

Toni Laurila

Komposiittimateriaalin tutkiminen putkistokorjauksiin soveltumista varten

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

Insinööryö

18.04.2016

<p>Tekijä Otsikko</p> <p>Sivumäärä Aika</p>	<p>Toni Laurila Komposiittimateriaalin tutkiminen putkistokorjauksiin soveltumista varten</p> <p>86 sivua + 3 liitettä 18.04.2016</p>
<p>Tutkinto</p>	<p>Insinööri (AMK)</p>
<p>Koulutusohjelma</p>	<p>Kone- ja tuotantotekniikka</p>
<p>Suuntautumisvaihtoehto</p>	<p>Energia- ja ympäristötekniikka</p>
<p>Ohjaajat</p>	<p>Mekaanisen kunnossapidon ryhmän vetäjä Mika Uussilta Lehtori Juha Kotamies</p>
<p>Tämä insinöörityö tehtiin Neste Oyj:n toimeksiantona. Työssä tutkittiin kuitulujitettua polymeerikomposiittia ja komposiittikorjausmenetelmän soveltuvuutta putkistojen tilapäiskorjausmenetelmäksi.</p> <p>Kuitulujitettujen polymeerikomposiittien ominaisuuksiin perehdyttiin työn teoriaosuudessa. Muita tilapäiskorjausmenetelmiä käytiin myös lyhyesti läpi. Komposiittikorjausmenetelmästä selvitettiin toteutus suoralle putkelle, putkikäyrälle, t-haaraliitokselle sekä säiliölle ja korjauksen suunnitteluun käytettävät laskentakaavat käytiin läpi.</p> <p>Komposiittimateriaalille tehtiin myös aineenkoetuskokeita, jotka tuottivat tietoa kuitulujitettujen polymeerikomposiittien ominaisuuksista sekä tarkastamisesta. Menetelmää arvioitiin myös kustannusnäkökulmasta selvittämällä komposiittikorjaukseen liittyviä kustannuksia. Näiden lisäksi korjausmenetelmää pohdittiin laatu- ja tarkastusnäkökulmasta.</p> <p>Työ antoi tuloksia ja tietoa komposiittimateriaalista ja komposiittikorjausmenetelmästä. Tavoite oli, että tieto komposiittien käyttömahdollisuudesta korjausmenetelmänä laajentuisi yrityksen sisällä. Työ toimii myös tukimateriaalina ja tietolähteenä suunniteltaessa komposiittikorjauksien käyttöä.</p>	
<p>Avainsanat</p>	<p>Komposiitti, tilapäiskorjaus, kunnossapito</p>

Author Title	Toni Laurila Use of Composite Materials in Pipe Repairs
Number of Pages Date	86 pages + 3 appendices 18 April 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical Engineering
Specialisation option	Energy and Environmental Engineering
Instructors	Mika Uussilta, Group Leader in Mechanical Maintenance Juha Kotamies, Senior Lecturer
<p>This Bachelor's thesis was commissioned by Neste Corporation. The objective of this thesis was to study a fibre-reinforced polymer composite material and the applicability of the composite repair method as a temporary repair method.</p> <p>The properties of fibre-reinforced polymer composites were studied in the theory part of this Bachelor's thesis. Other temporary repair methods were briefly discussed as well. In addition, the execution of the composite repair method for different types of piping, such as straight piping, elbow, tee branch and a tank, was discussed. The equations used in designing a composite repair were also discussed.</p> <p>Material testing was also performed for the composite material which produced information about the properties and inspection of the fibre-reinforced polymer composite. The composite repair method was also evaluated from the aspects of costs, quality control and inspection.</p> <p>In conclusion, this Bachelor's thesis produced results and knowledge for Neste Corporation about the properties of the composite material and the composite repair method. The goal was to expand the knowledge of the use of the composite method as a temporary pipe repair method. This thesis also works as a supporting material when planning the use of composite repairs.</p>	
Keywords	Composite, temporary repair, maintenance

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Neste Oyj	1
3	Composite Aspect Oy Ab	1
4	Kunnossapito ja tilapäiskorjaukset	2
4.1	Yleistä kunnossapidosta	2
4.2	Putkistojen tilapäiskorjausmenetelmät	3
4.3	Komposiittikorjaus tilapäiskorjausmenetelmänä	4
5	Kuitulujitetut polymeerikomposiitit	6
5.1	Yleistä komposiiteista	6
5.2	Komposiitin ominaisuudet	7
5.3	Lujitekuidut	8
5.3.1	Lasikuitu	8
5.3.2	Hiilikuitu	9
5.3.3	Aramidikuitu	9
5.4	Matriisihartsit	10
5.5	Täyteaineet	11
5.6	UV-kesto	11
5.7	Lämmönkesto	12
5.8	Puolivalmistekomposiitit	14
5.9	Sovellukset	15
6	Komposiittikorjausmenetelmä	15
6.1	Korjausmenetelmä suoralle putkelle	15
6.2	Korjausmenetelmä putkikäyrälle	26
6.3	Korjausmenetelmä T-haaraliitokselle	27
6.4	Korjausmenetelmä säiliölle	27
7	Laskentakaavat komposiittikorjaukselle	28

7.1	Ei-vuotava putki	28
7.2	Vuotava putki	29
7.3	Korjauksen kokonaispituus	31
8	NRI:n komposiittimateriaalit	32
9	Vertailu ja käyttömahdollisuudet	32
10	Komposiittikorjauksen laatu ja tarkastaminen	34
11	Referenssejä komposiittikorjauksista	38
12	Komposiittikorjauksen kustannukset	41
13	Aineenkoetus komposiittimateriaalille	45
13.1	Rikkova aineenkoetus	45
13.1.1	Testimateriaalit	45
13.1.2	Testikappaleiden valmistaminen	45
13.1.3	Teräs-komposiittivetokoe	48
13.1.4	Komposiitin ja teräksen kovuuskoe	56
13.1.5	Iskukoe	59
13.1.6	Suolasumukoe ja vetokoe	62
13.2	Rikkomaton aineenkoetus	64
14	Aineenkoetuskokeiden tulokset	68
14.1	Teräs-komposiittivetokokeen tulokset	68
14.2	Komposiitin ja teräksen kovuuskokeen tulokset	70
14.3	Iskukokeen tulokset	71
14.4	Suolasumukokeen ja vetokokeen tulokset	73
15	Päätelmät	81
16	Yhteenveto	82
	Lähteet	84
	Liitteet	
	Liite 1. NRI:n tuotteiden kemiallinen yhteensopivuus	
	Liite 2. NRI:n komposiittimateriaalien tuotetiedot	
	Liite 3. Komposiittikorjauksen arviointilomake	

Lyhenteet

NDT *Nondestructive testing*. Rikkomaton aineenkoetus.

Matriisi Komposiitin kokonaisuudeksi sitova materiaali, esimerkiksi muovi.

Prepreg *Preimpregnated*. Matriisimuovilla kyllästetty lujitetuote, puolivalmiste.

1 Johdanto

Tämän insinööriyön tarkoituksena on tutkia kuitulujitettua polymeerikomposiittimateriaalia sekä ASME PCC-2 -standardin mukaista komposiittikorjausmenetelmää ja arvioida sen soveltumista yhdeksi tilapäiskorjausmenetelmäksi Nesteen mekaaniseen kunnossapitoon. Komposiittimateriaalille tehdään aineenkoetustestauksia ja arvioidaan sen mekaanisia ominaisuuksia niiden perusteella. Työssä myös vertaillaan komposiittikorjausmenetelmää muihin Nesteellä käytettäviin tilapäiskorjausmenetelmiin. Tarkoituksena on myös selvittää komposiittikorjauksiin liittyviä kustannuksia ja arvioida menetelmää niiden perusteella.

2 Neste Oyj

Neste Oyj on suomalainen öljynjalostukseen ja uusiutuviin ratkaisuihin keskittyvä yhtiö. Sen liikevaihto vuonna 2014 oli noin 15 miljardia euroa. Yrityksellä on tuotantolaitoksia Porvoon ja Naantalın lisäksi Rotterdamissa ja Singaporessa. Nesteen henkilöstön määrä on noin 5 000 henkilöä. Uusiutuvia tuotteita valmistetaan Porvoon, Rotterdamin ja Singaporen jalostamoilla, raakaöljypohjaisia öljytuotteita puolestaan Porvoossa ja Naantalissa. Näiden lisäksi Neste omistaa osan Bahrainin tuotantolaitoksesta, jossa tuotetaan perusöljyä. [1.]

Nesteen uusiutuvien tuotteiden jalostamot ovat ISCC-sertifioituja tai niillä on Yhdysvaltain ympäristöviranomaisen EPA:n antama hyväksyntä. Porvoon, Naantalın ja Rotterdamin jalostamot ovat sen lisäksi ISO 14001 -ympäristösertifioituja. [1.]

3 Composite Aspect Oy Ab

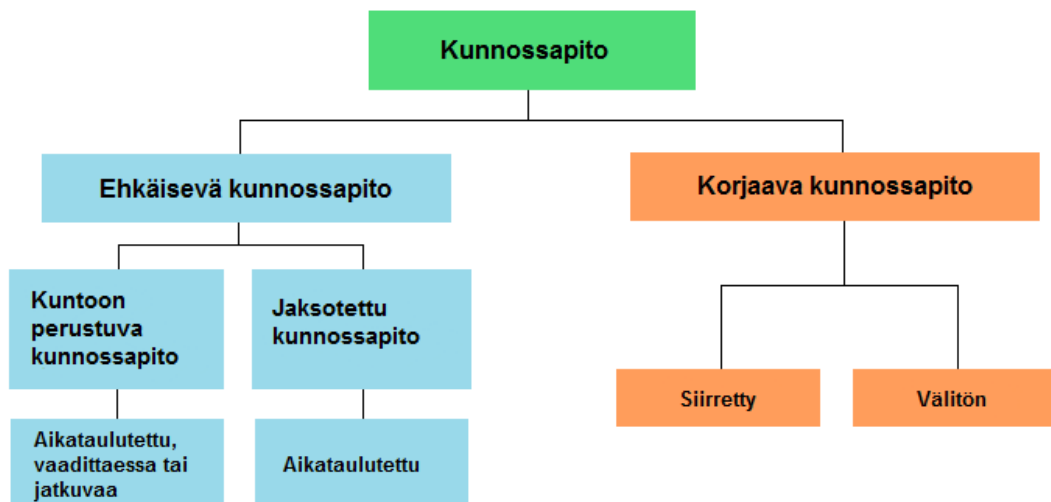
Composite Aspect Oy Ab on sipoolainen yhtiö, joka on erikoistunut korkeateknologiseen komposiittiteollisuuteen. Yrityksen ydinosamista ovat teollisuuden putkistojen ja rakenteiden korjaukset ja vahvistukset, komposiittimateriaalien huolto, korjaus ja ylläpito sekä paineellisten putkivuotojen korjaukset. Yrityksen henkilökunta on koulutettu komposiittikorjauksia varten NRI:n eli Neptune Research Incin kouluttajien toimesta. Composite Aspect Oy Ab:n käyttämät komposiittimateriaalit ja menetelmät ovat NRI:n valmistamia. [2.]

Neptune Research Inc eli NRI on yhdysvaltalainen komposiitteihin ja komposiittikorjauksiin erikoistunut yritys. NRI:llä on kolmenkymmenen vuoden kokemus komposiittimateriaaleilla suoritettavista korjauksista prosessi-, jalostamo- sekä kemianteollisuudesta. [3.]

4 Kunnossapito ja tilapäiskorjaukset

4.1 Yleistä kunnossapidosta

Kunnossapito on määritelty standardissa SFS-EN 13306 tarkoittamaan niitä koneen elinkaaren aikana tehtyjä toimenpiteitä, jotka voivat olla teknisiä, hallinnollisia ja liikkeenjohtollisia, ja joiden tarkoitus on ylläpitää tai palauttaa koneen toimintakyky sille tasolle, että kone pystyy suoriutumaan siltä vaadituista toiminnoista. Kunnossapito on laaja käsite pitäen sisällään useita erilaisia kunnossapidon alalajeja kuvan 1 mukaisesti. [4.]



Kuva 1. Kunnossapidon lajit [4]

Komposiittikorjauksien näkökulmasta olennaisia kunnossapidon alalajeja ovat kuntoon perustuva kunnossapito ja korjaava kunnossapito.

Kuntoon perustuvassa kunnossapidossa laitteelle tehdään tarkastuksien perusteella vaadittavia kunnossapitotoimia ennen kuin laite vikaantuu. Tällaista kunnossapitoa on muun muassa tarkastuksessa havaitun ohentuneen putkiston seinämän vahvistaminen käyttöiän pidentämiseksi. [4.]

