioita tai vikoja. Pinnan siirtymä saadaan aikaan jännittämällä pintaa (staattisesti tai dynaamisesti) lämmön, äänen tai mekaanisen voiman avulla. /34/

Shearografiamittauksessa raakakuva on hyvin häiriöinen ja tiedonkäsittelyyn kuuluu kuvankäsittely- ja laskentamenetelmiä, joilla kuvan laatua voidaan parantaa. /34/

Perusmittausjärjestelmään kuuluu tutkittavan rakenteen valaisulähde, joka voi olla esim. Nd:YAG-pulssilaser, josta tulevan valon aallonpituus on 532 nm. Pulssienergia on noin 250 mJ taajuudella 50 Hz ja 5 nanosekunnin pulssileveydellä. Leikkauselementtinä voi olla Michelson-interferometri, jossa on säteenjakaja, kaksi säädettävää peiliä ja CCD-kamera. Kameran ja laserin synkronointi tehdään pulssi- ja viivegeneraattorin avulla. Pinnan jännitys voidaan saada aikaan mm. infrapuna-lampun lämmön avulla. Shearografiamittausjärjestelmä on esitetty kuvassa 8. /34/



KUVA 8. Shearografiamittausjärjestelmän komponentit. /34/

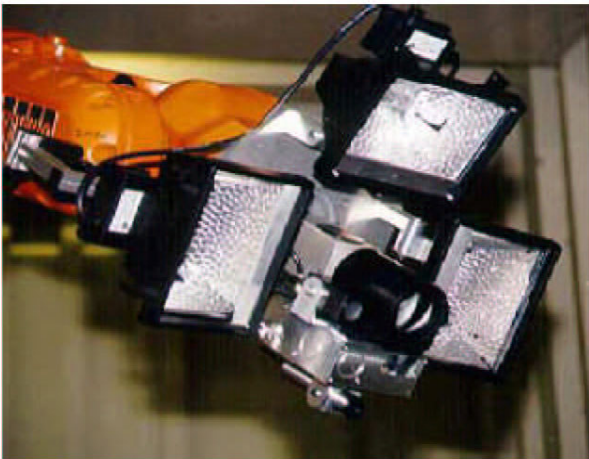
Shearografiajärjestelmät on kehitetty valmiiksi tuotantokäyttöön. Ilmailuteollisuudessa shearografiajärjestelmät kilpailevat pääasiassa ultraäänimittausjärjestelmien kanssa. Etuna on se, että menetelmä on pintaa koskettamaton ja sillä saadaan suoraan kaksiulotteista kuvaa rakenteista. Delaminaatio on helposti havaittavissa menetelmän avulla. Sen sijaan huokoisuutta on vaikea havaita, koska ei ole suoraa korrelaatiota pinnan muodonmuutosten ja huokoisuuden välillä. Siten shearografia komposiittirakenteiden tutkimusmenetelmänä sopii rakenteiden käytönaikaiseen tutkimiseen, missä ei tarvita huokoisuusmittausta. /35/ Pezzonin mukaan shearografiajärjestelmät sopivat hyvin myös väsymiestien aikaiseen rakenteiden kunnan tutkimiseen, sillä testattavia rakenteita ei tarvitse irrottaa väsymiestauslaitteesta tutkimista varten. /34/

Teollisuuskäytössä shearografiajärjestelmät tutkivat esimerkiksi helikopterien roottorin lavat noin 10 minuutissa ja mittauslaitteet voidaan kiinnittää robottikäsiin, jolloin rakenteiden tutkiminen lähes mistä tahansa asennosta on mahdollista. Lisäksi viime vuosina on kehitetty automaattisia vaurioiden paikan merkitäjäjärjestelmiä. Automaattisissa vaurioanalyseissä käytetään etukäteen analyysiohjelmaan syötettyä vauriottoman rakenteen shearogrammia, johon mitattua rakennetta verrataan. Järjestelmä pystyy automaattisesti merkitsemään vauriokohtat rakenteesta otettuun kuvaan. Joissakin järjestelmissä ohjelma suuntaa laservalopisteen vauriokohtaan, jolloin rakenteen tarkastaja voi merkitä helposti vauriokohtaan rakenteen pintaan. Liikuteltavissa shearografialaitteissa on tyypillisesti tutkittavan rakenteen pintaan käsin kiinnitettävä vakuukammio, johon imetty vakuu aiheuttaa rakenteen siirtymän, joka mitataan ja josta voidaan päätellä rakenteen kunto. Tyypillinen yhden rakenteesta otetun kuvan analysointi kestää noin 30 sekuntia ja kerralla voidaan kuvata noin 200 x 200 mm:n pinta-ala. /36/ Teollisuuskäytössä komposiittirakenteiden tarkastusnopeus on 9-45 m² näytepintaa/h ja nopeus voi olla parhaimmillaan yli 100 m² näytepintaa tunnissa /37/.

Kaupalliset shearografiamittauslaitteet

Shearografiajärjestelmiä on saatavana kaupallisina laitteina valmiina. Järjestelmiin kuuluu tavallisesti laser, optinen järjestelmä ja mittaus-tiedon tallennus- ja käsittelyohjelmat tietokoneella. /35/ Kuvassa 9 on yhdentyypisen shearografialaitteiston valaisujärjestelmä, CCD-kamera ja näytteen pinnan vaurioiden merkitsemisjärjestelmä teollisuusrobottiin kiinnitettyinä.

Kaupallisia shearografiajärjestelmiä valmistaa mm. Optonor AS (Norja), Dantec Dynamics A/S (Tanska), Limes Messtechnik & Software GmbH ja Isi-Sys (Saksa) ja Laser Technology Inc. (USA).



KUVA 9. a) . Shearografialaitteiston salamalamput, CCD-kamera ja vaurion merkitsemisjärjestelmä robottiin kiinnitettynä /36/. b) Vakuumikammioilla varustettu shearografijärjestelmä lentokoneen rakenteen tutkimuksessa /37/.

4.3 Ultraäänitarkastus

Ultraäänimittausten käyttö rakenteiden kunnan tarkastuksessa on hyvin perinteistä ja pitkään käytössä ollutta tekniikkaa. Ultraäänen käyttö perustuu siihen, että ultraääniluotaimella tutkittavaan rakenteeseen lähetetään ultraäänipulssi (taajuudeltaan tavallisesti 100 kHz-25 MHz), joka vastaanotetaan joko rakenteen toisella puolella (transmissio) tai takapinnasta heijastuneena ultraääniluotaimen puolella detektoriin. Rakenteen sisäisistä vioista heijastuneen ultraäänen voimakkuudesta ja kulkuajasta voidaan päätellä, kuinka suuri vaurio rakenteessa on ja mikä sen syvyys on. Kaupallisia laitteita on yleisesti saatavilla ja erilaisia luotainvaihtoehtoja on useita. Menetelmää käytetään monien eri rakenteiden laaduntarkastuksessa. Ultraäänitarkastuksessa oleellista on hyvä kontakti luotaimen ja tutkittavan materiaalin välillä. Kontakti voidaan saada aikaan geelillä luotaimen ja tutkittavan materiaalin välissä mutta paras väliaine on vesi. Jos kappaleen kasteleminen ei ole ongelma, pienet kappaleet voidaan upottaa vesisäiliöön tutkimista varten. Suurempia kappaleita voidaan kytkeä luotaimen vesisuihkun avulla. /31/ Hsun mukaan ilmailuteollisuuden kriittisten komposiittirakenteiden yleisin tuotannonjälkeinen tarkastus on vesisuihkuavusteinen ultraäänitransmissiotarkastus /38/. Myös kuivakytkeä ultraäänimittaus (dry coupling) on mahdollinen. Silloin ultraääni viedään kappaleeseen luotaimen ja kappaleen väliin sijoitettavan muovimateriaalin välityksellä /39/.

Komposiittirakenteiden ultraäänitutkimuksessa voidaan käyttää erilaisia tekniikoita: automaattista tai manuaalista tutkimusta, pulssikaiku- tai transmissiomenetelmää, yksiluotain- tai monielementtiluotainkennoja. /35/ Rakenteista havaittavia vikoja ovat mm. huokoisuus, onkalot, säröt, delaminaatit ja hartsirikkaat tai -köyhät alueet. /31/

Manuaalinen ultraäänitutkimus yhdellä luotaimella on hyvin yleisesti käytetty komposiittirakenteiden tutkimusmenetelmä pienille ja keskikokoisille rakenteille. Vaurioiden laajuus mitataan tekemällä useita mittauksia löydetyin vikakohdan ympäri. /35/ Ultraäänitutkimuksella voidaan tuottaa erilaisia kuvia (mm. ns. A-, B- ja C-kuvat), jotka sisältävät eri määrän informaatiota vauriosta ja sen sijainnista, tutkitusta rakenteesta. /31/ Ultraäänimenetelmän kehittyminen A-kuvasta C-kuvia tuottavaksi menetelmäksi on tehnyt menetelmää monimutkaisemmaksi (vaatii enemmän asiantuntemusta), huonommin liikuteltavaksi ja kalliimmaksi /38/.

Viime vuosina on alettu käyttää ultraääniriviluotaimia (phased array), joilla tutkittavaan rakenteeseen voidaan johtaa ultraääniaaltorintama. Eri luotaimia voidaan aktivoida viiveillä ja siten eri ultraääniaaltojen yhdistymisestä saadaan halutun tyyppisiä signaaleja, joilla voidaan kallistaa ja kohdistaa ultraääniaaltoja sähköisin keinoin ja tehdä ultraääniaaltopyyhkäisyjä rakenteista. Lisäksi yhden kuvan sijaan riviluotaimilla voidaan tuottaa muitakin ultraäänikuvia rakenteesta. /35/

Suurten rakenteiden ultraäänitutkimus voi olla automaattinen tai puoliautomaattinen toiminto siten, että ultraääniluotainyksikkö liikkuu automaattisesti tutkittavan rakenteen päällä olevassa telineessä. Esim. lentokoneiden siipiosia voidaan tutkia 96 luotaimen yhdistelmällä nopeudella 100 mm/s. Luotaimien ja antureiden mittausalue voi olla jopa 13 x 7 metriä. /35/

Tapauksissa, joissa ultraääniluotaimen ja mitattavan kappaleen välissä ei voida käyttää kontaktirasvaa tai vettä, voidaan rakenteiden mittaaminen tehdä ilmajälitteisellä ultraäänitekniikalla, jossa käytetään korkeaa äänenpainetta ja alhaista taajuutta (50 kHz-noin 100 kHz) ultraäänihäviöiden kompensoimiseksi /35/. Ilmajälitteinen ultraäänitutkimus on yleistynyt myös ilmailuteollisuuden tuotannonjälkeisenä tarkastusmenetelmänä vedelle arkojen rakenteiden tutkimisessa. Aikaisemmin ultraäänien energian saaminen luotaimesta ilman kautta tutkittavaan rakenteeseen oli ongelmana. Nykyään kiinteitä laminaatteja ja monikerroshunajakennorakenteita voidaan tutkia transmissiotarkastuksena käyttämällä pietsosähköisiä ilmajälitteisiä luotaimia 50-500 kHz:n taajuudella tarkennetulla ultraäänipulssilla ja jopa 3 mm:n halkaisijaiset viat voidaan havaita. Monikerroshunajakennorakenteilla 100 kHz:n taajuus on hyvä kunnollisen herkkyyden ja erottelukyvyn saamiseksi. Ilmajälitteisellä ultraäänitutkimuksella on saatu hyviä tuloksia NDT-menetelmävertailuissa /38/.

Komposiittirakenteiden liitosten delaminoitumisen tutkimuksessa on käytössä myös ns. pitch-catch-tekniikka, jossa käytetään ääni- tai ultraääniaaltoja. Menetelmässä käytetään lähekkäin samassa anturissa olevaa luotainta ja vastaanotinta. Luotain lähettää ääni- tai ultraäänipulssin (pitch) ja lähellä oleva vastaanotin havaitsee saapuvan pulssin amplitudin (catch). Hyvässä ja huonossa laminaattirakenteessa äänen amplitudi ja vaihe vaihtelevat ja siten delaminoitumiskohtat voidaan määrittää. Lisäksi menetelmällä voidaan tehdä erilaisia äänitaajuuspyyhkäisyjä ja tuotetuista taajuuskuvista voidaan tunnistaa rakenteen sisäisiä delaminoitumiskohtia. Esim. pintakalvon ja sandwich-rakenteen väliset delaminaatiot voidaan havaita. /40/ Joissakin mittauslaitteissa on yhdistetty useita eri mittausmenetelmiä, jotka käyttävät ääntä ja ultraääntä ja eri mittausmenetelmät esittävät mittautiedon hieman eri muodossa. Kannettavasta mittarista voidaan

valita esimerkiksi resonanssitaajuusmittaus (pitch-catch RF), impulssimittaus (pitch-catch impulse), taajuuspyyhkäisymittaus (pitch-catch swept), mekaaninen impedanssimittaus (MIA) tai resonanssi-impedanssimittaus (resonance mode) eri materiaaleja ja mittaustarkoituksia varten vaihtamalla erilainen mittauspää mittalaitteeseen. Kaikkia näitä mittausmenetelmiä nimitetään usein englannin kielessä termillä 'bond testing' eli liitosten testaus, vaikka monilla muillakin menetelmillä voidaan havaita komposiitin liimausliitosten irtoamista. /41/



KUVA 10. a) Ultraäänimittausasema suurille kappaleille, transmissiomittausmenetelmä (Structural Diagnostics Inc.) /42/. b) Pitch-catch-tekniikka lentokoneen potkurin tutkimisessa (Olympus) /43/. c) Erilaisia pitch-catch-mittausantureita (Advanced NDT Limited) /44/.

Komposiittirakenteiden huokoisuutta voidaan tutkia ultraäänien avulla mittaamalla ultraäänien amplitudin heikkenemistä rakenteen takapinnan kaiusta. Huokoset eivät usein aiheuta suoraa kaikua, koska ääni siroaa huokosista joka suuntaan. Sen sijaan lähetetyn ja takapinnasta palaavan äänen amplitudin heikkeneminen on hyvin verrannollinen komposiittirakenteen huokostilavuusosuuteen. Menetelmän käyttö vaatii kalibrointimittauksia erityyppisille materiaaleille ja rakennepaksuuksille. Kalibroinnissa vertailumittaukset voidaan tehdä mikroskoopilla. Useiden materiaalien kalibrointitiedot yhdistämällä voidaan määrittellä ultraäänien vaimenemiselle raja-arvo,

joka vastaa sallittua maksimihuokoisuutta, jolloin ultraäänimittauksella voidaan tehdä nopeasti komposiittirakenteen kunnan hyväksyvä tai hylkäävä päätös. /35/

Laserultraäänitestauksessa yhdistetään optisen mittauksen ja ultraäänimittauksen piirteitä. Menetelmässä laserilla aiheutetaan tutkittavaan rakenteeseen ultraääniaalto, joka etenee aina pintaa vastaan kohtisuoraan rakenteessa. Ultraääniaalto heijastuu sisäisistä vioista kuten tavallinen ultraääniaalto ja heijastunut signaali havaitaan optisesti esim. toisella laserilla ja interferometrillä. Menetelmällä voidaan tuottaa tavallisen ultraäänitutkimuksen mukainen ultraäänikuva ja muita kuvia rakenteesta. Menetelmä sopii monimutkaisten kappaleiden tutkimukseen, mutta tällä hetkellä laitteistot ovat kalliita, monimutkaisia ja hitaita. Menetelmä on edelleen kehitysasteella, jotta siitä saataisiin käyttökelpoinen NDT-menetelmä. /35/

Kehitteillä olevia muunnelmia ultraäänien käytöstä rakenteiden kunnan kuvantamiseen ovat akustografia (acoustography) ja 'äänikuvaus' (acoustocam). Akustografiassa jänniteherkän nestekidemateriaalin avulla ultraäänien intensiteetti muutetaan harmaasävyasteikkokuvaksi ja 'äänikuvauksessa' pietsosähköisellä, CCD-kennon tapaan toimivalla, anturikennolla saadaan ultraäänien avulla videokuva rakenteesta. Molemmat menetelmät vaativat nestekytken ultraäänien johtamiseksi tutkittavaan rakenteeseen. /38/

Resonanssimenetelmä on ultraäänien käyttöön perustuva tarkastusmenetelmä, jossa mitataan tutkittavan kappaleen resonanssiaajuuden muutoksia. Menetelmällä tarkastetaan delaminaatioita, onkaloita ja liimavikoja. Kaupallisia resonanssimittauslaitteistoja on olemassa. Tehokkaan resonanssimenetelmän käytön perustana on kattava vertailuaineisto tutkittavista rakenteista. /31/.

Kaupallisia ultraäänimittausjärjestelmiä valmistavat mm. Zetec Inc. (USA), Krautkrämer GmbH & Co (Saksa), Olympus (Inspection and Maintenance Systems, Japani) sekä Angstrom Advanced Inc. (USA) ja niitä toimittaa Suomessa esim. Sonar Oy.

4.4 Muita vaurioiden tutkimismenetelmiä

Tässä kappaleessa esitellään rakenteiden tutkimismenetelmiä, jotka ovat olleet käytössä mm. metallirakenteiden NDT-tarkastuksissa kauan aikaa ja jotka sopivat myös lujitemuovikomposiittirakenteiden vaurio- ja kuntotutkimukseen. Metallirakenteiden NDT-tutkimismenetelmistä on jätetty tässä pois tunkeumanestetarkastus ja magneettijauh tarkastus. Tunkeumanestetarkastusta ei ole käsitelty, koska siinä käytetään rakenteeseen imeytyvää nestettä ja sillä tutkitaan vain pintaan asti avautuvia virheitä rakenteissa. Magneettijauh tarkastus sopii ferromagneettisille aineille.