Korjaava kunnossapito on sellaista kunnossapitoa, joka suoritetaan vian havaitsemisen jälkeen. Tavoitteena on palauttaa laite sellaiseen tilaan, jossa se voi jälleen toteuttaa siltä vaadittuja toimintoja. Korjaavaa kunnossapitoa on esimerkiksi korroosion aiheuttaman vuodon korjaaminen teräsputkesta. [4.]

4.2 Putkistojen tilapäiskorjausmenetelmät

Tilapäisiä korjausmenetelmiä joudutaan käyttämään tilanteissa, joissa korjattavaa kohdetta ei saada eristetyksi paineenalaisesta, tuotannossa olevasta putkistolinjasta ilman tuotannon alasajoa. Tilapäiskorjauksen tehtävä on antaa lisää aikaa putkiston käytölle siihen asti, että tuotannon alasajo on mahdollista suorittaa hallitusti, minkä jälkeen kohde korjataan pysyvällä korjausmenetelmällä. Tilapäiskorjauksessa on kiinnitettävä erityisen paljon huomiota turvallisuuteen korjauksen aikana, sillä korjattava kohde on usein paineellinen sekä vuotava tai ohentunut seinämävahvuudeltaan. Korjausta suunniteltaessa on otettava huomioon, onko kyseiseen kohteeseen suunniteltu korjausratkaisu järkevä turvallisuuden lisäksi myös toimintavarmuuden ja kustannusten kannalta. Parhaassa tapauksessa alasajo voidaan suorittaa hallitusti suunnitellussa yksikkösisokissa tai suurseisokin aikana. Hallitulla tuotannon alasajolla voidaan välttyä myös mahdollisilta laitevaurioilta prosessilaitteissa, joita voi esiintyä nopean alasajon yhteydessä. [5; 6.]

Tilapäiskorjaus on aina viimeinen vaihtoehto korjaukseksi, kun putkiston eristäminen ei ole mahdollista eikä yksikön alasajoa voida suorittaa. Riskien kartoittaminen ja sopivimman korjausmenetelmän valinta tehdään tapauskohtaisesti. [7.]

Tosiasia on se, että tilapäiskorjauksia joudutaan tekemään kaikilla tuotantolinjoilla vähintään muutamia vuodessa. Korjattavia linjoja ovat useimmiten höyry-, lauhde-, kaukolämpö- ja muut vastaavat käyttöhyödykeputkilinjat. Tilapäiskorjauksen käytölle antaa hyväksynnän tuotantolinjan käytönvalvoja. [8.]

Mekaanisessa kunnossapidossa putkistojen tilapäiskorjausmenetelminä käytetään pääasiassa kolmea menetelmää: massapantakorjausta, paikkalevykorjausta tai hitsattua koteloratkaisua.

Massapantakorjausmenetelmässä korjattavan putkenosan päälle asetetaan metallinen kotelo, joka koostuu kahdesta puoliskosta. Kun kotelo on asennettu korjattavan kohdan päälle, se täytetään tiivistemassalla massantäyttöventtiilien kautta, jotka ovat kiinteinä kotelossa. Massapantakorjauksia voidaan toteuttaa ei-vuotavassa kohteessa niin, että korjattavan alueen päätyihin asennetaan massapannat ja niiden väliin hitsataan putki massapantoihin kiinni, jolloin tiivistemassalla täytetään ainoastaan päädyissä olevat massapannat. Massapantakorjaukset sopivat monenlaisiin erilaisiin kohteisiin, kuten esimerkiksi putkistoihin ja laippapareihin. [8; 9; 10.]

Paikkalevykorjauksissa korjattavan kohteen päälle hitsataan metallinen lappu. Niitä voidaan käyttää massapantoja laajemmin geometrialtaan haastavammissa putkiston osissa. Haasteena on kuitenkin asennuksen aikaisten tulitöiden aikaansaama syttymisriski, varsinkin jos kohde tai ympäristö on erittäin syttymisherkkä. Jos korjattavasta kohteesta vuotaa syttymisherkkää ainetta, ei tulitöitä voida suorittaa eikä paikkalevyä näin ollen käyttää korjausmenetelmänä. [8; 10.]

Hitsattavassa koteloratkaisussa korjattavan kohteen päälle asennetaan kohteeseen sopiva kotelo hitsaamalla se kohteeseen kiinni. Myös hitsatulla koteloratkaisulla on haasteena mahdollinen syttymisriski syttymisherkässä ympäristössä asennukseen vaadittavien tulitöiden vuoksi. [6; 10.]

Komposiittimenetelmä tuo yhden lisäratkaisun edellä esiteltyjen korjausmenetelmien lisäksi mekaaniseen kunnossapitoon. Tässä työssä tutkitaan komposiittikorjausmenetelmää materiaaliteknisestä näkökulmasta.

4.3 Komposiittikorjaus tilapäiskorjausmenetelmänä

Komposiittikorjausmenetelmässä putken korjaus suoritetaan käärimällä kuitulujitettua polymeerikomposiittia putken ulkopinnalle. Korjattavan kohteen päälle kääritään hartsilla kyllästettyä komposiittinauhaa tarvittava määrä, joka lasketaan korjaukselta vaaditun kestoajan ja paineenkeston perusteella. Komposiitilla korjattava alue on esikäsiteltävä

riittävän pinnanlaadun aikaansaamiseksi. Näkyvä lika, ruoste ja rasva on poistettava riittävän tartunnan takaamiseksi. Tämän lisäksi pinnalle on suoritettava hiekkapuhallus tai hionta sähkö- tai paineilmakäyttöisellä työkalulla tai käsin. Pinnan esikäsitteilyn laatua verrataan NACE/SSPC tai Swedish Standard -standardiin, joissa määritellään pintakäsittelyä varten erilaisia pinnan puhtausarvoja. Standardista löytyy esimerkkikuvia ja kuvauksia, joiden perusteella todetaan pinnan puhtausasteen standardinmukaisuus. [11.]

Komposiittimateriaalilla suoritettava korjaus ei aiheuta syttymisriskiä korjauksen aikana. Tämä on etu, mikäli korjaus suoritetaan putkistoon, jossa kulkee syttymisherkkää nestettä/kaasua tai ympäristö muuten asettaa rajoituksia syttymisherkkyyden puolesta. Komposiittimateriaalilla korjattaessa etuna on myös vapaus korjata monimutkaisiakin geometrioita pelkkien suorien putkistojen lisäksi. Vapaus korjata monimutkaisiakin muotoja antaa mahdollisuuden käyttää komposiittikorjauksia suorien putkien lisäksi myös monimutkaisemmissakin korjauskohteissa, kuten esimerkiksi T-haaroissa, putki-ikäyrissä, laipoissa, säiliöiden vahvistuskorjauksissa sekä tapauksesta riippuen myös venttiileissä. [12.]

Komposiitin käyttämisessä putkistojen tilapäiskorjauksissa haasteena on pääasiassa lämmönkesto. Esimerkiksi epoksihartsiselle ja lasikuituvahvistetulle komposiitille on ilmoitettu materiaalituottajan toimesta maksimilämpötilaksi 149 °C, joka on tarjolla olevien komposiittimateriaalien lämpötilakestoltaan paras. On huomioitava, että vaikka maksimilämpötilaksi on ilmoitettu 149 °C, niin jo sitä alemmissa lämpötiloissa komposiitin ominaisuudet voivat muuttua materiaalin teknisissä tiedoissa ilmoitettuihin, standardilämpötilassa 23 °C mitattuihin ominaisuuksiin nähden. [3.]

Tilannekohtaisesti on valittava komposiittimateriaali, joka parhaiten soveltuu korjauskohteeseen. NRI:n polymeerikomposiiteissa käytettyjen matriisimateriaalien yhteensopivuutta eri kemikaalien kanssa voidaan arvioida liitteen 1 mukaisesta taulukosta. Kyseinen taulukko toimii komposiittikorjauksia suunniteltaessa apuvälineenä valittaessa sopivaa komposiittimateriaalia korjauskohteisiin. [11.]

Komposiittikorjauksia käytetään pääasiassa vahvistamaan seinämävahvuudeltaan heikentyneitä putkistoja, jos korjattavan putkiston käyttöikää halutaan pidentää niin, että se kestää seuraavaan alasajoon asti, jolloin se voidaan kokonaisuudessaan uusida. Mikäli putkiston maksimikäyttölämpötila on vielä komposiitille sallituissa rajoissa, niin

komposiittimenetelmä on harkitsemisen arvoinen vaihtoehto korjausmenetelmäksi kohteeseen. Komposiitilla voidaan tehdä myös vuotokorjauksia tukkimalla vuoto ensin vuodonestopannalla ja käärimällä tämän jälkeen vaurioitunut alue pantoinensa komposiitin alle. [11.]

5 Kuitulujitetut polymeerikomposiitit

5.1 Yleistä komposiiteista

Komposiitti tarkoittaa yleisesti materiaalia, joka koostuu kahdesta tai useammasta eri materiaalista, ja jonka ominaisuudet ovat paremmat kuin materiaaliosien summa erikseen. Komposiitteja on olemassa eri matriisi- ja kuitumateriaalien yhdistelminä, mutta tässä työssä keskitytään vain kuitulujitettuihin polymeerikomposiitteihin. Kuitulujitetut polymeerikomposiitit koostuvat matriisihartsista ja vahvistavista kuiduista. Kuidut antavat komposiiteille lujuusominaisuudet ja matriisi välittää materiaaliin kohdistuvat voimat kuiduille, pitää kuidut koossa ja suojaa komposiittia. Polymeerimatriisi on useimmiten epoksia, polyuretaania, polyesteriä, vinyyliesteriä tai fenolihartsia. Kuitumateriaaleina taas yleisimmin käytettyjä ovat lasikuitu, hiilikuitu sekä aromaattinen polyamidikuitu eli aramidikuitu. Kuitumateriaaleina käytetään myös polyeteenikuituja, boorikuituja, piikarbidikuituja, erilaisia keraamisia kuituja sekä luonnonkuituja. [13.]

Lujitekuidut voivat olla komposiittimateriaalissa pitkinä kuituina tai katkokuituina. Yksittäisten kuitujen paksuus voi olla millimetrin tuhannesosia. Jatkojalostettaessa kuituja ne voidaan koota kuitukimpuiksi, jotka ovat kierteettömiä, tai langoiksi, jotka ovat kierrettyjä. [13.]

Kuitujen lujuus on suurimmillaan kuitujen suunnassa ja vastaavasti heikoimmillaan kohtisuorassa kuituja vastaan. Kuitujen asettelulla voidaan vaikuttaa komposiitin lujuuteen suunnatusti. Kuidut voidaan asettaa komposiittiin yhdessä suunnassa, ja tällöin saadaan maksimaalinen lujuus komposiitille kuitujen suunnassa. Tällöin on otettava huomioon komposiitin käyttökohde ja siihen kohdistuvat rasitukset sekä niiden vaikutussuunta komposiittiin nähden. [13]

Kuidut voidaan asettaa komposiittiin myös niin, että ne ovat toisiaan vastaan kohtisuorassa, kahteen tai useampaan suuntaan yhdessä tasossa tai jopa kolmiulotteisesti

kolmeen suuntaan. Kuitujen asettamisella useampiin suuntiin haetaan yleensä kompromissia lujuuden suhteen niin, että komposiitilla on kohtalaiset lujuusominaisuudet useammassa suunnassa. Ratkaisua kannattaa kuitenkin välttää, mikäli komposiittiin kohdistuvien rasitusten suunta on selvästi tiedossa, jolloin kuitujen suuntauksella rasitusten kannalta suotuisasti komposiitti voidaan optimoida kyseiseen käyttökohteeseen parhaiten soveltuvaksi lujuusominaisuuksiltaan. Tässä työssä tutkittavissa komposiittimateriaaleissa lujitekuidut ovat ristikkäin aseteltuja jatkuvia kuituja. [11.]

Lujitemuovituotteissa voidaan käyttää erilaisia pinnoitteita. Tällaisia ovat muun muassa geelipinnoitteet eli gelcoatit, suojapinnoitteet eli topcoatit ja erilaiset maalit sekä lakat. Pinnoitusmenetelmiä ovat muun muassa muottipinnoitus, kuumapainatus, tyhjiömetallointi, galvaaninen pinnoitus, pintahuopaus sekä kestopuovipinnoitus. [13.]

5.2 Komposiitin ominaisuudet

Komposiitin ominaisuuksiin vaikuttavat valmistuksessa käytetyt raaka-aineet ja rakenteen valmistustapa tai -prosessi. Kun puhutaan kuitulujitetun komposiitin seossuhteista, tärkeimpänä niistä on lujitepitoisuus. Teoreettisesti suurin lujitepitoisuus käytettäessä pyöreitä ja yhdensuuntaisia kuituja on 91 tilavuusprosenttia. Käytännössä lujitepitoisuus on kuitenkin yhdensuuntaisia kuituja käytettäessä maksimissaan 65–70 tilavuusprosenttia, sillä kuidut eivät ole jakaantuneet tasaisesti ja niiden välissä on aina oltava kuitujen välillä kuormitusta siirtävää muovimatriisia. [13.]