Radiografinen tarkastus

Radiografisessa tarkastuksessa käytetään ionisoivaa säteilyä rakenteen kuvaamiseen. Rakenteen toinen puoli altistetaan säteilylle ja rakenteen takana oleva filmi valottuu säteilyn vaikutuksesta. Enemmän säteilyä läpäisevät vauriokohdat näkyvät filmissä tummempina. Rakenteen eheyttä voidaan tutkia näiden rakenteen valokuvien perusteella. Erilaisia radiografisia menetelmiä ovat röntgen-, gamma- ja kiihdytinkuvaus. /45/ Uusissa mittausjärjestelmissä filmi on korvattu digitaalisilla kuvantallennusmenetelmillä.

Radiografia havaitsee (metalleilla) kolmiulotteiset virheet, kun virheen koko on 1-2 % ainespaksuudesta. Komposiittimateriaaleilla virheiden koon on ehkä oltava suurempi. Epäedullisesti säteilyn kulkusuunnassa sijaitsevat virheet voivat jäädä huomaamatta. Radiografiakuvan erotuskyky riippuu mm. kuvattavasta aineesta, filmistä, kuvaustekniikasta, säteilylähteestä ja mittauslaitteistosta. /45/

Tavallisesti huokokset, murtumat ja delaminaatiot, jotka ovat pieniä ja säteilysuunnan normaalin suuntaisia, ovat vaikeasti havaittavia, mutta säteilysuunnan kanssa yhdensuuntaiset tyhjätilat rakenteen sisällä näkyvät menetelmällä hyvin. Silloin, kun komposiittirakennetta voidaan käsitellä enemmän mittauksen aikana, voidaan käyttää esim. tunkeumanesteitä (tetrabromoetaania tai sinkkijodidia), jotka ovat röntgensäteilylle läpinäkyvättömiä. Tunkeumaneste ei saisi kuitenkaan reagoida tutkittavan rakenteen kanssa. Lisäksi voi olla tarpeen kuivata rakenne jälkeensä. Magneettikentän avulla voidaan röntgensäteilyn elektronisuihkua ohjata pienempiin rakenteen osiin, jolloin voidaan usein havaita pienempiä vaurioita. Lisäksi laminoitujen paineastioiden ja moottoreiden kotelointiosien tarkastuksessa on käytetty takaisinsironneiden elektronien muodostamaa rakennekuvaa laminaateista. /39/

Röntgentomografia on röntgenmittauksen sovellus, jossa röntgen- tai gammasäteily kollimoidaan viivamaiseksi säteilykeilaksi, jolla voidaan kuvantaa ohut poikkileikkauskuva komposiittirakenteesta. Kun säteilykeilaa ja detektoria liikutetaan synkronoidusti tutkittavan rakenteen yli, saadaan kolmiulotteinen kuva rakenteesta ja sen sisällä havaituista vioista. /39/

Neutroniradiografia on radiografinen NDT-menetelmä, jota on käytetty komposiittien kunnontarkastuksessa, mutta liikuteltavien neutronilähteiden saatavuus ja hinta rajoittavat menetelmän käyttöä tuotannaikaisessa tai käytönaikaisessa komposiittien laadunvalvonnassa. /39/

Radiografisten mittausten yleisenä negatiivisena ominaisuutena on ionisoivan säteilyn käyttö, mikä on terveysriski menetelmän käyttäjille. Siten laitteiden käyttö on luvanvaraista toimintaa ja vaatii hyvän koulutuksen ja asiantuntevan käyttäjän.

Radiografisia mittauslaitteita valmistavat mm. Angstrom Advanced Inc. (USA), Matsusada Precision Inc. (Japani) ja Yxlon International GmbH (Saksa) ja laitteita toimittaa Suomessa mm. Sonar Oy.

Akustinen emissio

Akustinen emissio on käytännössä komposiittirakenteesta tulevien äänten kuuntelemista rakenteen ollessa jännitystilassa esim. käytön aikana. On havaittu, että murtumien alkaminen ja eteneminen rakenteissa aiheuttaa ääntä, joka voidaan tallentaa pietsosähköisillä vastaanottimilla (korkeataajuusmikrofoneilla). Äänisignaalit vahvistetaan, häiriösuodatetaan ja analysoidaan. Signaaleja voidaan prosessoida useiden parametrien mukaan: signaalien määrän ja keruunopeuden, amplitudijakauman, signaalien energian tai taajuussisällön mukaan. Murtuman syntypaikka voidaan paikallistaa käyttämällä useita vastaanottimia ns. kolmiomittausmenetelmällä. /39/

Menetelmä sopii erityisesti rakenteiden käytönaikaiseen valvontaan. Erilaiset murtumistyytit komposiittirakenteissa tuottavat murtumistyytille ominaisen äänisignaalin, josta voidaan päätellä, millainen murtuma tapahtuu. Menetelmän käytön ongelmana on erottaa toisistaan yhtä aikaa tapahtuvien murtumien laatu ja menetelmä vaatii vielä kehittämistä, ennen kuin sitä voidaan käyttää rutiininomaiseen komposiittirakenteiden NDT-tutkimukseen. /39/

Tuotannaikaisessa laadunvarmistuksessa akustista emissiota voidaan käyttää siten, että hyväksyttävästä tuotteesta mitataan pienellä rakenteen kuormituksella akustisen emission signaalien perustaso, jota muut valmistettavat kappaleet eivät saa ylittää. Tuotantokappaleisiin aiheutetaan vastaava kuormitus ja sitä verrataan hyväksyttävän kappaleen perustasoon. Tiukasti määritellen menetelmä ei ole ainetta rikkomaton menetelmä, koska hyvin pieni komposiittirakenteen säröily aiheutuu itse mittauksesta. /31/

Holografiainterferometria

Holografiainterferometrialla tarkoitetaan tutkittavasta rakenteesta tehtävän kolmiulotteisen kuvan tutkimista vaurioiden havaitsemiseksi. Kuvan luomisessa laserin valo jaetaan kahteen säteeseen,

joista toinen heijastetaan tutkittavan näytteen pinnan kautta holografiafilmille (detektorille) ja toinen suoraan holografiafilmille. Molempien lasersäteiden amplitudi ja vaihe tallentuvat filmille. Hologrammi säilyttää kuvatus kohteen kolmiulotteisen luonteen. Kun tallennettua holografiafilmiä valaistetaan referenssilasersäteellä (suoraan holografiafilmille johdetulla säteellä), voidaan havaita tutkittavan kohteen kolmiulotteinen kuva filmin takaa tarkasteltuna. Kun tutkittavasta rakenteesta tehdään holografiakuva kahdella eri valotuksella, rakenne jännitettynä ja ilman jännitystä, ja kuvat yhdistetään, hologrammikuvasta voidaan nähdä, missä kohdissa rakennetta on sisäisiä vikoja. /39/

Holografiainterferometrian käytössä matalataajuinen ympäristöstä johtuva värinä aiheuttaa häiriöaaltoja hologrammikuviin ja tämä rajoittaa menetelmän käyttöä tuotanto- tai käyttötilanteissa rakenteiden vauriotutkimuksessa. Holografiainterferometrian jatkona onkin kehitetty shearografia, jossa on ratkaistu holografia kuvauksen ongelmia. /39/

Sähköisen potentiaalin muutosmittaus

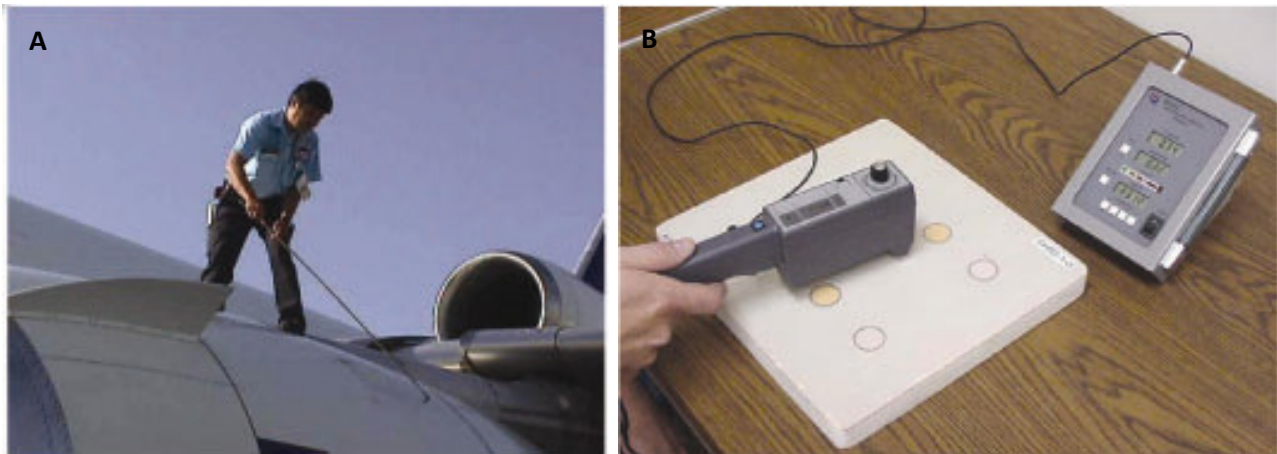
Sähköisen potentiaalin muutosmittaus (electric potential change method, EPCM) on kehittämissaiheessa oleva delaminaatioiden paikallistamismenetelmä hiilikuitulaminaateille (CFRP). Menetelmä perustuu siihen, että komposiittirakenteen pintaan kiinnitetään useita jännitettä mittaavia elektrodeja ja rakenteeseen johdetaan kahden elektrodin kautta virta. Virrankulku estyy delaminaatiokohdassa ja mittaamalla eri elektrodien potentiaalia suhteessa toisiinsa voidaan määrittellä delaminaation paikka rakenteessa. Menetelmässä käytetään FEM-analyysiä laminaattirakenteiden mallinnusapuna. /46/

Sähköisen potentiaalin muutosmittaukseen ei liene kaupallisia laitteita, mutta menetelmässä käytetään jännitteen mittaustureita ja tasavirtalähteitä sekä sähköisten suureiden mittaamista, joten mittauslaitteistoja lienee mahdollista rakentaa olemassa olevista sähkötekniikan komponenteista.