Matriisimuovien lämpölaajenemiskertoimet ovat yleisesti ottaen paljon korkeampia kuin metallien vastaavat, kun taas lujitekuitujen lämpölaajenemiskertoimet ovat pienemmät pituussuunnassa kuin metallien vastaavat. Hiili- ja aramidikuiduilla lämpölaajenemiskertoimet voivat olla jopa negatiivisia. Komposiitin lämpölaajeneminen on siinä käytetyn matriisimuovin ja lujitekuidun kertoimien välimaastossa. Komposiittikorjausta suunniteltaessa on otettava huomioon korjauskohteen materiaalin pituuden lämpölaajenemiskerros ja korjaukseen käytettävän komposiitin pituuden lämpölaajenemiskerros. Esimerkiksi hiiliteräkselle kyseinen arvo on $12 \cdot 10^{-6} \text{ 1}^\circ\text{C}$ ja lasikuituvahvistetulle epoksihartsiselle komposiitille, Thermo Wrap Inspectablelle, kerros on $10,3 \cdot 10^{-6} \text{ 1}^\circ\text{C}$. Lämpölaajenemiskertoimia käytetään laskettaessa komposiittikorjauksen suhteellista venymää. Korjauksen suunnittelussa lämpölaajenemiskertoimien ero korjauskohteen ja komposiittimateriaalin välillä otetaan huomioon siten, että korkean lämpötilan korjaus-

kohteissa komposiittikorjauksen sallitusta venymästä tulee pienempi. Kun sallittu venymä on pienempi, kasvaa komposiittikorjauksen minimipaksuus laskelmissa. Komposiitin kovettuessa korjauskohteen pintaan hartsin ja perusaineen välille muodostuu liitos, joka kestää myös lämpölaajenemisen. [3; 11; 13; 14.]

Komposiitin ominaisuuksiin vaikuttava tekijä on myös käyttöympäristön lämpötila sekä kosteuspitoisuus. Komposiittien rakenteeseen jää myös aina jonkin verran huokoisuutta. Huokoisuus on riippuvaista käytetystä valmistustavasta ja sitä voivat aiheuttaa myös ainesosat, joita voi vapautua joidenkin hartsien kovettumisreaktiossa.

Polymeerikomposiiteissa käytettävät matriisimuovit ovat taipuvaisia absorboimaan kosteutta itseensä. Kuitumateriaaleista aramidikuitu on kosteutta absorboiva, kun taas lasi- ja hiilikuitu eivät ime kosteutta itseensä. Kosteuspitoisuus voidaan laskennallisesti todeta, kun tiedetään kuivan materiaalin sekä kosteutta absorboineen materiaalin massa. Kosteuspitoisuusprosentti lasketaan tällöin kaavan 1 mukaan [13.]:

$$c = \frac{(m - m_0)}{m_0} * 100\% \quad (1)$$

c kosteuspitoisuusprosentti

m kosteutta absorboineen materiaalin massa

m_0 kuivan materiaalin massa

5.3 Lujitekuidut

5.3.1 Lasikuitu

Lasikuitu on yksi yleisimmin käytetyistä kuitumateriaaleista komposiiteissa. Lasikuituvaihtoehtoja on monia, sillä sitä voidaan valmistaa eri lasityypeistä. Kaupallisiin tarkoituksiin valmistettavia lasikuitutyyppejä ei kuitenkaan ole kuin muutamia. A-lasi on natriumkalsiumsilikaatti- eli ns. sooda-kalkkilasia. A-lasilla on huono vedenkestävyys, minkä takia sitä ei enää käytetä lujitekuidun valmistukseen. Nykyisin suurin osa valmistetusta lasikuidusta on E-lasia. E-lasilla on hyvät sähköiset sekä mekaaniset ominaisuudet ja hyvä kemiallinen kestävyys. Tämä johtuu siitä, että E-lasi sisältää alkaleja alle 1 p- %.

C-lasia voidaan hyödyntää laittamalla C-lasista valmistettua pintahuopaa happamissa olosuhteissa käytettävän lujitemuovin pinnalle. S-lasi ja R-lasi omaavat paremman vetolujuuden kuin E-lasi. Ne ovat kuitenkin kalliita, minkä takia niiden käyttö on rajoituttu. [13.]

5.3.2 Hiilikuitu

Hiilikuitua voidaan valmistaa useista lähtöaineista monilla eri menetelmillä. Kuidun ominaisuudet ovat riippuvaisia kuidun valmistukseen käytettävästä lähtöaineesta sekä valmistustavasta. Hiilikuitua valmistetaan nykyisin eniten polyakryliinihiilikuidusta eli PAN-kuidusta. Sillä saavutetaan korkea lujuus ja kimmokerroin hiilikuidussa. Aiemmin hiilikuitua valmistettiin eniten viskoosikuiduista, mutta sen ominaisuudet, hiilikuidun saanto viskoosikuidusta, laadun epätasaisuus ja valmistustavan monimutkaisuus ovat tehneet kuidusta vähemmän merkityksellisen hiilikuidun valmistuksessa. Sen kaupallinen tuotanto on päättynyt, mutta avaruus- ja aseteollisuudessa sitä käytetään kuitenkin edelleen rajoitetusti tuotettuna. Hiilikuitujen valmistukseen käytetään luonnonasfalttia ja kivihiilitervaa. Näistä raaka-aineista valmistettuja hiilikuituja nimitetään pikipohjaisiksi. Lujitemuoveissa pikipohjaisia hiilikuituja ei juurikaan käytetä, sillä PAN-pohjaisilla hiilikuiduilla saavutetaan paremmat mekaaniset ja fysikaaliset ominaisuudet taloudellisemmin. [13.]

Hiilikuidut valmistetaan jatkuvana touvina. Touvin filamenttiluku voi vaihdella tuhannesta muutamiin satoihin tuhansiin. Yksi hiilikuitujen lajitteluperuste onkin filamenttiluvun mukaan jaottelu. Enimmillään 24 000 filamenttia sisältävät touvit eli 24K touvit ovat pienifilamenttilukuisia ja tätä suuremmat, käytännössä 48K–320K touvit ovat suurifilamenttilukuisia. [13.]

Toinen yleisesti käytetty jaotteluperuste hiilikuiduille on jaotella ne kimmokertoimen mukaan. Silloin ne jaotellaan SM-, IM-, HM- ja UHM-kuiduiksi. Kimmokerroin vaihtelee SM-kuitujen noin 230 GPa:sta UHM-kuitujen yli 440 GPa:n arvoihin. Standardikuidut eli SM-kuidut ovat eniten valmistettu ja käytetty ryhmä. [13.]

5.3.3 Aramidikuitu

Aramidikuiduilla eli aromaattisilla polyamidikuiduilla on muihin orgaanisiin kuituihin nähden korkeampi kimmokerroin sekä vetomurtolujuus. Tunnetuin aramidikuitu on Du

Pontin valmistama Kevlar. Lujitemuovikäytössä haasteita asettaa kuidun huono tarttumisen matriisimuoviin. Toisin kuin lasi- ja hiilikuitu, aramidikuitu on hygroskooppinen materiaali eli sillä on kyky absorboida itseensä vettä. Aramidikuitujen lujuusominaisuudet heikentyvät valosta, jos niitä ei suojata. Toisaalta ne ovat palamattomia ja niillä on hyvä lämpötilan ja orgaanisten liuotteiden kesto. Ne ovat myös sitkeitä. Aramidikuituja käytetään, kun komposiitilta halutaan yhdistelmä keveyttä sekä korkeaa vetolujuutta ja iskulujuutta. [13.]

5.4 Matriisihartsit

Polymeerikomposiiteissa toisena komposiitin osana on lujitekuitujen lisäksi matriisihartsi, jonka päätehtävänä on pitää kuidut koossa ja välittää materiaalille kohdistuvat rasitukset kuiduille.

Yleisimmin käytettyjä matriisimateriaaleja ovat epoksit, polyesterit ja vinyyliesterit. Näiden lisäksi käytetään jonkin verran fenoliformaldehydejä, polyuretaaneja sekä polyimidejä. Kaikki edellä mainitut ovat synteettisiä orgaanisia polymeerejä. Kovettumis- eli silloittumisreaktiossa ne kovettuvat nestemäisestä hartsista kiinteiksi. Ne luokitellaan kertamuoveiksi, sillä niitä ei voi enää kovettumisen jälkeen muovata lämmön avulla. Kertamuovien itsensä lujuus ja jäykkyys eivät ole tarpeeksi suuria teknisiä sovelluksia varten, tästä syystä niitä lujitetaan kuiduilla sekä täyteaineilla. Kestomuoveihin verrattuna kertamuovit omaavat kuitenkin hyvät mekaaniset ja fysikaaliset ominaisuudet korrosio- sekä lämmönkestävyyden lisäksi. Myös niiden työstäminen on helppoa ja muotitutistuma ei ole suuri. Kertamuovien haasteena on kuitenkin heikohko iskunkestävyys sekä hauras murtumismekanismi. [13]

Kertamuovien silloittaminen eli kovettaminen voi tapahtua kolmella eri menetelmällä: homolyttisellä reaktiolla, molekyylien silloittumisella toisen komponentin avulla ja monifunktionaalisten molekyylien reaktiolla keskenään askelpolymeroinnin kautta. [13]

Kertamuovien kovettumisen mahdollistaa niissä oleva funktionaalinen ryhmä, joka on reaktiivinen. Kertamuovit eivät varsinaisesti ole polymeerejä ennen kovettumisreaktiota, sillä polymeeri muodostuu kovettumisreaktiossa. Sitä ennen kertamuovit ovat alhaisen moolimassan omaavia oligomeerejä. Taulukossa 1 on vertailtu kertamuovien ominaisuuksia. [13]

Taulukko 1. Kertamuovien keskinäinen vertailutaulukko [13]

Kertamuovi	Vetolujuus (MPa)	Lämmönkestävyys (°C)	Palavuus	Kemiallinen kestävyys	Hinta
Polyesteri	50–70	120–180	Helposti palava	Hyvä	Halpa
Vinyyliesteri	50–70	120–180	Helposti palava	Erinomainen	Kallis
Epoksi	50–70	120–180	Helposti palava	Hyvä	Kallis
Fenoli	<50	180–300	Huonosti palava	Hyvä	Halpa
Polyuretaani	>70	<120	Helposti palava	Erinomainen	Halpa
Bismaleimidi	>70	180–300	Huonosti palava	Hyvä	Hyvin kallis
Polyimidi	>70	180–300	Huonosti palava	Hyvä	Hyvin kallis

5.5 Täyteaineet

Lujitemuovituotteissa matriisimuoviin voidaan sekoittaa kiinteitä partikkeleita, joita kutsutaan täyteaineeksi. Täyteaine voi olla jauhattua lasia tai metallia, hienojakoisia mineraaleja tai onttoja ja umpinaisia palloja, joita voidaan valmistaa eri materiaaleista. Täyteaineiden käytöllä halutaan yleensä vaikuttaa raaka-ainekustannuksiin alenevasti, nopeuttaa valmistusprosessia, keventää tuotetta tai parantaa sähkön- ja lämmönjohtavuutta. [13.]

5.6 UV-kesto

Useimmat polymeerikomposiitit heikentyvät ominaisuuksiltaan altistettuna ultraviolettisäteilylle pidemmän aikaa. Tämä tarkoittaa sitä, että ulkona olevat, auringonvalolle altistuvat polymeerikomposiitit voivat heikentyä, ellei niitä suojata säteilyltä. Heikentyminen havaitaan komposiitin mekaanisten ominaisuuksien muuttumisena. UV-suojaus voidaan suorittaa asentamalla komposiitin uloimmaksi kerrokseksi UV-säteilyltä suojaavaa materiaalia, esimerkiksi lasikuituvahvistettua UV-säteilylle reagoimatonta polyuretaanihartsinauhaa. Toinen tapa UV-suojauksen suorittamiseen on maalata komposiittikorjaus UV-kestomaalilla. UV-suojaukselta komposiittikorjaukselle harkitaan aina tapauskohtaisesti muun muassa korjauksen kestoajan ja korjauskohteen sijainnin mukaan. [11; 13.]

5.7 Lämmönkesto

Polymeerikomposiittien lämmönkesto on rajallinen, tässä työssä tutkittaville materiaaleille ilmoitettu korkein käyttölämpötila on 149 °C. Polymeerikomposiiteilla on olemassa lasittumislämpötila T_g , jonka ylitettyään komposiitissa olevan hartsimateriaalin koostumus muuttuu lasimaisesta kumimaiseksi. Valittaessa komposiittia korjauskohteeseen on pidettävä huoli siitä, että komposiitin lämpötila ei nouse missään vaiheessa lasittumislämpötilaan. Komposiiteille ilmoitettu korkein käyttölämpötila on ilmoitettu riittävällä varmuudella materiaalin lasittumislämpötilaan nähden. Täten noudatettaessa ylintä käyttölämpötilaa lasittumiselta vältytään. Yleisesti ottaen polymeerikomposiittien lujuusominaisuudet heikentyvät lämpötilan noustessa. Tähän työhön testattavaksi valitut komposiitit on valmistajan mukaan suunniteltu ja valmistettu siten, että niiden lujuus säilyisi mahdollisimman hyvänä lämpötilan noustessa. Tässä työssä tehtävässä materiaalitestissä verrataan huoneenlämpötilassa olevan sekä korkeammassa lämpötilassa olevan komposiitin vetolujuuksia keskenään.

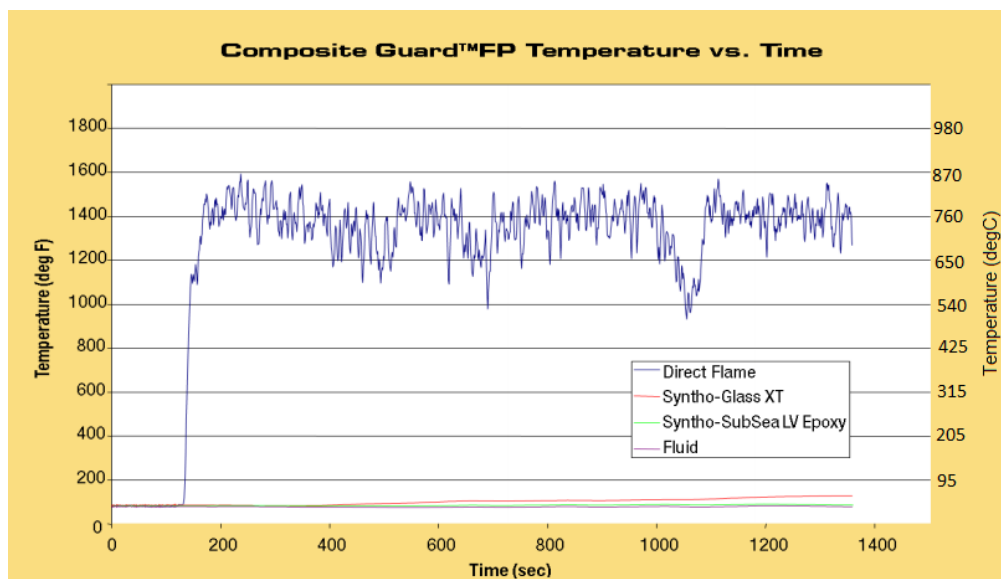
Asennuslämpötila on myös syytä ottaa huomioon komposiittikorjauksia suunniteltaessa. Esimerkiksi Thermo Wrap -komposiitin maksimikäyttölämpötila on 149 °C, mutta maksimiasennuslämpötila ei ole yhtä korkea, vaan se on 93 °C. Tämän lisäksi komposiittimateriaaleille on ilmoitettu minimiasennuslämpötila, joka Thermo Wrapille on 5 °C. [15.]

Polymeerikomposiiteille ilmoitetaan myös HDT-arvo, Heat Deflection Temperature, joka ilmaisee missä lämpötilassa kolmipistetäivutuksessa päistään tuettu komposiittikoesauva on taipunut 0,25 mm kuormitettuna tietyllä voimalla keskeltä sauvaa. HDT-arvo antaa tietoa siitä, miten komposiitti säilyttää taivutuslujuutensa lämpötilan noustessa 2 °C/min taivutuksen alaisena. Esimerkiksi Thermo Wrap -komposiitille ilmoitettu HDT-arvo on 268 °C. [15.]

Esimerkkitilanteessa komposiittikorjatun kohteen ympäristössä syttyy tulipalo. Liekit ovat suorassa kosketuksessa komposiittiin ja korjauskohta ei kestä suurta lämpörasitusta, vaan alkaa vuotamaan. Korjattu linja voi sisältää syttyvää fluidia, joka vuotaessaan antaa lisäpuhtia tulipalolle ja palo leviää. Tämä kuvailtu tilanne on mahdollinen jalostamoympäristössä. Suorassa liekkikosketuksessa on selvää, ettei suojaamaton polymeerikomposiitti kestä kauan, vaan lasittumislämpötilaa korkeammassa lämpötilassa matriisihartsit menettää mekaaniset ominaisuutensa.

Tulipaloriskin ollessa mahdollinen on komposiittikorjaus aina suojattava palosuojaeristeellä. NRI valmistaa komposiittikorjauksiin erityisesti suunniteltua palosuojaeristettä, Composite Guard FP:tä. Kerroksia tulee kaksi 10 mm kerrosta eli eristeestä tulee yhteensä noin 20 mm paksuinen. Palosuojaeristeen päälle kääritään yleensä vielä Syntho Glass UV -suojateippiä. [11.]

Composite Guard FP:n lämmönkestoa on testattu kolmannen osapuolen tarkastuslaitoksen toimesta. Kokeessa Composite Guard FP -eriste asennettiin Syntho Glass XT -komposiittikorjauksen päälle ja tämän jälkeen korjauskohta altistettiin suoralle, ulko- puoliselle liekille yhden tunnin ajaksi. Kokeessa liekin lämpötila pysyi keskimäärin lämpötilassa 743 °C kokeen ajan ja hetkittäinen liekin maksimilämpötila kokeen aikana nousi 869 °C:seen, kun taas komposiittikorjauksen lämpötila pysyi jatkuvasti alle 60 °C:n lämpötilassa, joka on selvästi alle kokeessa käytetyn Syntho Glass XT -komposiitin maksimilämpötilan. Korjatun putken sisällä kulkevan nesteen lämpötila ei missään vaiheessa koetta noussut yli 29 °C:n. Kokeen lopputuloksena todettiin, että Composite Guard FP kestää vähintään kaksi tuntia kokeen mukaiselle suoralle liekille altistettuna. Liekkikokeen jälkeen komposiittikorjaukselle tehtiin vielä painekoe, jossa selvisi, että komposiitin mekaaniset ominaisuudet eivät olleet heikentyneet liekkikokeen seurauksena. Kuvassa 2 nähdään NRI:n materiaaliesitteessä oleva kuva, jossa on liekkikokeen tuloksia Composite Guard FP:n, komposiittimateriaalien, liekin ja putkessa kulkevan nesteen lämpötiloista ajan funktiona. Alkuperäiseen kuvaan on lisätty Celsius-asteikko Fahrenheit-asteikon lisäksi kuvan luettavuuden parantamiseksi. [16.]



Kuva 2. Composite Guard FP:n lämpötila ajan funktiona [20]

Composite Guard FP:n maksimikäyttölämpötilaksi on ilmoitettu 1 093 °C. Sen tulenkestoa on testattu materiaalituottajan toimesta standardien ASTM E 84 Surface Burning Characteristics, ASTM E 1354 Clone Calorimetry ja ISO 1182:1190 Non-Combustibility mukaisesti. Tuloksina on ASTM E 84 standardista saatu tulen leviämisindeksi 0 ja savunmuodostusindeksi 0. ISO 1182:1190 syttymättömyys-standarditestin tuloksena on ilmoitettu, että suoja täyttää standardille asetetut kriteerit. [16.]

5.8 Puolivalmistekomposiitit

Puolivalmistekomposiitit jaetaan kolmeen ryhmään: puristemassoihin, joita ovat SMC ja BMC, prepregeihin ja yhdistelmätuotteisiin.

SMC eli Sheet Molding Compound on lujitettu kertamuovimassa, joka on levymäinen. Siinä voi olla mukana täyteaineita ja massa kovetetaan lopputuotteeksi kuumapuristamalla. [13.]

BMC eli Bulk Molding Compound tunnetaan myös nimellä DMC eli Dough Molding Compound. Se on nimensä mukaisesti taikinamaista, lujitettua kertamuovimassaa, joka sisältää usein täyteainetta. Taikinamainen massa kovetetaan muovauksessa lämmön avulla. [13.]

Prepreg on puolivalmistekomposiitti. Siinä lujite on esikyllästetty hartsilla, joka kovetetaan useimmiten lämmöllä. Kovettuminen voidaan saada aikaan myös kovettimella, joka käynnistää hartsissa kemiallisen silloittumisreaktion. Prepregissä hartsi on osittain kovettuneessa B-tilassa, joka sitten kovetetaan lopullisesti lopputuotteen valmistuksen aikana. Usein hartsimateriaalina prepregeissä käytetään epoksia, fenolia, polyesteriä tai polyuretaania. NRI käyttää prepreg-tuotteissaan polyuretaanihartsia matriisimuovina. Prepregit säilyvät käyttökelpoisina jopa puoli vuotta, mikäli ne varastoidaan -18 °C:n lämpötilassa. Varastointilämpötilan noustessa lyhenee niiden käyttöikä ja huoneenlämmössä säilytettynä ne kestävät vain muutamia päiviä. [3; 13.]

Yhdistelmätuotteisiin luetaan myös puolivalmisteet. Puolivalmisteessa matriisimuovi ja lujite toimitetaan erillään ja ne yhdistetään vasta käyttökohteessa lopputuotetta valmistettaessa. Esimerkiksi tässä työssä tutkittava Thermo Wrap -komposiitti on yhdistelmä-

tuote, joka koostuu erillään olevista lujitekuitumateriaalista, hartsimateriaalista ja koveteesta. [13.]

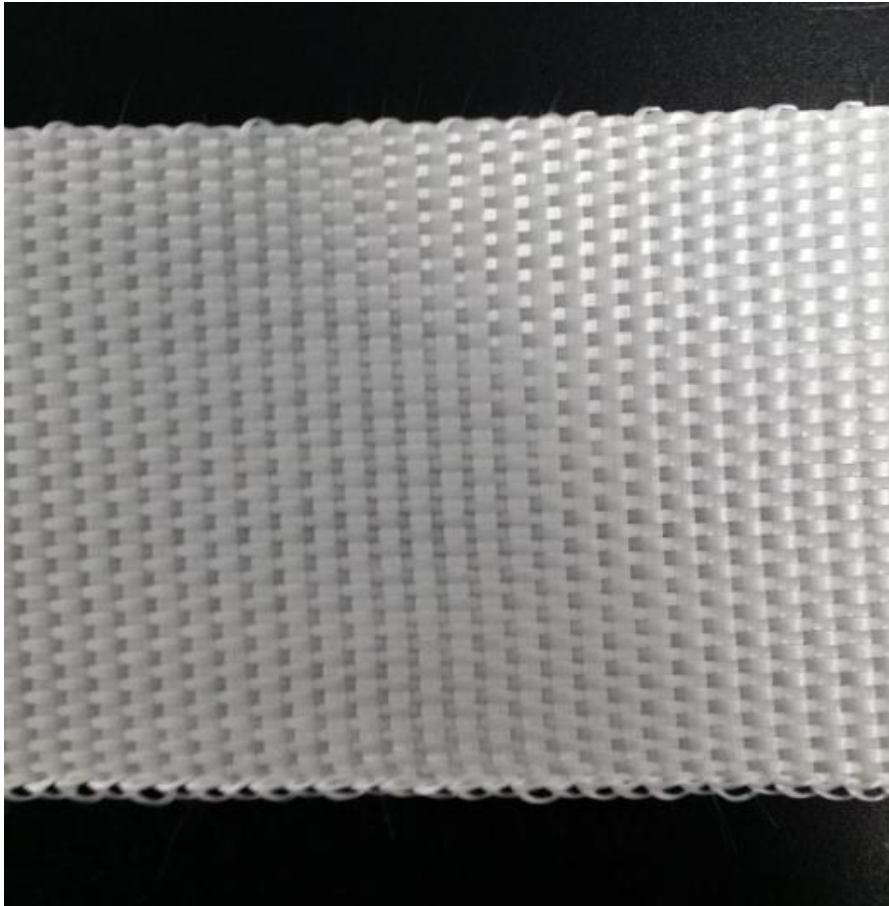
5.9 Sovellukset

Polymeerikomposiittituotteita käytetään paljon lentokone- ja avaruusteollisuuden rakennemateriaaleina, sekä autoteollisuuden materiaaleina. Kevlar-kuitulujitettuja komposiitteja käytetään muun muassa luotiliivien ja kypärien materiaalina. Näissä sovelluksissa polymeerikomposiittien keveys ja lujuus ovat erinomaisen hyvä yhdistelmä. [13.]