Äänitarkastus

Äänitarkastuksessa vikoja etsitään kuuntelemalla tutkittavan rakenteen kuuloalueen äänisignaalia, kun rakennetta koputetaan. Menetelmällä etsitään lähinnä rakenteen delaminaatioita. Menetelmässä rakennetta koputetaan sopivalla esineellä, kuten kuvassa 11 a) pitkävartisella vasaralla. Ehjän kohdan tuottama ääni on kirkas ja terävä kun delaminaatiokohdan tuottama ääni on soinniton ja matala. Menetelmän haittana on hitaus ja subjektiivisuus ja siksi menetelmää on pyritty automatisoimaan. /31/ Automaattisissa menetelmissä mitataan usein automaattisen vasaran kosketusvoimaa tutkittavaan pintaan ajan funktiona ja delaminointuneessa kohdassa tai pintakalvon liimausvauriossa kennorakenteeseen havaitaan pidentynyt vasaran kontaktiaika, koska

kosketuspinnan jäykkyys on alhainen ja pinta joustaa /47/. Kuvassa 11 b) on yksi kaupallinen automaattinen koputuslaitteisto digitaalisella näytöllä varustettuna.



KUVA 11. a) Koputusmenetelmä rakenteiden tutkimuksessa: pitkävärtinen koputusvasara (manuaalinen menetelmä). b) Automatoitu koputusmenetelmä (Mitsui Woodpecker). /48/

Automaattisilla koputuslaitteilla voidaan piirtää mitattavan rakenteen jäykkyyttä kuvaavan mallin jousivakion arvo mittaustaikana funktiona ja siten luoda jäykkyysskuva rakenteesta. Äänitarkastusmenetelmien kehitys jatkuu edelleen. Äänitarkastus on ollut visuaalisen tarkastuksen ohella ilmailuteollisuuden rakenteiden päätarkastusmenetelmä aikaisemmin, mutta muut menetelmät ovat yleistymässä sen rinnalle /38/.

Automaattisia koputusmittausjärjestelmiä valmistavat mm. Advanced Structural Imaging Inc. (USA), Mitsui Engineering & Shipbuilding Co. Ltd (Japani) ja WichiTech Industries Inc. (USA). /44/

4.5 Komposiittirakenteiden jännitysten mittaaminen

Komposiittirakenteiden jännitysten mittaamismenetelmistä tässä käsitellään kuituoptisten ja venymäliuska-antureiden käyttöä. Kuituoptisessa mittaamismenetelmässä eri mittaustekniikoita, jotka perustuvat valokuitujen käyttöön, on useita. Tekniikat on kuvattu lyhyesti erojen esittelemiseksi. Venymäliuska-antureiden käyttö on perinteistä mittaustekniikkaa ja siitäkin on yleisesti kuvattu mittauseriaate ja käyttökohteita.

4.5.1 Kuituoptiset mittausten menetelmät

Kuituoptisilla mittauksilla tarkoitetaan menetelmiä, joissa käytetään hyväksi valon taittumista ja heijastumista valokuidussa kuidun ollessa mitattavassa materiaalissa. Menetelmässä tarkkaillaan valon taittumisen ja heijastumisen muutoksia mitattavan materiaalin muuttuessa ajan funktiona, esim. silloittuessa tai jännitysten muodostuessa mitattaviin rakenteisiin.

Valokuitumittausten etuja sähköisiin antureihin nähden on useita. Valokuituanturit ovat pienempiä ja kevyempiä kuin sähköiset anturit. Anturit ovat herkkiä ja kuljettavat informaatiota nopeasti. Anturit ovat passiivisia ja immuuneja sähkömagneettisille häiriöille, ne eivät kuumene itsestään tai kipinöi. Lisäksi lasiset anturit kestävät hyvin erilaisissa kemiallisissa ympäristöissä ja korkeissakin lämpötiloissa. Anturit kestävät voimakasta säteilyä. Valokuituanturit voivat olla hyvin pitkiä ja yhdellä anturilla voi saada tietoa useasta tutkittavan rakenteen kohdasta. Anturit ovat pitkäikäisiä ja niiden energiankulutus on alhainen. /17/

Kuituoptiikan käytön heikkouksia ovat lasivalmisteisten kuitujen hauraus ja suojauksen tarpeellisuus. Lisäksi anturilla saatavan tiedon tulkinta ei ole aina suoraviivaista, vaan anturin signaaliin vaikuttavat esim. erisuuntaiset venymät, lämpötila, lämpölaajeneminen ja kosteus. /17/

Kuituoptiset anturit voidaan jakaa eri perustein esim. sisäisiin ja ulkoisiin antureihin, anturin mittauskohdan mukaan (piste-, hajautetut tai puolihajautetut anturit) tai mitattavan valon ominaisuuden mukaan (intensiometriset, polarimetriset, interferometriset tai spektrihavainnointiin perustuvat anturit) /17/.

Seuraavana on esitetty antureiden toimintaperiaatteen mukainen pääjako kuituoptisille antureille ja antureiden ominaisuuksia ja käyttökohteita.

4.5.1.1 Fabry-Pérot-interferometrianturi

Interferometriin perustuva valokuituanturi sopii mittaustarkkuutta vaativiin kohteisiin. Mitattava suure vaikuttaa valon vaiheeseen. Vaihesiirtynyt valo interferoi alkuperäisen valon kanssa ja muutos mitataan. Fabry-Pérot-interferometrissä valo kulkee valokuidun päässä tutkittavassa materiaalissa lyhyen matkan, heijastuu takaisin detektoriin ja valon vaiheen muutoksesta verrattuna alkuperäiseen voidaan laskea tutkittavan materiaalin ominaisuuksia. Tällä tekniikalla mitataan pääasiassa lämpötilaa ja venymää. Anturi on erittäin tarkka, sähköisesti ja kemiallisesti passiivinen ja sitä käytetään mm. rakenteiden kunnonvalvonnassa lämmön vaikutuksesta

aiheutuvien muutosten tarkkailussa. Anturityyppi sopii myös muiden antureiden kalibrointiin tarkkuutensa vuoksi. Fabry-Pérot-anturien hinnat ovat noin 500 eurosta ylöspäin (vuonna 2008). /19/

4.5.1.2 Takaisinsirontaan perustuvat anturit

Takaisinsirontaan perustuvissa antureissa mittaustieto (esim. lämpötila tai venymä) voidaan saada jokaisesta valokuidun kohdasta eli valokuitu vastaa useita yksittäisiä antureita. Valokuituun lähetetään valopulssi, joka siroaa valokuidun seinämissä ja tiettyjen aallonpituuksien sirontaa tutkimalla voidaan mitata materiaaliominaisuuksia aineesta, johon valokuitu on valettu. Yleisesti tutkitaan Raman, Brillouin ja Rayleigh'n sirontaa, joiden avulla voidaan mitata venymää ja lämpötilaa. Menetelmä sopii useiden erilaisten rakenteiden kunnonvalvontaan. Signaalinkäsittelylaitteisto on kuitenkin kallis (50 000-150 000 euroa vuonna 2008) vaikka valokuitu on hyvin edullista. Suurten kohteiden kattava kunnonvalvonta saattaa muodostua tällä tekniikalla kannattavaksi. /19/

4.5.1.3 Braggin hila-anturit

Braggin hila-anturi on yksi yleisimpiä ns. puolihajautettuja antureita. Pitkään valokuituun tehdään mittauspisteiksi jaksollisia hilarakenteita, joista määrättyä aallonpituutta vastaava valo heijastuu takaisin valokuitua pitkin. Kun tutkittavan rakenteen sisälle valettuun valokuituun kohdistuu rakenteen aiheuttama jännitys, takaisin heijastuvan valon aallonpituus muuttuu ja tästä muutoksesta voidaan laskea materiaalissa tapahtuvia ominaisuuksien muutoksia, kuten lämpötila tai jännitys. Valmiita valokuituun hitsattavia Braggin hiloja on saatavana ja ne maksavat 300-3000 euroa kappaleelta (vuonna 2008). /19/

4.5.1.4 Kaupalliset kuituoptikkaan perustuvat laitteistot

Kaupallisia kuituoptikkaan perustuvia mittaustaitteistoja on saatavana. Valmistajia ovat mm. Smart Fibres Ltd. (Iso-Britannia), OptoSmart s.r.l. (Italia), FISO Technologies Inc. (Kanada), Blue Road Research (Yhdysvallat), Micron Optics Inc. (Yhdysvallat) ja FiberPro (Yhdysvallat).