6 Komposiittikorjausmenetelmä

6.1 Korjausmenetelmä suoralle putkelle

NRI:n tuottamat komposiittimateriaalit ovat epoksi- tai polyuretaanihartsin kyllästettyjä lasi- tai hiilikuitumattoja, joissa jatkuvat lujitekuidut on kudottu 0 ja 90 asteen suunnissa ristikkäin (kuva 3). NRI:n polyuretaanihartsien kovetus tapahtuu aktivoimalla hartsi veden avulla, epoksit taas kovettuvat niiden mukana toimitettavan kovetinaineen avulla. Polyuretaanihartsipohjaiset eroavat epoksipohjaisista tuotteista myös siinä, että polyuretaanihartsituotteet ovat esikyllästettyjä hartsiin eli ne ovat prepregejä, epoksihartsipohjaiset lujitetuotteet taas kyllästetään hartsiin vasta paikan päällä. Korjausalueella pinnassa olevat kuopat voidaan täyttää erityisellä hartsitäyteaineella, jolloin korjausalueelle saadaan aikaan tasainen pinta hyvän korjauksen onnistumiseksi. [3.]



Kuva 3. Thermo Wrap -lasikuitumatto, jossa kuidut ovat ristikkäin

Tämän luvun komposiittikorjausmenetelmän selostus pohjautuu Porvoon jalostamolle tehtyyn komposiittikorjaukseen, joka toteutettiin tämän insinööriyön aikana. Havainnollistamiseen käytetyt kuvat 4, 5, 6, 7 ja 8 on otettu kyseisestä asennustyöstä. Kyseessä oleva komposiittikorjaus tehtiin säiliöalueella sijaitsevaan kaasuyhdyslinjaan. Hiiliteräksisen 16” P8213-A1C kaasuyhdyslinjan käyttöpainne oli 2,5 bar ja käyttölämpötilana ympäristön lämpötila. ASME PCC-2 -standardin mukaisten laskujen pohjana olivat putkiston suunnittelupaine, 17 bar, ja suunnittelulämpötila, 110 °C. Putkistossa kulkeva tuote oli HC-kaasua. Putkistossa oli havaittu sisäistä korroosiota, joka oli aiheuttanut seinämän ohentumaa. Putkistoa vahvistettiin 2 600 mm matkalta epoksihartsisella lasikuitukomposiitilla, Thermo Wrap Inspectablella. ASME PCC-2 -standardin mukaiset laskut kyseiselle kohteelle edellyttivät käytettäväksi kahdeksaa kerrosta komposiittia.

Komposiittikorjausprosessi lähtee liikkeelle siitä, että korjauksen tilaava yritys antaa korjausta suorittavalle yritykselle riittävät tiedot kohteesta. Tämä on helppoa tehdä täyttämällä liitteen 3 mukainen arviointilomake, josta tarvittavat kysymykset laskelmien suorittamiseksi löytyvät.

Esimerkiksi putken materiaali, muoto, mitat, alkuperäinen seinämäpaksuus, putkessa kulkeva aine, aineen pitoisuus, työpaine, käyttölämpötila ja se, onko korjattava osuus vuotava vai ei, ovat tietoja, jotka korjausta tekeväälle yritykselle on annettava laskelmien suorittamiseksi.

Tilaaajan tulee myös määrittää se kestoikä, joka korjauksen tulee kestää. Jos tilaaja ilmoittaa toivotuksi komposiittikorjauksen kestoiksi esimerkiksi viisi vuotta, tällöin korjaus lasketaan juuri viiden vuoden kestoikälle. Tästä seuraa, että korjauskohdan kesto ei voida enää taata sen jälkeen, kun viisi vuotta korjauksen suorittamisesta on kulunut. Korjauslaskelmaa tilattaessa on tiedettävä se aika, jonka korjaus enimmillään tulee kohteessa olemaan ja jonka aikaa sen myös on kestävä, kun korjaus tehdään laskelmien mukaisesti. [11.]

Tarvittavat laskut korjausta varten suoritetaan materiaalityöntekijän toimesta ASME PCC-2-2011 -standardin "Repair of Pressure Equipment and Piping" kohdan "Nonmetallic Composite Repair Systems" mukaan esitettyjen laskukaavojen mukaisesti. Standardi antaa laskujen lisäksi myös yleisiä ohjeita komposiittikorjauksen suorittamiseksi. [11.]

Korjausalueen rajat tulee merkitä putkeen erillisellä merkintäteipillä. Rajaus tehdään siten, että korjausalueen pituutta laajennetaan yhden tuuman verran laskuissa määriteltyyn pituuteen nähden korjausalueen kummassakin päädyssä. Korjausalueen pinta on tämän jälkeen käsiteltävä vastaamaan komposiittiasennukselle riittävää pinnanlaatua. Rajatulta alueelta poistetaan putken pinnasta kaikki ruoste, maali ja muut mahdolliset päällysteet siten, että metallipinta on näkyvässä. Tämän jälkeen pinnasta puhdistetaan lika, rasva ja öljy standardin SSPC-SP1 "Solvent Cleaning" mukaisesti. Puhdistamisen jälkeen on vuorossa pinnankorjennus. [12.]

Suosittelavana ja yleisimmin käytettynä pinnankäsittelyvaihtoehtona on Ex-hyväksytyn, paineilmatoimisen pyörivän teräsharjan tai -laikan käyttö, joilla saavutetaan komposiittikorjaukselle suositeltava Sa 2.5 tai SSPC-SP-10 -pinnanlaatu (kuva 4). Näitä pinnankäsittelyvaihtoehtoja on esitelty tarkemmin kappaleessa 12.1.3. Korjausalueen ollessa pieni voidaan pintakäsittely suorittaa käsin esimerkiksi hiomapaperilla. Hiekkapuhallusta on mahdollista käyttää joissain kohteissa, mutta se voi olla haasteellista monessa paikassa, kun hiekan ei haluta leviävän ympäristöön. Myös itse hiekkapuhalluslaitteiston saaminen kohteeseen on usein haasteena, joten yleensä muita pinnankäsittelymenetelmiä suositaan. [11.]

Pinta käsitellään vastaamaan suositeltua pinnanlaatua vertaamalla pintaa Swedish Standard -, NACE- tai SSPC-standardien suositeltuihin puhtausasteisiin ja profilliin. Karhennus suoritetaan myös standardien mukaisesti sopivan pinnankarheuden aikaansaamiseksi. Karhennuksella parannetaan hartsin kiinnittyvyyttä korjauspintaan. Suositeltava korjattavan teräsputken pinnankarheusarvo komposiittikorjaukselle on 2–4 mil eli Ra 7–14. [12.]



Kuva 4. SSPC-SP-10 -pinnanlaatu hiiliteräsputkessa

Pinnankarhennuksen jälkeen korjausalue tulee jälleen puhdistaa liasta, rasvasta ja muista adheesiota häiritsevistä aineista standardin SSPC-SP1 "Solvent Cleaning" mukaisesti. Hartsin ja korjattavan pinnan tulee olla suorassa kosketuksessa toisiinsa, eli vieraita aineita pinnalla ei sallita.

Jos korjattavalla alueella on pinnassa kuoppia, täytyy pinnan tasoittamiseksi käyttää täytehartsia. Täyteaineen kovettumisen jälkeen sen pinta hiotaan tasaiseksi.

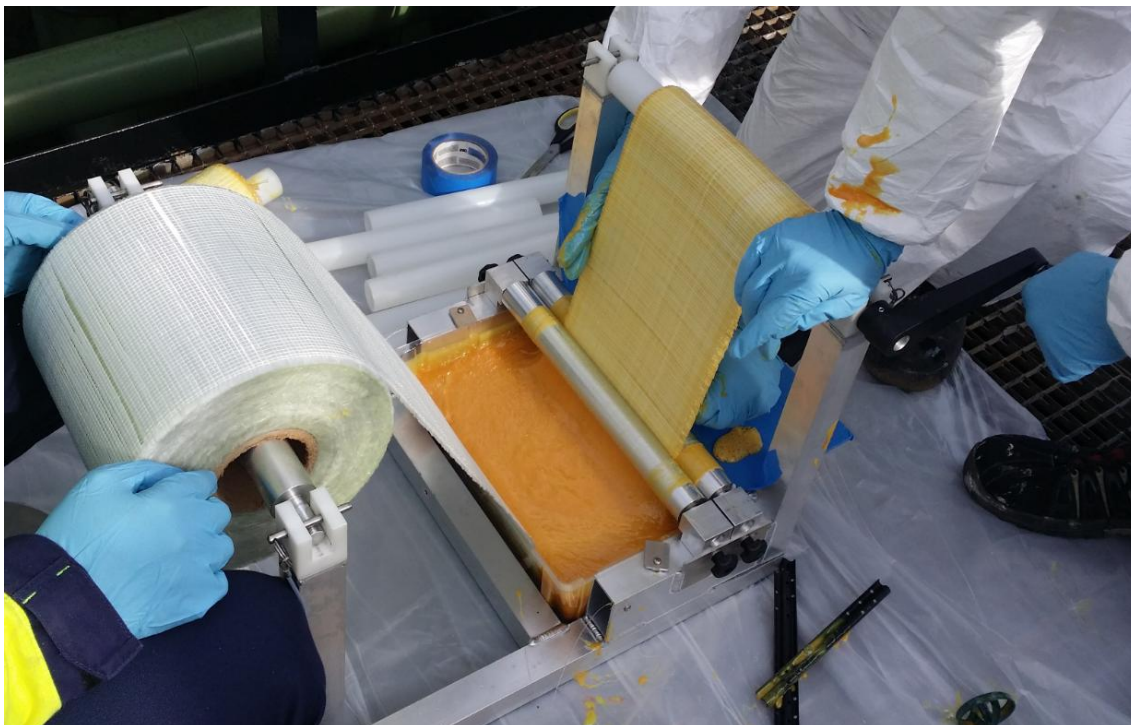
Kun korjattava alue on tasainen ja esivalmisteltu, korjaus jatkuu valmistamalla hartsiseos hartsista ja kovetteesta. Tässä komposiittikorjausmenetelmän selostuksessa kerrotaan epoksihartsipohjaisen komposiitin korjausprosessi. Epoksihartsiseos valmistetaan työmaalla kahdesta osasta, hartsista ja kovetteesta. Hartsia ja kovete sekoitetaan keskenään niin, että seos on tasalaatuista. Sekä hartsin että kovetteen purkkeihin on mitattu valmiiksi sopiva määrä hartsia ja kovetetta niin, että käytettäessä kumpikin purkki kerralla kokonaan tulee hartsin ja kovetteen seossuhteesta oikea. [11.]

Hartsiseoksen valmistamisen jälkeen työ jatkuu levittämällä korjattavalle alueelle primeria eli pohjustusainetta kuvan 5 mukaisesti. Käytettäessä epoksihartsikomposiittia primerina toimii itse epoksihartsia, polyuretaanikomposiiteille käytetään erillistä primeria, sillä ne ovat prepregejä, jolloin hartsia on jo valmiiksi imeytetty kuitumattoon.



Kuva 5. Epoksihartsikerroksen levittäminen putken pinnalle

Kun pohjahartsikerros on levitetty kauttaaltaan korjausalueelle, voidaan komposiitin käärimisprosessi aloittaa. Kuitunauha kyllästetään hartsiin joko käsin tai kuvan 6 kyllästämislaitteiston avulla, mikäli kyseessä on laajempi korjaustyö. Seuraavaksi korjattavan putken pintaan aletaan kääriä hartsiin kyllästettyä kuitunauhaa kyllästetystä rullasta.



Kuva 6. Kuitunauhan kyllästäminen hartsiin erityisellä kyllästämislaitteella

Komposiitin kääriminen putkeen aloitetaan toisesta korjausalueen päästä ennalta merkattusta kohdasta. Ensimmäinen kierros korjausalueen aloituspäädystä tehdään 100 %:n päällekkäisyydellä. Nauhaa kääritään putken ympärille siten, että nauha tulee rullan alaosasta sopivan paineen aikaansaamiseksi. Ensimmäisen, 100 %:n päällekkäisyydellä tehdyn kiepin jälkeen lähdetään etenemään putken pituussuunnassa 50 %:n päällekkäisyydellä edelliseen kierrokseen nähden kohti korjausalueen toista päätä. Kun on päästy korjausalueen toiseen pätyyn, tehdään yksi kokonainen 100 %:n päällekkäisyydellä oleva kerros. Tämän jälkeen edetään takaisin kohti päätä, josta korjaus aloitettiin käyttäen 50 %:n päällekkäisyyttä. Kun edellinen nauha loppuu, aloitetaan uusi nauha siten, että uuden nauhan alku on 6" edellisen nauhan päällä. Käytettäessä 50 %:n päällekkäisyyttä, jokainen korjausalueen päädystä pätyyn tehty etenemä vastaa kahta kerrosta komposiittia. Jos laskelmissa on komposiittikorjaukselle edellytetty kymmenen kerrosta komposiittia, tällöin edetään korjausalueen päädystä pätyyn yhteensä viisi kertaa. Kuvassa 7 nähdään 50 %:n päällekkäisyydellä kääritty komposiittinauha putken ympärillä.



Kuva 7. Komposiittikuitunauhaa käärittynä putken ympäri 50 %:n päällekkäisyydellä

Kun laskelmissa osoitettu kerrosmäärä on saavutettu, poistetaan merkkausteipit korjausalueen reunoista ja komposiittikerroksen päälle kääritään vielä puristuskalvonauhaa kuvan 8 mukaisesti. Nauhaa kääritään yhteensä neljä kerrosta eli kaksi kertaa korjausalueen päästä päähän 50 %:n päällekkäisyydellä. Se antaa tarvittavan puristuksen komposiitin kovettumisajaksi tiivistäen komposiittia. Korjausmateriaalin sisältäessä polyuretaanihartsia puristuskalvonauha painellaan reiätysrullan avulla komposiittiin, jolloin kovettumisreaktiossa syntyvät kaasut pääsevät ulos puristuskalvon alta reikien kautta. Mikäli käytetään epoksihartsista tuotetta, kuten tämän selostuksen pohjana käytetyn kaasuyhdyslinjan tapauksessa, ei puristuskalvoa tule reiittää. Puristuskalvo poistetaan pinnasta komposiitin kovettumisen jälkeen. [12; 17.]



Kuva 8. Puristuskalvonauha käärittynä komposiittikorjauksen ympärille kovettumisen ajaksi

Mikäli käytetään epoksihartsista komposiittimateriaalia, jonka asennusta vesi erityisesti häiritsee, on korjauskohteen suojaamiseksi sateelta pystytettävä työmaatelttä. Polyuretaanihartsisen komposiittimateriaalin asentaminen ei häiriinny vedestä, mutta asennusolosuhteiden kannalta työmaatelttä sadesuojana on suositeltavaa. Asentamisen aikana mahdollisesti tapahtuvan virheen riski pienenee, kun ympäristön olosuhteet asennuksen aikana eivät häiritse asennustapahtumaa. [11.]

Jokaiselle komposiittimateriaalille on ilmoitettu niille suotuisat asennusolosuhteet, jotka löytyvät liitteen 2 tiedoista. On myös suositeltavaa, että putken pinnan lämpötila on riittäväällä varmuudella kastepistelämpötilaa korkeampi. Esimerkiksi Thermo Wrapille suositellaan, että putken pinnan lämpötila on 15 °C kastepistettä korkeampi korjauksen onnistumiseksi. Jos näin ei ole, ilman suhteellinen kosteus saattaa kondensoitua putken pintaan, mikä häiritsee hyvän liitoksen muodostumista teräksen ja komposiitin välille erityisesti käytettäessä epoksihartsisia komposiittimateriaaleja, kuten Thermo Wrapia. [15.]

Mikäli käytetään polyuretaanihartsista komposiittia, on kovettumisreaktion aikaansaamiseksi suihkutettava vettä prepreg-nauhaan koko käärimisprosessin ajan, sillä NRI:n

polyuretaanihartsin silloittumisreaktio käynnistyy juuri veden avulla. Tämä on syytä muistaa erona epoksihartsin käyttöön nähden. [18.]

Polyuretaanihartsilla esikyllästetyt prepreg-kuitumatot on pakattu rullalle ilmatiiviisiin pakkauksiin, ja kerran avattu pakkaus on käytettävä samalla kertaa kokonaan. [17; 18.]

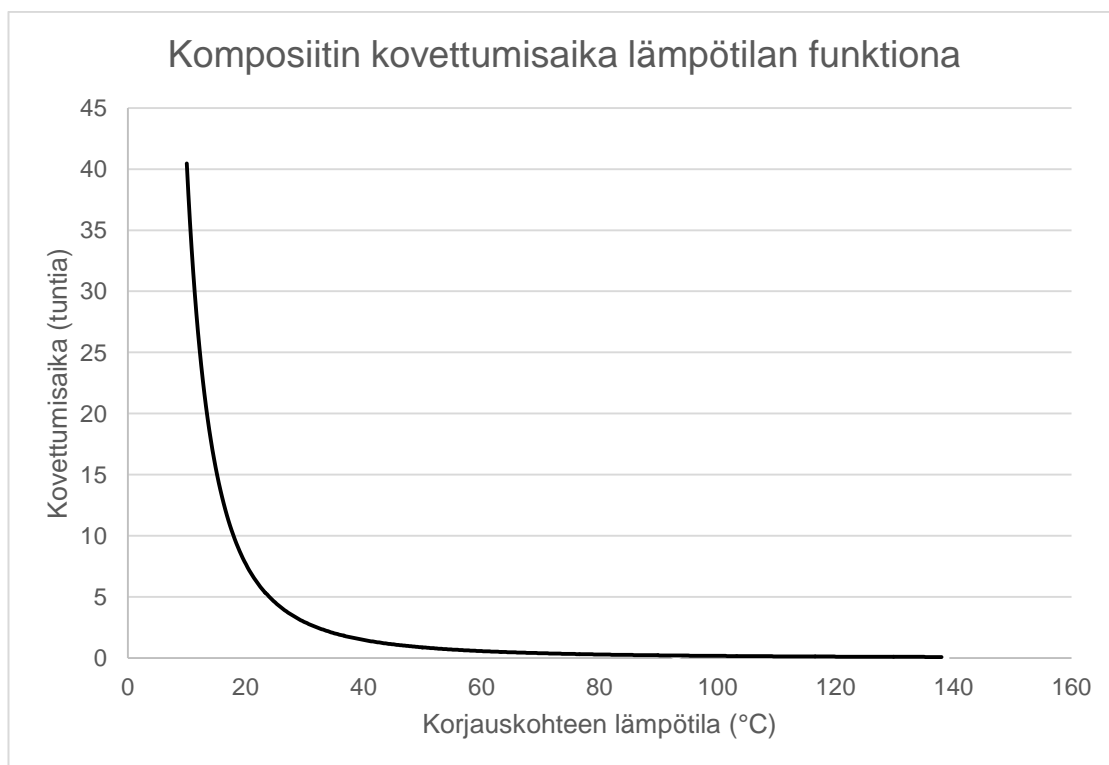
Komposiitin laaduntarkastus tehdään kovettumisen varmistamiseksi mittaamalla koivuus komposiitin pinnasta durometrin avulla. Kovettumisaika on riippuvainen komposiitin lämpötilasta siten, että lämpötilan korottaminen nopeuttaa kovettumisaikaa ja vastaavasti lämpötilan laskeminen hidastaa kovettumisprosessia, kuten taulukosta 2 nähdään. [11; 19.]

Lämpötilan kasvaessa nopeutuu myös epoksihartsin kovettumisprosessi, jonka kovettumisen riippuvuus lämpötilasta on esitetty kuvassa 9. Thermo Wrap -komposiittimateriaalia käytettäessä asennuslämpötilan täytyy olla vähintään +5 °C, joten tätä kylmemmässä ympäristössä vaaditaan erillisen lämmityksen aikaansaamista korjausalueelle. Tämä minimiasennuslämpötila tarkoittaa korjattavan kohteen pinnan lämpötilaa. Lämmitys voidaan toteuttaa korjauskohteen ympärille pystytettävällä työmaateltalla, jonka rajaamaa tilaa lämmitetään lämminilmapuhaltimilla tai putken pintaa voidaan lämmittää erityisillä lämmitysmatoilla, jotka kääritään putken ympärille. [11; 15.]

Taulukko 2. Thermo Wrap Inspectablen työskentely- ja kovettumisaika eri lämpötiloissa [19]

Lämpötila (°C)	Työskentelyaika (min)	Kovettumisaika (min)	Kovettumisaika (h)
10	225	1 440	24
16	150	720	12
24	75	360	6
32	35	180	3
66	10	60	1
93	5	30	0,5
138	0,5	1	0,02

Taulukon 2 arvoista koostetusta kuvaajasta (kuva 9) nähdään Thermo Wrap Inspectable -komposiitin kovettumisajan riippuvuus korjauskohteen lämpötilasta.



Kuva 9. Komposiitin kovettumisaika tunteina lämpötilan funktiona taulukon 2 arvojen mukaan

Komposiittikorjauksen kovettumista ei tule kuitenkaan todentaa vain lukemalla kovettumisaikataulukkoa, vaan tämän lisäksi kovettuminen tulee aina todeta mittaamalla kovuus komposiitin pinnasta durometrin avulla ja vertaamalla saatua tulosta kullekin komposiittimateriaalille ilmoitettuun minimikovuusarvoon. Vasta tämän jälkeen voidaan todeta komposiitin kovettumisen olevan riittävä. Esimerkiksi Thermo Wrap Inspectablelle määritelty minimikovuus kovettumisen jälkeen on Shore D -arvona 74. [11; 19.]

On hyvä huomioida, että komposiitin väri saattaa korkeamman lämpötilan asennuskoh-teissa muuttua tummemmaksi kuin se asennuksen aloitusvaiheessa on. Tämä ei vaiku-ta komposiitin mekaanisiin ominaisuuksiin. Väri voi vaihdella keltaisesta tumman rus-keaan. [12.]

Komposiittikorjauksen viimeiseksi kerrokseksi voidaan laittaa erilaisia ympäristön vai-kuuksilta suojaavia kerroksia, kuten UV-säteilyltä suojaava kerros tai tulipalolta suo-jaava eristys.

Mikäli korjattava kohta on vuotava, vuoto on pysäytettävä asentamalla vuotokohtaan vuodonestopanta. Komposiittikorjauksiin on tarjolla erityisesti komposiittikorjauksia var-

ten suunniteltu kuvan 10 mukainen matalaprofiilinen Composite Clamp -vuodonestopanta. Hiiliteräksestä valmistetun pannan leveys on 3,5” ja se on mahdollista asentaa aina 2” kokoisista putkista 24” kokoiisiin putkiin linkittämällä pantoja toisiinsa. Alle 2” kokoisissa putkissa vuodonestoon voidaan käyttää muita vuodonestopantoja. Pannan alle vuotokohdan päälle asennetaan erityinen kuminen paikka, joka helpottaa vuodon tukkimista. Vuodon loputtua komposiittipuristin tai vuodonestopanta kääritään komposiitin alle korjauksen loppuunsaattamiseksi. [3; 11; 20.]



Kuva 10. Matalaprofiilinen Composite Clamp -vuodonestopanta [20]

6.2 Korjausmenetelmä putkikäyrälle

Putkikäyrän komposiittikorjaus aloitetaan samalla tavoin kuin suorassa osuudessakin. Korjausalueen päätykohdat merkitään teipillä laskelmien mukaisesti. Nauhaa aletaan kääriä korjauskohdan toisesta päädyistä tekemällä yksi kiepautus 100 %:n päällekkäisyydellä, tämän jälkeen edetään kohti toista päätyä 50 %:n päällekkäisyydellä edellisten kierrosten päälle. Putkikäyrässä tämä tarkoittaa, että 50 %:n päällekkäisyys on käyrän ulkomutkassa ja sisämutkassa on tällöin 75–80 %:n päällekkäisyys. [12.]

Kuitunauhaa käärittäessä on pidettävä yllä riittävä jännitys nauhassa, jotta putken pinnan ja nauhan väliin ei jäisi ylimääräistä ilmaa ja ettei nauha rypistyisi. Nauhaa ei kuitenkaan tule vetää liian suurella voimalla, jottei se lipeä putken pinnalta. Asennuksessa toisen asentajan on hyvä painella käärittyä nauhaa putken pintaa vasten ja poistaa kaikki ylimääräinen ilma kerrosten alta samalla, kun toinen henkilö käärii nauhaa putken ympärille. Kuten suorassa putkiosuudessakin, tulee korjausalueen päädyissä tehdä 100 % päällekkäisyydellä olevat kiepautukset kuitunauhalla putken ympäri. Tämän jälkeen voidaan suunta kääntää ja jatkaa kohti korjauksen toista päätyä. Suuntaa ei saa kääntää kesken korjausaluetta, vaan vasta siinä vaiheessa, kun on päästy korjausalueen toiseen pätyyn. [12.]