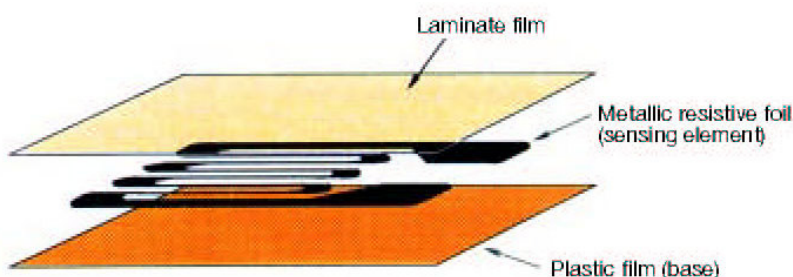
Jännitysten ja lämpötilan mittaamisessa laitteistojen perussuorituskykyä kuvataan venymäalueen ilmoittavalla luvulla (yksikössä $\mu\epsilon$) sekä venymän ja lämpötilan erottelukyvillä. Usein mittauskanavien lukumäärä ja mittaustaaajuus ovat oleellisia tietoja laitteita valitessa. Eri laitteet eroavat toisistaan eniten mittaustaaajuuden, kanavien lukumäärän ja erottelukyvyn osalta. /17/

Tavallinen laitteisto sisältää ns. anturilaitteiston (interrogator), jossa on valonlähde ja heijastuneen valon detektori. Valonlähde voi olla laaja-aallonpituuslähde tai laser. Lisäksi laitteistoon kuuluu tiedontallennus- ja käsittely-yksikkö (tavallisesti tietokone ohjelmistoinen), jolla mittaustietoja voidaan esim. seurata reaaliaikaisesti tai tallentaa mittaustiedot tiedonkäsittelyohjelmassa käytettäväksi. Lisäksi mittausjärjestelmään kuuluu valokuitu, joka on valitun mittaustekniikan mukainen ja halutun pituinen. Braggin hilat ovat valokuiduissa tavallisesti 10 mm:n pituisia, mutta ne voivat olla minimissään jopa 0,1 mm pitkiä. /17/

4.5.2 Venymäliuska-anturit

Venymäliuska-antureilla mitataan rakenteiden jännitystä mittaamalla rakenteeseen kiinnitettyssä venymäliuska-anturissa olevan metallijohtimen resistanssin muutosta johtimen pituuden muuttuessa rakenteeseen vaikuttavan veto- tai puristusvoiman vaikutuksesta. Kun rakennemateriaalin kimmomoduli tunnetaan, voidaan rakenteen venymästä laskea rakenteeseen vaikuttava jännitys. /43/

Venymäliuska-anturi on 3-6 mikrometriä paksu kupari-nikkeli-seoskalvo, josta on tehty johdin. Kuvassa 12 on venymäliuska-anturin rakenne (johdin on kuvassa 12 oleva 'metallic resistive foil'). Johdin suojataan pintakalvoilla (kuvassa 12 'lamine film' ja 'plastic film (base)') ja siten muodostuva anturi voidaan liimata tutkittavan rakenteen pintaan. Anturin johtimesta vedetään resistanssia mittaavat johdot tietokoneliityntään, jossa mittaussignaali vahvistetaan ja A/D-muunnin muuttaa resistanssimittauksen digitaalseksi signaaliksi, joka tallennetaan tietokoneella. /43/



KUVA 12. Venymäliuska-anturin rakenne. /43/

Mittauksissa anturijohtimen erittäin pieni venymä vahvistetaan käyttämällä hyväksi Wheatstonen siltakytkentää. Samaan siltakytkentään voidaan liittää 1, 2 tai 4 venymäliuskaa, tosin yhden venymäliuskan kytkentä on yleisin. Venymäliuska-anturit voivat mitata useiden satojen kilohertsien taajuisia rakenteiden värähtelyitä, joten mittausmenetelmä sopii hyvin jatkuvassa rasituksessa olevien rakenteiden jännitysten mittaamiseen. Venymäliuska-antureiden käytössä mitattavan kappaleen ja mittausjohtojen lämpölaajeneminen kompensoidaan eri menetelmin, jotta lämpölaajeneminen voidaan erottaa rasituksesta. /43/

Käytännössä venymäliuska liimataan sileään ja puhdistettuun komposiittipintaan esim. syanoakrylaatti- tai epoksiliimalla oikeaan asentoon halutun suuntaiseen mitattavaan jännitykseen nähden. Liimauksen annetaan kuivua noin 60 minuuttia, jonka jälkeen rakenteen jännityksiä voidaan mitata. /43/

Tutkittaessa hartsien silloittumista venymäliuskat mittaavat vain geeliytymispisteen jälkeisiä muutoksia, koska hartsin on saavutettava tietty jäykkyys voidakseen vaikuttaa venymäliuskaan /49/.

Venymäliuska-anturitekniikka on kauan käytössä ollut ja luotettavaa tekniikkaa, johon on olemassa kaupallisia tuotteita. Erilaisia antureita eri materiaalien jännitysmittauksiin ja lämpötiloihin on useita ja mittausjärjestelmiä on saatavana kaupallisina tuotteina. Järjestelmiä toimittavat mm. Straintech Finland Oy (Suomi), Elkome Systems Oy (Suomi) ja Novotek Finland Oy (Suomi). Yksi hyvin yleinen anturivalmistaja on mm. Kyowa Electronic Instruments Co (Japani).

5 Menetelmien käyttökelpoisuuden arviointi tuotantolaitoskäyttöön

5.1 Silloittumisen mittausmenetelmien vertailu ja arviointi

Yleinen mielipide on, että kaikkiin tilanteisiin yleispätevää mittausmenetelmää ei ole, vaan kuhunkin tuotantomenetelmään, raaka-aineisiin ja mittaustarcoitukseen sopiva menetelmä täytyy valita erikseen käytössä olevista vaihtoehdoista. /1/

Menetelmien soveltamisessa teollisuuskäyttöön pitäisi selvästi nähdä menetelmän antama tehon ja laadun paraneminen, ennen kuin menetelmästä tulee hyväksytty. Usein tuotantomittakaavassa ei haluta muuttaa hyvin toimivaa vanhaa käytäntöä, mikä hidastaa sovellusten käyttöönottoa

teollisuusmittakaavassa. Lisäksi menetelmien käyttö mielletään kalliiksi ja teknistä osaamista vaativaksi. /1/

Joissakin sovelluksissa pelkkä silloittumisasteen mittaaminen saattaa riittää tuotteen laadunvarmistusmenetelmäksi kun taas toisissa käyttökohteissa tuotantoprosessin säätäminen mittaustietojen pohjalta saattaa olla tärkeää. Lisäksi silloitusprosessin säätämisessä voidaan käyttää hyvin eritasoisia säätömalleja. Edelleen silloitusasteen mittaamista voidaan tarvita rakenteen mekaanisten ominaisuuksien arviointiin korvaamaan ainetta rikkovia mittausmenetelmiä. /1/

Lisäksi valinnassa täytyy ottaa huomioon se, voidaanko komposiittirakenteen sisään jättää mittaustureita vai ei ja se kuinka paljon mittausjärjestelmän käyttö voi maksaa. Uudelleenkäytettävien antureiden etu on siinä, että niitä voidaan käyttää toistuvasti kun taas kertakäyttöisten antureiden tulisi olla edullisia, koska ne uusitaan jokaisen tuotantokappaleen kohdalla. Mittausmenetelmää valitessa on mietittävä, täytyykö pinta-anturit päästä sijoittamaan mitattavan rakenteen molemmiin puolin vai riittääkö vain yhdeltä pinnalta mittaaminen. Muottivalussa antureiden asentaminen muotin seinämille saattaa olla menetelmän käyttöönoton suurin investointi, kun taas kertakäyttöisistä antureista tulee jatkuvia kustannuksia. /1/

Mittausjärjestelmien hankinnassa täytyy arvioida sitä, kuinka merkityksellistä rakenteesta saatava mittaustieto on. Homogeenisen rakenteen ominaisuuden mittaamisessa mittauskohdalla ei välttämättä ole suurta merkitystä, mutta komposiittirakenteet ovat usein hyvin epähomogeenisia, jolloin on oleellista harkita sitä, millaista mittaustietoa jollakin mittaustekniikalla saadaan. Esimerkiksi ultraääni- tai dielektrinen mittaus saattavat antaa jonkinlaisen keskiarvoisen tiedon paksun rakenteen koko mittausmatkalta tai -tilavuudesta, kun taas valokuitu saattaa antaa mittaustiedon yhdestä pisteestä koko rakenteessa, eikä kuvaa komposiittirakenteen silloittumisen kokonaistilaa. /1/