Jokainen 50 %:n päällekkäisyydellä toteutettu korjausalueen kääriminen päädyistä päätyyn tuottaa kaksi kerrosta korjauspaksuutta. Jos siis korjauspaksuudeksi on laskelmassa ilmoitettu 10 kerrosta, saadaan tämä kerrospaksuus aikaan tekemällä 5 päädyistä päätyyn käärimistä 50 %:n päällekkäisyydellä korjausalueen yli. Korjauskohdan merkintään käytetyt teipinpalat poistetaan, kun tarvittava määrä kerroksia on kääritty komposiitin ympärille. Jotta komposiittikorjaus onnistuu hyvin, tulee komposiittikerroksen päälle asentaa vielä puristuskalvonauhaa. Kun komposiitti on kovettunut, puristusnauha voidaan poistaa. Kovettumisprosessi on valmis, kun komposiitin kovuusarvoksi saadaan valmistajan ilmoittama sopiva kovuusarvo durometrillä mitattuna. [12.]

6.3 Korjausmenetelmä T-haaraliitokselle

T-haaran korjauksessa korjausalue merkitään teipillä jokaiseen kolmeen haaraan laskelmien mukaisesti. Hartsiin kyllästetyt kuitunauhat leikataan sellaisiin suikalepituuksiin, että sitä saadaan käärittyä haarakohtaan 4–6” päällekkäisyydellä. Kuitusuikaleiden lukumäärä määräytyy haaran halkaisijan ja kuitunauhan leveyden mukaan. Suikaleita kääritään aluksi T-haarakohtaan asettamalla kaksi ensimmäistä suikaletta haaran vasempaan ja oikeaan reunaan siten, että 20 %:n nauhan leveydestä on kohtisuorassa lähtevän haaran päällä. Suikaleet painellaan putken pintaa vasten mahdollisen ilman ja ryppyjen poistamiseksi. Loput suikaleet kääritään putken haaraan 50 %:n päällekkäisyydellä edellisten suikaleiden päälle. Tämän jälkeen nauhaa aletaan kääriä rullasta valitun haaran korjausalueen päädyistä kohti T-haaraa.

T-haarakorjauksessa ei saa käyttää liikaa jännitystä nauhassa, sillä liika jännitys nauhassa voi saada aikaan rypistymistä. Haarakohdassa jännitystä ei saa olla lainkaan, muuten nauha rypistyy. Mentäessä haarakohdan yli on molemmille puolille tehtävä ainakin yksi täysi kierros nauhalla. Kuten suoran ja käyrän putken korjauksessakin, myös T-haarassa jokainen 50 %:n päällekkäisyydellä toteutettu etenemä korjausalueen päädyistä päätyyn tuottaa kaksi kerrosta komposiittia. Kun komposiittikorjaus on saatu tehtyä laskelmissa määrätyn kerroslukumäärän mukaisesti, on komposiitin päälle käärittävä vielä puristuskalvoa kovettumisprosessin ajaksi. Komposiitin kovettumisen jälkeen puristuskalvo voidaan poistaa, kun komposiitin kovettuminen on todettu durometriä käyttäen. [12.]

6.4 Korjausmenetelmä säiliölle

Säiliön korjaus komposiitilla aloitetaan aina säiliön päädyistä käärimällä pääty komposiittiin ja etenemällä sen jälkeen päädyistä pois päin kiertäen komposiittia ympärysmittan suuntaisesti. Pinnan esikäsitteilyn jälkeen leikataan sopivan mittaisia suikaleita kuiturullasta säiliön päätyä varten. Kuitusuikaleet kyllästetään hartsiin ja levitetään säiliön päätyyn. Tämän jälkeen hartsiin kyllästettyjä kuitusuikaleita kääritään säiliön ympärille laskelmissa ilmoitettu määrä. Kovettumisen ajaksi laitetaan vielä kalvo komposiitin päälle. Samaa menetelmää käytetään myös sokean putkenpään komposiittikorjaukselle. [21.]

7 Laskentakaavat komposiittikorjaukselle

Komposiittimateriaalilla putkia korjattaessa käytetään laskentaan ASME PCC-2 -standardia "Repair of Pressure Equipment and Piping". Standardin luvuissa 4.1 "Non-metallic Composite Repair Systems: High-Risk Applications" ja 4.2 "Nonmetallic Composite Repair Systems: Low-Risk Applications" on esitetty kaavat, joiden avulla komposiittikorjauksille voidaan tehdä tarvittavat laskelmat.

7.1 Ei-vuotava putki

Kun korjattava putkiston osa ei vuoda, laskelmat korjauskohteelle tehdään ASME PCC-2 ei-vuotavan komponentin kaavojen mukaisesti. Laskentaa suoritettaessa on huomioitava, että ASME:n laskentakaavoissa yksiköt eivät ole SI-muodossa. Suunnittelukorjauspaksuus komposiittikorjaukselle määritellään kaavassa 2. [22.]

$$t_{repair} = \frac{1}{E_c * \epsilon_c} \left(\frac{PD}{2} - st_s \right) \quad (2)$$

t_{repair}	suunnittelukorjauspaksuus
E_c	komposiitin kimmokerroin ympärysmitan suunnassa
ϵ_c	komposiitin sallittu venymä ympärysmitan suunnassa
P	suunnittelupaine
D	korjattavan putken ulkohalkaisija
s	teräksen sallittu jännitys
t_s	jäljellä oleva teräksen seinämäpaksuus

Lämpötilakerroin f_T määritellään kaavalla 3 seuraavasti:

$$f_T = 2 * 10^{-5}(T_m - T_d)^2 + 0,0006(T_m - T_d) + 0,7014 \quad (3)$$

T_d suunnittelulämpötila korjaussysteemille

T_m maksimilämpötila komposiittisysteemille

Sallittu venymä komposiitille ympärysmitan suunnassa saadaan laskettua kaavalla 4:

$$\varepsilon_c = f_T \varepsilon_{c0} - \Delta T(\alpha_s - \alpha_c) \quad (4)$$

ΔT suunnittelu- ja käyttölämpötilan välinen absoluuttinen lämpötilaero

ε_{c0} sallittu venymä ympärysmitan suunnassa ASME PCC-2 standardista

α_s teräksen lämpölaajenemiskerroin

α_c komposiitin lämpölaajenemiskerroin

7.2 Vuotava putki

Vuotavan putken tapauksessa laskentakaavana käytetään kaavaa 5. Vuotavan putken laskenta tapahtuu hieman eri tavalla kuin ei-vuotavan putken laskenta. Ei-vuotavalle putkelle lasketaan suunnittelukorjauspaksuus muiden arvojen perusteella, kun taas vuotavan putken laskenta tapahtuu kaavalla 5 laskemalla suunnittelupaine, jonka korjaus tulee kaavaan syötetyllä korjauksen minimipaksuudella kestäämään.

Sopivaa komposiittikorjauksen minimipaksuusarvoa lähdetään iteroimaan kaavalla 5 laskemalla yhden komposiittikerroksen paksuus kerrottuna käytettävällä kerrosmäärällä ja lasketaan, tuleeko näin käyttäen korjaukselle sallitusta suunnittelupaineesta suurempi tai yhtä suuri kuin korjauskohteen suunnittelupaine, jolloin komposiittikorjauksen voidaan todeta kestävän kohteen suunnittelupaineessa. [22.]

$$P = f_T f \sqrt{\frac{\gamma_{LCL}}{\frac{(1-\nu^2)}{E} \left(\frac{3}{512 t_{min}^3} d^4 + \frac{1}{\pi} d \right) + \frac{3}{64 G t_{min}} d^2}} \quad (5)$$

P	suunnittelupaine
f_T	lämpötilakorjauskerroin
f	käyttökorjauskerroin
γ_{LCL}	komposiitin sitkeysarvo
t_{min}	komposiittikorjauksen minimipaksuus
ν^2	komposiitin Poissonin vakio korotettuna toiseen potenssiin
E	komposiitin kimmokerroin
d	vaurion tai vuotokohdan halkaisija
G	komposiitin liukukerroin

Komposiitin Poissonin vakio korotettuna toiseen potenssiin eli ν^2 lasketaan kaavalla 6

$$\nu^2 = \left(\nu_{ac}^2 * \frac{E_a}{E_c} \right) \quad (6)$$

ν_{ac}	komposiitin Poissonin vakio ympärysmitan suunnassa
E_a	komposiitin kimmokerroin aksiaalisuunnassa
E_c	komposiitin kimmokerroin ympärysmitan suunnassa

Kaavassa 5 esiintyvä komposiitin kimmokerroin E lasketaan kaavalla 7 seuraavasti

$$E = (E_a * E_c)^{0,5} \quad (7)$$

7.3 Korjauksen kokonaispituus

ASME PCC-2-2011 standardin mukaisilla laskukaavoilla lasketaan myös kokonaispituus korjaukselle. Sitä varten on laskettava overlap-pituus komposiittikorjaukselle. Overlap-pituus tarkoittaa pituutta, jonka verran komposiittikorjauksen täytyy ulottua korjausalueen yli. Kaavassa 8 havainnollistetaan tätä laskentaa. [22.]

$$L_{over} = 2,5 * \sqrt{D_t/2} \quad (8)$$

L_{over} overlap-pituus korjaukselle

D_t korjausalueen halkaisija

Korjauksen kokonaispituus muodostuu kaavan 9 mukaisesti

$$L = 2L_{over} + L_{defect} + 2L_{taper} \quad (9)$$

L kokonaiskorjauspituus

L_{defect} vauriokohdan pituus

L_{taper} päädyn kartiomainen pituus

Korjauskohdan päätyreunojen kartiomaisen osan pituuden suhteen tulee käyttää vähintään suhdetta 5:1 korjauspaksuuteen nähden ASME PCC-2 -standardin mukaisesti. [22.]

8 NRI:n komposiittimateriaalit

NRI suunnittelee, kehittää ja valmistaa komposiittikorjauksissa käytettäviä komposiittimateriaaleja. Itse komposiittimateriaalien lisäksi NRI tuottaa myös muun muassa Composite Clamp -vuodonestopantoja, Composite Guard FP -palosuojaeristystä sekä UV-suojapäälylystä. NRI:n tuotekehitysosasto kehittää komposiittituotteita jatkuvasti. NRI:n tuotteet on valmistettu ja pakattu heidän ISO 9001-sertifioidussa tehtaassaan ja niille on tehty vaativia laadunvarmistustestejä ASME PCC-2 -standardin vaatimusten mukaisesti. [3.]

Liitteessä 2 on esitelty NRI:n yleisimmät petrokemian teollisuudessa käytetyt komposiittimateriaalit teknisine tietoineen ja ominaisuuksineen. [3.]

9 Vertailu ja käyttömahdollisuudet

Vertailtaessa komposiittikorjausta muihin tilapäiskorjausmenetelmiin on muistettava se, että jokaista tilapäiskorjausta harkitaan aina tapauskohtaisesti.

Eräänä komposiittikorjauksen etuna massapantakorjaukseen nähden on sen keveys. Putkiston lisätuennan tarve on täten vähäisempi, kun komposiittikorjauksen tuoma painonlisäys on paljon pienempi kuin muissa menetelmissä. Korjauskohteeseen ei synny komposiittikorjauksessa lämpörasitusta, sillä komposiittikorjaus ei vaadi korkeaa lämpötilaa asennuksen onnistumiseksi. Komposiittikorjauksessa esivalmisteiden tarve on vähäinen. Komposiiteilla voidaan korjata monimutkaisiakin muotoja sekä vahvistaa esimerkiksi säiliöiden seinämiä. Komposiitti tarjoaa myös ulkoiselta korroosiolta suojaavan kerroksen korjauskohteen päälle.

Menetelmän haasteena ovat lämpötilarajoitukset. Minimilämpötilan kannalta raja harvoin tulee vastaan, sillä komposiittikorjaukselle on ilmoitettu -46 °C minimiraja materiaalityöntäjän toimesta. ASME PCC-2 -standardissa on ilmoitettu, että lämpötilaa -50 °C pidetään minimilämpötilana komposiittikorjaukselle, ellei materiaalityöntäjä ole muuta ilmoittanut. Tämä rajaa sellaisten putkistojen korjaamista, joissa vikatilanteessa voi lämpötila laskea minimirajan alapuolelle, esimerkiksi nestekaasulinjassa näin voi käydä vuodon sattuessa, kun nestekaasu purkautuu vuotokohdasta ulos laskien lämpötilaa korjauskohteessa. [22.]

Sen sijaan maksimilämpötila on rajaavampi tekijä korjauksia suunniteltaessa jalostamoympäristössä. Maksimilämpötila parhaiten lämpöä kestäväälle komposiittimateriaalille on 149 °C. Esimerkiksi 5 barin höyrylinjojen lämpötila on 150 °C, jolloin ne ovat juuri maksimilämpötilarajan yläpuolella. Paine sen sijaan ei usein ole rajoittava tekijä.