Menetelmien vertailua vaikeuttaa osaltaan se, että menetelmiä on hyvin monia ja ne perustuvat eri tekniikoihin. Mulligan arvioi ultraäänien käytön ja dielektrometrian vakiintuneimmiksi menetelmiksi silloittumisasteen mittaamisessa. Ultraäänitekniikan kehityksessä ei odoteta tulevan enää mitään suuria uudistuksia, kun taas dielektrometria on vielä kehityksessä. Dielektrometrian soveltaminen suuren volyymin tuotantoprosesseihin ei ole välttämättä yksinkertaista ja mittaustulosten arviointi saattaa näyttää abstraktilta. /1/

Joissakin vertailuissa on huomattu, että FTIR-tekniikalla on suuri herkkyys silloittumisen alussa, mutta rakenteen jäykistyessä ultraäänimenetelmä muodostuu herkemmäksi. Dielektrometriaa ja ultraäänimittausta verrattaessa resistiivisyys ja äänen nopeus antavat hyvin vertailukelpoisia

tuloksia, joten valintaperusteena on oltava pikemminkin menetelmän käyttöönottoon liittyvät käytännön tekijät. /1/

Valokuitutekniikoista seisova-aaltoanturit (FTIR:n kanssa tai taitekertoimen mittaamiseksi) ja transmissioanturit (FTIR:n kanssa) ovat kaikki tarpeeksi herkkiä hartsin kovettumisasteen mittaamiseen. Kuitenkin FTIR:n kanssa käytetty seisova-aaltoanturi antaa tuloksena virheellisesti hieman nopeamman silloittumisen kuin muut. Transmissioanturin pääongelma on varmistaa kuitujen päiden linjaus, mutta muuten mittaustieto on laadukasta edullisilla valokuiduilla. Pelkkään silloittumisasteen mittaamiseen riittää hyvin taitekertoimen mittaaminen, silloin kun taitekerroin on anturin mitta-alueella. Valokuituanturien suurin etu on rakenteen ominaisuuksien mittaaminen komposiittirakenteen käytön aikana. /1/

Joissakin vertailuissa (hiilikuitu-fenolihartsiyhdistelmässä) ultraäänimittaus ei ole toiminut ollenkaan ja Fabry-Pérot-anturit ovat osoittautuneet liian hauraiksi rakenteen silloittumisen monitorointiin, kun taas dielektrometrimittaus on ollut toimiva menetelmä. /1/

Vodickan katsauksessa lupaavimmiksi kehittyviksi menetelmiksi on esitetty dielektrometristä mittausta, spektroskopiamenetelmiä ja taitekertoimen muutokseen perustuvaa menetelmää hartsien silloittumisen tutkimiseksi. Lupaavien menetelmien valinta on perustunut anturien kokoon, yksinkertaisuuteen, hintaan, herkkyyteen ja kykyyn mitata ominaisuuksia silloittumisen jälkeen komposiittirakenteen ollessa käytössä. Taitekertoimen muutokseen perustuvaa mittausta ehdotetaan tutkittavaksi lisää, jotta menetelmää voidaan hyödyntää kentällä tehtävissä komposiittirakenteiden korjauksissa. Taulukossa 1 on Vodickan yhteenveto eri menetelmistä ja niiden ominaisuuksista. /2/

Taulukon 1 viimeisestä sarakkeesta huomataan, että suurin osa menetelmistä on sellaisia, joissa mitta-anturi silloitetaan komposiittirakenteen sisään. Vain komposiitin kutistumista mittaava liike-anturi (displacement transducer) on rakenteen ulkopuolinen. Lisäksi vain akustisilla antureilla ja taitekerrointa mittaavalla anturilla voidaan mitata ensin silloittumisastetta ja komposiittirakenteen ollessa käyttökohteessa muita ominaisuuksia (taulukon sarake multiparameter sensing). Silloittumisasteen havaitsemiseen hyvin sopivia antureita ovat dielektriset, akustiset, spektroskopiset, optiset ja lämpövuotanturit. Tuotantokäyttöön sopivia ovat laitteet, joiden koko (size, complexity) on pieni, kuten dielektriset, akustiset, optiset ja lämpötila-anturit.

TAULUKKO 1. Komposiittien silloittumisasteen monitorointimenetelmien vertailu. /2/

Technique	Cure Sensing Ability	Size, Complexity	Cost	Multi-parameter sensing	Embed into composites
Dielectric	HIGH	LOW	MED	NO	YES
Acoustic	MEDIUM	LOW	MED	YES	YES
Spectroscopic	EXCELLENT	MED-HIGH	HIGH	NO	YES
Optical	GOOD	LOW	LOW	YES	YES
Refractive Index					
Thermocouple	LOW	LOW	LOW	NO	YES
Heat Flux	GOOD	MED	MED	NO	YES
Pressure Sensor	LOW	LOW	MED	NO	YES
Displacement Transducer	LOW	LOW	LOW	NO	NO

5.2 NDT-tutkimusmenetelmien vertailua

Schnarsin mukaan tuotantovaiheessa tarvitaan enemmän menetelmiä, jotka ovat herkkiä pelkille vaurioille ja vioille. Nykyään rakenteiden tarkastaja saattaa käyttää lähes koko tarkastamisajan tarkastamalla vauriotonta rakennetta ja vain murto-osan löydettyjen vaurioiden tutkimiseen. Mittausjärjestelmien pitäisi johdattaa tarkastaja suoraan mahdollisiin vikakohtiin rakenteissa ja pystyä erottamaan todelliset viat epäselvistä tapauksista. Mallinnustyökaluilla pitäisi pystyä tulevaisuudessa korvaamaan laajasti niitä kokeita, joita nykyään tehdään NDT-menetelmän käyttöönnotossa, kun testataan eri muotogeometriat, vikojen koot ja paikat sekä mittausanturigeometriat. /35/

Yksi yleinen kehityssuunta esim. lentokoneiteollisuuden rakenteiden NDT-tutkimusmenetelmien kehityksessä on ollut mittaustietojen kuvantamismenetelmien kehittyminen ja mittaustietojen parempi tallennusmahdollisuus. Tällaisen kehityssuunnan mukana esim. pistemäisiä mittauksia tekevään ultraäänimittariin on yhdistetty edullinen kaupallinen ultraääniluotaimen paikannin. Tällaisia paikantimia ovat mm. käsikirjoituksen tietokonetallentimet. Menetelmien yhdistämisellä saadaan pistemäisen mittauksen tulokset muutettua tutkittavan komposiittirakenteen kuvaksi, joka on informatiivisempi kuin pistemittaus ja joka saadaan tallennettua jatkotarpeita varten. /38/

Yhdysvalloissa Federal Aviation Administration (FAA) on vertaillut komposiittien NDT-menetelmiä parissa eri tutkimusohjelmassa 2000-luvun aikana. Yhdessä koeohjelmassa vertailtiin lentokoneiteollisuuden komposiittirakenteiden tutkimiseen käytettyjä menetelmiä. Aluksi luotiin ohjeistus ilmailuteollisuuden NDT-menetelmien testaamiseen tarkoitettavien vertailukappaleiden valmistamiseksi. Vertailukappaleiden tutkiminen eri menetelmillä tuotti joukon referenssilaminaatteja, joilla voidaan vertailla komposiittirakenteiden NDT-menetelmiä. Etuna referenssilaminaattien käytöstä on johdonmukainen lähestymistapa komposiittirakenteen NDT-tutkimiseen, mikä vähentää vääriä vikahavaintoja. Lisäksi testaamiseen vaadittavien referenssimateriaalien valmistuskulut alenevat ja NDT-menetelmien vertailu yksinkertaistuu. Yli 70

komposiittirakenteiden ammattimaista tutkijaa teollisuudesta tarkasti 44 koepaneelia ensin perinteisillä lentokoneiteollisuuden menetelmillä, joihin kuului kaksi manuaalista äänitarkastustekniikkaa, kaksi matalataajuustutkimusmenetelmää (ilmeisesti ns. 'bond testing' - laite ja mekaaninen impedanssianalyysi) ja kaksi koneellista äänitarkastustekniikkaa. Menetelmistä koottiin vian havaitsemistodennäköisyydet vian koon funktiona eri menetelmille tehden mittaukset siellä, missä ne tehdään normaalisti valmistus- ja huoltotöissä. Mekaaninen impedanssianalyysi (MIA) todettiin menetelmistä parhaaksi. Manuaalinen äänitarkastus sopi enintään 10-kerroksisen rakenteen testaamiseen. Tämän jälkeen tehtiin sama vertailu ns. uusilla NDT-menetelmillä: automatisoitu äänitarkastus, automaattinen ultraäänimittaus (C-kuva), termografia, laminografia, korkeataajuusultraäänimittaus, shearografia, mikroaaltomittaus, pyyhkäisyultraäänimittaus, akustografia ja monielementtiluotainultraäänimittaus. Menetelmistä termografia, shearografia ja ns. 'bond testing'-laitteisto (ultraäänien käyttö) olivat parhaat ja pystyivät tunnistamaan jopa vikojen koon. Haittana pidettiin sitä, että korkea herkkyys yhdistettynä korkeaan signaali-kohinasuhteeseen lisäsi väärin havaintojen määrää jonkin verran. /47/

Toisessa FAA:n tutkimuksessa käytettiin tutkimuskappaleena helikopterin roottorin lapaa ja verrattiin pääosin samoja NDT-menetelmiä, kuin aiemmassa tutkimuksessa. Tutkimuksessa todettiin, että useat menetelmät ovat hyviä pinnan ja ytimen välisten liimaliitosten vaurioiden havaitsemiseen, laitekustannukset voivat olla erittäin alhaisia ja saavutettava hyöty merkittävä. Termografia, kannettava MIA-mittari (mekaaninen impedanssimittari) ja kaksi automatisoitua äänimittauslaitetta antoivat järjestelmällisesti parhaat tulokset liimaliitosten vaurioiden havaitsemisessa. Lisäksi suuremmista laitteista ultraäänimittauksella saatava C-kuva-menetelmä oli hyvä, mutta resonanssimittaus ei antanut selviä johdonmukaisia tuloksia. Kenttäkäyttöön oton helppouden, hinnan ja yleisen käytön helppouden perusteella parhaiksi menetelmiksi suositeltiin automatisoitua äänitarkastusta ja kannettavaa MIA-mittaria. /48/

5.3 Suosituksia jatkotoimenpiteiksi

Silloittumisastetta mittaavat menetelmät

Silloittumisastetta mittaavia menetelmiä ja laitteistoja, jotka ovat teollisessa tuotannossa ja valmiina tuotteina, on selvästi olemassa useita. Siten nykyään on jo mahdollista saada käyttöön valmiita liikuteltavia tehdaskäyttöön sopivia silloittumisastetta tai muita komposiittien ominaisuuksia mittaavia laitteita.

Tällaisten menetelmien ja laitteiden käyttöönoton edistämiseksi tarvitaan mielellään muutaman vaiheen sisältävä toimintaohjelma. Toimintaohjelmaan kuuluvat seuraavat vaiheet:

1. tietopaketin lähettäminen muoviteollisuudelle,
2. haastattelukartoitus yrityksiä kiinnostavista menetelmistä ja
3. esittelyseminaari.

Aluksi tarvitaan eri menetelmistä kootun tietopaketin (s.o. tämäntyyppisen yhteenvetoraportin) levittämistä muoviteollisuuden yritysten käyttöön, jotta alan yritykset saavat kootun tiedon olemassa olevista menetelmistä. Sen jälkeen tulisi kartoittaa haastattelemalla, mistä menetelmistä yritykset haluavat lisätietoa ja mitä he haluaisivat kokeilla omien valmistusmenetelmiensä yhteydessä. Tämän jälkeen on mahdollista kartoittaa tarkemmin mittausjärjestelmiä toimittavat yritykset ja järjestää mittausjärjestelmien esittely laitteineen muoviteollisuuden edustajien käyttöön. Esittely tapahtuu helposti esim. seminaarina, jossa osanottajina ovat muoviteollisuuden yritysten t&k-henkilöt ja puhujina laite-esittelijät. Erityisesti mukaan on saatava laitteiden käytännön toiminnan esittelyä erilaisten rakenteiden tutkimiseen, joko laitemyyjien esittelykomposiiteilla tai yritysten omilla komposiittirakenteilla.

P&k-rytyksillä on usein tarve nähdä konkreettisesti menetelmien toiminta ja mahdollisesti saatava hyöty ennen oman tuotantotoiminnan muuttamista tai laiteinvestointeja. Siksi on oleellista, että seminaariesittelyihin liittyy todellisten komposiittirakenteiden tutkimista, sillä siten menetelmien käyttökelpoisuutta on helpompi arvioida kuin pelkällä sanallisella seminaariesityksellä.

Komposiittirakenteiden NDT-tutkimusmenetelmät

Useita komposiittirakenteiden NDT-tutkimusmenetelmiä on saatavana teollisuuskäyttöön. Menettely menetelmien käyttöönoton edistämiseksi voi olla samanlainen kuin silloittumisasteen mittausmenetelmien kohdalla eli ensin tiedonvälitys yrityksiin, sitten kartoitus menetelmistä, joita yritykset haluavat kokeilla tai nähdä kokeilukäytössä ja sitten menetelmien toimittajien ja myyjien esittelytilaisuuden järjestäminen.

NDT-tutkimusmenetelmät voidaan tarvittaessa esitellä samassa seminaarissa kuin silloittumisasteen mittausmenetelmät.

6 Kirjallisuusviitteet

1. Mulligan, David. Cure Monitoring for Composites and Adhesives. Report 164, Vol. 14, No. 8. Shrewsbury, Iso-Britannia. 2003. Smithers Rapra. ISBN 1-85957-393-2.
2. Vodicka, Roger. Cure Monitoring Techniques Using Embedded Sensors. Melbourne, Australia. 1997. Department of Defence. DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory. DSTO-TR-0564. Saatavana: <http://dspace.dsto.defence.gov.au/dspace/bitstream/1947/3600/1/DSTO-TN-0110%20PR.pdf>. Luettu 22.10.2009.
3. Anon. Composite Testing: Barcol Hardness. 2009. Saatavana: <http://compositetechnology.blogspot.com/2009/02/composite-testing-barcol-hardness.html>. Luettu 21.10.2009
4. Anon. The Impressor. Laite-esite. 2009. Qualitest. Saatavana: <http://www.worldoftest.com/barcol.htm>. Luettu 21.10.2009
5. ASTM D 2583-95 (Reapproved 2001). Standard Test Method for Indentation Hardness of Rigid Plastics by Means of a Barcol Impressor. ASTM International. West Conshohocken, USA.
6. Zahouily, K. et al. Real-Time Cure Monitoring of UV-Curable Systems by Using Dielectric Analysis and Infrared Spectroscopy. Saatavana: http://www.radtech-europe.com/files_content/zahouilypaper%20april2004.pdf. Luettu 21.10.2009
7. Stark, W. Döring, J. Monitoring of Curing Reaction of Polycondensating Thermosets at Press and Injection Moulding. NDT.net. 1998, Vol.3, No. 11. Saatavana: <http://www.ndt.net/article/ecndt98/material/141/141.htm>. Luettu 22.9.2009.
8. Anon. Dielectric Sensors. 2009. Netzsch GmbH. Saatavana: http://www.e-thermal.com/holometrix/m_sensors.asp. Luettu 22.9.2009.
9. Anon. SmartTrac. Intelligent Process Control System. Laite-esite. 2009. Signature Control Systems. Saatavana: <http://www.signaturecontrol.com/pdf/smarttracbrochure.pdf>. Luettu 21.10.2009.
10. Hager III, N., Domszy, R. Time-Domain-Reflectometry Cure Monitoring. 2001. Saatavana: http://www.msi-sensing.com/pubs/msi_composite_sampe_2001.pdf. Luettu 21.10.2009.
11. Rowe, G. et al. Fill-Front and Cure Progress Monitoring for VARTM with Auto-Calibrating Dielectric Sensors. 2005. Saatavana: kevinchiu.org/sa2005.pdf. Luettu 21.10.2009.
12. Lee, W., Rice, B. Resin Transfer Molding Process Monitoring and Control. 43rd International SAMPE Symposium and Exhibition on Materials and Process Affordability Keys to the Future Vol.43 book 1 Anaheim, California May 31-June 4, 1998. Saatavana: <http://www.aschome.com/PDFs/Resin%20Transfer%20Molding%10Process%20Monitoring%20And%20Control.pdf>. Luettu 22.9.2009.

13. Buczek, M. et al. Self Directed Cure Control of Composite Material Field Level Repairs. 2009. Saatavana: <http://www.aschome.com/PDFs/Self%20directed%20cure%20control%20of%20composite%20material%20field%20level%20repairs.pdf>. Luettu 2.10.2009.
14. Mason, K. Monitoring the cure itself. 2006. High Performance Composites. 9.1.2006. Saatavana: <http://www.compositesworld.com/articles/monitoring-the-cure-itself.aspx>. Luettu 21.10.2009.
15. May, R. Miniature Fiber Optic Viscoelasticity Sensor for Composite Cure Monitoring. 1998. Virginia Polytechnic Institute and State University. Saatavana: <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-61598-91954/unrestricted/CH2.PDF>. Luettu 21.10.2009.
16. Kartik, V. et al. Flow Front and Cure Monitoring for Resin Transfer Molding Using Ultrasonic Guided Waves in Cylindrical Wires. 2006. Proc. National Seminar on Non-Destructive Evaluation Dec. 7 - 9, 2006, Hyderabad, India. Saatavana: <http://www.ndt.net/article/nde-india2006/files/tp-80-pap.pdf>. Luettu 21.10.2009.
17. Anttila, E. Kuituoptiset anturit biomateriaalien diagnostiikassa. 2006. Tampereen teknillinen yliopisto. Teknis-luonnontieteellinen osasto. Diplomityö. Tampere. 85 s.
18. Todoroki, A. et al. Luminance change method for cure monitoring of GFRP. 2006. Key Engineering Materials. Vols. 321-323, p. 1316-1321. Saatavana: <http://www.todoroki-lab.net/English/E64.pdf>. Luettu 21.10.2009.
19. Englund, M. et al. 2008. Kuituoptiset anturit siltarakenteiden mittauksissa. Tutkimusselostus. CMC-3929. Fortum Power and Heat Oy. Espoo. Saatavana: http://alk.tiehallinto.fi/sillat/julkaisut/kuituoptiset_anturit_2008.pdf. Luettu 21.10.2009.
20. Wang, S. et al. Laser Curing Apparatus with Real-Time Monitoring and Control. 2007. Patent No. US7245371 B2. July 17, 2007. B&W Tek, Inc., USA.
21. Lam, T. A New Era in Affordable Raman Spectroscopy. June 2004. Raman Technology For Today's Spectroscopists. P. 30 - 37. Saatavana: <http://www.enwaveopt.com/doc/SpectroscopyArticle.pdf>. Luettu 21.10.2009
22. Anon. Real-Time Analyzers. Providing Chemical Information When & Where You Need It. Laite-esite. 2009. Real-Time Analyzers, Inc. Saatavana: <http://www.rta.biz/images/customer-files//RamanPro110818FNLLR.pdf>. Luettu 21.10.2009.
23. Anon. Ezraman-M. Field Portable Raman Analyzer. Laite-esite. 2009. Enwave Optronics, Inc. Saatavana: <http://www.enwaveopt.com/doc/EZRaman-M.pdf>. Luettu 21.10.2009.
24. Jiang, B., Huang, Y. Near Infrared Spectroscopy for On-line Monitoring of Alkali-Free Cloth/Phenolic Resin Prepreg During Manufacture. 2007. International Journal of Molecular Sciences 8, s. 541-552. Saatavana: www.mdpi.com/1422-0067/8/6/541/pdf. Luettu 21.10.2009.
25. Blanchard, G. et al. Apparatus for In Situ, Non-Invasive Polymer Cure Determination. 1998. Patent No. US5707587. January 13, 1998. Board of Trustees operating Michigan State University. USA.

26. Anon. Cure Monitor Services. 2009. Spectra Group Limited, Inc. Saatavana: <http://www.sglinc.com/cure.htm>. Luettu 22.9.2009.
27. Neckers, D. Development of Corrosion Resistant Energy Curable Coatings. 2009. Center for Photochemical Sciences. Bowling Green State University. Bowling Green. USA. Saatavana: http://www.paint.org/meetings/marine/marine10_09.pdf. Luettu 22.10.2009.
28. Walsh, T. Resin Cure Monitor. 2000. Patent No. US6099162. August 8, 2000. HydriL Company. USA.
29. Anon. User's Guide. HFS-3, HFS-4 Thin Film Flux Sensors. Laitesite. 2009. Omega Engineering Inc. Saatavana: <http://www.omega.com/manuals/manualpdf/m1844.pdf>. Luettu 22.10.2009.
30. Anon. Injection Short-Shot Detection. 2009. MAPE Engineering Switzerland SA. Saatavana: <http://www.thermoflux.ch/en>. Luettu 22.10.2009.
31. Saarela, O. et al. Komposiittirakenteet. 2003. Muoviyhdistys Ry. Hakapaino Oy. Helsinki. 494 s.
32. Shepard, S. et al. Thermographic Inspection of Composite Structures. 2003. SAMPE Journal, Vol. 39, No. 5. S. 53 - 58. Saatavana: http://www.lot-orient.com/site/site_down/pt_sampe1003_uken.pdf Luettu 26.10.2009.
33. Servais, P., Gerlach, N. Development of a NDT method using thermography for composite material inspection of aircraft using military thermal imager. 2005. Proc. Vth International Workshop, Advances in Signal Processing for Non Destructive Evaluation of Materials, Québec City (Canada), 2 - 4 Aug. 2005. Saatavana: <http://ratatat.pbworks.com/f/Development+of+NDT+Method+using+Thermography+for+composite+material+inspection.pdf>. Luettu 22.10.2009.
34. Pezzoni, R. Laser-Shearography for Nondestructive Testing of Large Area Composite Helicopter Structures. 2000. 15th World Conference on Nondestructive Testing, Roma (Italy) 15 - 21 October 2000. Saatavana: <http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn732/idn732.htm>. Luettu 22.10.2009
35. Schnars, U., Henrich, R. Applications of NDT Methods on Composite Structures in Aerospace Industry. 2006. CDCM 2006 - Conference on Damage in Composite Materials 2006 18th - 19th 2006 in Stuttgart Germany. Saatavana: <http://www.ndt.net/article/cdcm2006/papers/schnars.pdf>. Luettu 7.10.2009.
36. Krupka, R., Walz, T. Industrial Applications of Shearography for Inspection of Aircraft Components. 2006. Proc. National Seminar on Non-Destructive Evaluation Dec. 7-9, 2006, Hyderabad. Saatavana: <http://www.ndt.net/article/nde-india2006/files/tp-13-pap.pdf>. Luettu 22.10.2009.
37. Newman, J. Aerospace NDT with Advanced Laser Shearography. 2008. 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25 - 28 Oct 2008, Shanghai, China. Saatavana: www.ndt.net/article/wcndt2008/papers/534.pdf. Luettu 22.10.2009.

38. Hsu, D. Nondestructive Inspection of Composite Structures: Methods and Practice. 2008. 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 Oct 2008, Shanghai, China. Saatavana: <http://www.ndt.net/article/wcndt2008/papers/612.pdf>. Luettu 26.10.2009.
39. Sinha, P. Composite Materials and Structures. 2006. Composite Centre of Excellence, AR&DB, Department of Aerospace Engineering. Kharagpur. Intia. Saatavana: <http://www.kshitij.iitkgp.ernet.in/ebooks/index.html>. Luettu 22.10.2009.
40. Lamarre, A., Lepage, B. Progress in Bond Testing technology. 2009. ATA Conference, Atlanta, September 2009. Saatavana: <http://www.airlines.org/NR/rdonlyres/7F680EB0-7BE4-4B76-8AED-E518A53770EC/0/2009NDTForum16Lamarre.pdf>. Luettu 26.10.2009.
41. Anon. Multi-mode Adhesive Bond Testing. Testing Theory. 2009. Olympus Corporation. Saatavana: <http://www.olympus-ims.com/en/applications-and-solutions/ndt-theory/bondtesting>. Luettu 26.10.2009.
42. Register, John. NDT of Aerospace Composites. 2005. R-Con NDT Inc. Saatavana: http://www.ukintpress-conferences.com/conf/aerona05/pres/ndt_2/register.pdf. Luettu 30.10.2009.
43. Anon. What's a Strain Gage? Introduction to Strain Gages. 2009. Kyowa Electronic Instruments Co., Ltd. Saatavana: <http://www.kyowa-ei.co.jp/english/products/gages/pdf/whats.pdf>. Luettu 13.10.2009
44. Anon. Suppliers of Non-Destructive Test Equipment. Advanced NDT Limited. 2009. Saatavana: http://www.advanced-ndt.co.uk/Bond_Testing_Advanced_NDT.html. Luettu 26.10.2009.
45. Terveys ja turvallisuus hitsauksessa ja termisessä leikkauksessa. 1996. Tekninen tiedotus. MET-julkaisuja 7/96. Metalliteollisuuden kustannus. Helsinki. 27 s.
46. Ueda, M. et al. 2004. Monitoring delamination of laminated CFRP using the electric potential change method: Application of normalization method and the effect of the shape of a delamination crack. Advanced Composite Materials, Vol. 13, No. 3 - 4, s. 311 - 324. Saatavana: www.todorokilab.net/English/E46.pdf. Luettu 22.10.2009.
47. Roach, D. Assessing conventional and advanced NDI for composite aircraft. 2008. High Performance Composites. July 2008. Saatavana: <http://www.compositesworld.com/articles/assessing-conventional-and-advanced-ndi-for-composite-aircraft.aspx>. Luettu 26.10.2009.
48. Roach, D. Alternative Methods to Improve the Inspection of Skin-to-Substructure Bond Lines in Main Rotor Blades. 2009. FAA Airworthiness Assurance Center (AANC), Sandia National Labs. Saatavana: <http://www.airlines.org/NR/rdonlyres/A9D2E22C-6946-485D-A784-88DD9B9BA208/0/25Roach08.pdf>. Luettu 26.10.2009.
49. Anttila, E. et al. Evaluation of polymerization shrinkage and hydroscopic expansion of fiber-reinforced biocomposites using optical fiber Bragg grating sensors. 2008. Dental Materials 24. S. 1720 - 1727.