Thermo Wrapille tehdyssä ASME PCC-2 -standardin artikkelin 4.1 liitteen III mukaisessa painekokeessa standardin mukaisesti valmisteltuun testiputkeen asennettu 9. kerroksinen komposiittikorjaus petti paineen ollessa noin 370 bar. Paineenkestoon voidaan vaikuttaa suoraan kerrosmäärällä, mutta lämpötilankestoon ei voida vaikuttaa, sillä se on materiaalin ominaisuus. [3; 11; 12; 22.]

Ympäristön haasteina voidaan pitää UV-säteilyä, jolta tosin voidaan suojautua asentamalla suojaava kerros komposiittikorjauksen uloimmaksi kerrokseksi. Myös tulipalolta voidaan suojautua asentamalla tulipaloeriste korjauksen päälle. Asennuksen aikana on korjausalueen lämpötilan oltava vähintään käytettävälle komposiittimateriaalille ilmoitettu minimiasennuslämpötila, jotta asennus onnistuu. Tämä saadaan hoidettua lämmitimillä ja usein myös asennuksen ympärille kasattavalla lämpöteltalla, joka lämmitetään tarvittavaan lämpötilaan. [11.]

Kun lämpötila on yli tai hyvin lähellä komposiitin maksimikäyttölämpötilaa, on suositeltua tehdä korjaus käyttäen muita tilapäiskorjausmenetelmiä. Kun taas ollaan komposiitille sallituissa lämpötilarajoissa, on se vartenotettava vaihtoehto korjausmenetelmäksi. Käyttöhyödykelinjat, joissa lämpötila on komposiitille soveltuviissa rajoissa, sopivat komposiittikorjauskohteiksi. Myös säiliöalueella on paljon komposiitille olosuhteiltaan soveltuvia putkistoja, esimerkiksi öljyisen veden linjoja tai kaasulinjoja, joissa on matalat lämpötilat ja paineet.

Vetylinjojen komposiittikorjauksia ajatellen haasteena voi olla vedyn mahdollinen diffuusio hartsimateriaalin läpi. Komposiittikorjauksia on kuitenkin toteutettu vetyputkistoihin. NRI:n verkkodokumentissa on käsitelty 20":n kokoisen ja 160 barin paineisen vetylinjan T-haaran korjaus Viper Skin -hiilikuitulujitteisella polyuretaanikomposiitilla. Kyseisen komposiittimateriaalin lämmönkesto on vain 90 °C, mutta korjauskohteen suunnittelulämpötilan ollessa 50 °C on tätä materiaalia voitu kohteessa käyttää. Kohde on komposiitin asennuksen jälkeen vielä palosuojattu Composite Guard FP-palosuojajeristeellä. [23.]

Kuten aiemmin on jo todettu, jos pysyvä korjausmenetelmä kohteeseen on mahdollista tehdä, se myös tehdään. Mikäli olosuhteet eivät pysyvän korjausmenetelmän käyttöä salli, otetaan tilapäiskorjausmenetelmät harkintaan. Tällöin katsotaan mitkä menetelmistä sopivat kohteeseen ja näistä menetelmistä taas arvioidaan kustannuksia tapauskohtaisesti. [6.]

10 Komposiittikorjauksen laatu ja tarkastaminen

Komposiittikorjauksen laatuun vaikuttavat monet tekijät, jotka kaikki vaikuttavat korjauksen laadukkaaseen onnistumiseen ja kestoikään. Heti korjausta suunniteltaessa ja laskelmia pyydetessä virhettä voi aiheutua siitä, jos arviointilomaketta ei täytetä tarpeeksi hyvin tai jos siihen täytetään mahdollisesti virheellisiä tietoja. Korjauksen laskelmat tehdään arviointilomakkeessa ilmoitettujen tietojen perusteella ja siksi siinä tehdyt virheet vaikuttavat korjaukseen.

Virhettä voi aiheutua myös komposiitin asennustyöstä, esimerkiksi siinä, jos komposiittikerrosten väliin jää ylimääräistä ilmaa tai jos komposiittikerrosten päällekkäisyys on väärä, mikä vaikuttaa lopullisen korjauspaksuuden onnistumiseen. Kerrokset voivat rypistyä tai kerrosten väliin voi jäädä likapartikkeleita. Materiaaleissa voi myös olla virhettä, mutta tämä on harvinaisempaa. Jos materiaaleja on säilytetty väärin, voivat niiden ominaisuudet olla ilmoitetuista poikkeavia. Komposiiteissa käytettävillä hartseilla on myös erääntymispäivä, jonka umpeuduttua niitä ei saa enää käyttää. Komposiittikorjauksissa on asennuksen aikana käytössä laadunhallintalomake, johon kirjataan ylös muun muassa käytetyn hartsin ja kovetteen eränumerot. Lomakkeessa on myös listattuna asennuksen aikaisia työvaiheita, jotka kuitataan lomakkeeseen tehdyksi työvaiheen suorittamisen jälkeen.

Eräs tärkeimmistä korjaukseen vaikuttavista asioista on korjattavan putken pinnan esikäsittelyn onnistuminen. Komposiitissa käytettävän muovihartsin ja putken pinnan välillä on oltava suora kosketus. Niiden väliin ei saa jäädä suoraa kosketusta häiritseviä partikkeleita tai muuta materiaalia. Jos näin käy, korjaus voi epäonnistua virheellisen adheesion vuoksi. Putken pinnan esikäsittelyn ja komposiitin asennuksen välillä ei myöskään saisi kulua liian kauan, jotta pintaan ei ehdi muodostua korroosiota tai muuta adheesiota häiritsevää materiaalia. [22.]

Korjausta suoritettaessa on myös otettava huomioon epoksihartsia käytettäessä se, että komposiitilla korjattavan putken pinta on kuiva. Jos putken pinnan lämpötila on liian lähellä kastepistettä, saattaa pintaan kondensoitua ilmasta kosteutta. Tästä syystä komposiittimateriaalin teknisissä tiedoissa on ilmoitettu tarvittava varmuus putken pinnan lämpötilasta kastepistelämpötilaan nähden. Tästä erillisenä vaatimuksena on vielä alin asennuslämpötila, joka esimerkiksi Thermo Wrap -lasikuituvahvisteiselle epoksihartsiselle komposiitille on 5 °C. [12.]

Komposiittien laaduntarkastus NDT-menetelmillä on taitoa vaativaa. Menetelmistä visuaalinen tarkastus on helpoin ja yksinkertaisin toteuttaa, siksi se on myös käytetyin tarkastusmenetelmä. Visuaalisella tarkastuksella päästään tarkastamaan luonnollisesti vain korjauksen pintaa. Mahdollisia komposiitissa olevia huokosia, halkeiluja, kerrosten välisiä irtoiluja tai putken pinnan ja komposiitin välisiä kiinnittymishäiriöitä ei voi havaita visuaalisella tarkastuksella. Näiden virheiden tarkastukseen on käytettävä muita menetelmiä. Edellä mainittujen vikojen havaitsemiseen voidaan käyttää radiografisia tarkastusmenetelmiä, kuten röntgen- ja isotooppikuvausta. Vaihtoehtona on myös ultraääni-tarkastus tai akustinen emissio. Termografiaa käytetään myös komposiitissa olevien vikojen havaitsemiseen. [9; 13.]

Kun komposiittikorjaus on suoritettu ja komposiitti kovettunut, ensimmäinen tarkastettava asia on kovuusarvon mittaaminen komposiitin pinnasta. Kovuusmittauksia otetaan vähintään kymmenestä kohdasta komposiitin pinnasta durometrin avulla. Mittauksella saatava Shore D -arvo kertoo, onko komposiitin kovuus vaatimuksien mukainen ja tästä voidaan päätellä korjauksen onnistuminen. Korjauksen laatua arvioidaan myös visuaalisesti sekä korjauksen aikana että korjauksen suorittamisen jälkeen. Hyväksymisrajat visuaaliselle tarkastukselle on määritelty hyvin ASME PCC-2 -standardin osassa 4 artikkelissa 4.1 ja standardissa SFS-EN ISO 24817 ja ne on esitetty taulukossa 3. [22.]

Taulukko 3. Tarkastuskohteet komposiitin asennuksen jälkeen ja käytön aikana [22; 24]

Alue	Vaurio	Hyväksymisrajat
Putken ja korjauksen rajapinta korjausalueen päädyissä	Delaminaatio putken ja korjauksen välillä	Ei sallita
Korjauksen pinta eli hartsivaltainen alue	Halkeama	Ei sallita
	Vieras aines, kuplat ja kuopat	Enintään 10 mm leveä, 2,5 mm korkea
	Rypyt	Ei yli 2,5 mm äkkinäisiä korkeuseroja paksuudessa
	Reiät	Ei hartsivaltaista kerrosta syvempiä
	Hartsin väri	Tasalaatuinen
	Kuivat kohdat	Ei sallita
Koko korjaus	Kuitujen suuntaus	Suunnitelmissa määritelty
	Hartsilla kyllästämättömät kuidut	Ei sallita
	Esillä olevat kuidut	Ei sallita
	Vieras aines, kuplat ja kuopat	Ei sallita
	Korjauksen aksiaalinen pituus ja asemointi	Suunnitelmissa määritelty. Ei saa ulottua pidemmälle kuin esikäsitelty putken pinta
	Iskuvaurio	Ei sallita

Komposiittien tarkastamisessa täytyy ottaa huomioon hyväksymisrajat komposiittikorjauksesta löytyville virheille. Tarkastettavia osioita, niistä mahdollisesti löytyviä vaurioita ja niiden hyväksymisrajoja on koottu taulukkoon 3 standardien ASME PCC-2 sekä SFS-EN ISO 24817 mukaisesti. Hyväksymisrajoja on määritelty sekä ASME PCC-2 -standardissa että SFS-EN ISO 24817 -standardissa. Näistä kahdesta SFS-EN ISO 24817:ssä on otettu lisäksi kantaa korjauksen määräaikaistarkastuksissa löytyviin iskuvaurioihin. Niiden kohdalla hyväksymisraja on selvä: niitä ei sallita lainkaan. [22; 24.]

Komposiittimateriaalille on ASME PCC-2 -standardissa kerrottu iskunkestävyyden vaatimuksena, että materiaalituottajan on esitettävä komposiittimateriaalin kestävän 5 joulen iskuenergia standardin artikkelin 4.1 liitteen ”Mandatory Appendix VI: Measurement of Impact Performance” mukaisella testimenetelmällä toteutettuna. Thermo Wrap -komposiitti täyttää kyseisen standardoidun testin mukaiset vaatimukset. [14; 22.]

SFS-EN ISO 24817:ssä on otettu myös kantaa delaminaatioon korjausalueen päädyissä. Sitäkään ei sallita komposiittikorjauksessa. Ohjeena standardissa on kerrottu, että kerrosten välistä irtoilua komposiittikorjauksen sisältä voi etsiä niin sanotulla koputus-testauksella. Se tarkoittaa sitä, että komposiitin pintaa voi korjauksen kovettumisen jälkeen kopautella useasta kohdasta kevyesti ja kuuntelemalla siitä aiheutuvaa ääntä. Epäjatkuvuuskohtia voidaan havaita niistä koputuksessa lähtevän äänen perusteella, joka eroaa ehjän alueen äänestä. Tämä on tietysti hyvin virhealtis ja testaajasta riippuvainen menetelmä eikä sen perusteella voida tehdä päätelmiä vaurion tyypistä tai koosta. Myös ASME PCC-2 standardin osan 4 artikkelin 4.1 luvun 5 alaluvussa 5.4 ”Inspection Methods” on määritelty erääksi tarkastusmenetelmäksi koputustestaus komposiitin pinnasta. Kummassakin standardissa on hyvin vähän materiaalia komposiittien tarkastamisesta. [22; 24.]

Kun komposiittikorjaus on asennettu kohteeseen, on korjaukselle hyvä laatia tarkastusohjelma sen koko kestoajan ajalle. Tarkastusohjelmassa on määriteltävä tarkastusväli, tarkastusmenetelmät sekä tarkastuksien hyväksymisrajat. Määrätyin väliajoin korjaukselle on tehtävä tarkastuksia, jotta mahdolliset alkavat viat havaitaan ajoissa ja ehditään suunnitella korjaavia toimenpiteitä. Tilanteessa, jossa komposiittikorjauksessa havaitaan vaurio, voidaan edetä kahdella tavalla. Ensimmäinen on se, että komposiittikorjaus poistetaan ja se korvataan uudella korjauksella. Toinen vaihtoehto on jättää viallinen komposiittikorjaus paikoilleen ja tehdä päälle uusi korjaus, esimerkiksi massapantakorjaus, jonka sisälle komposiitti jää.

Komposiitin alla olevaa teräsputkea täytyy myös voida tarkastaa radiografisilla kuvausmenetelmillä. Komposiittien tarkastamisessa voidaan käyttää samoja menetelmiä kuin metallien tarkastamisessa, mutta niistä etsittävät virheet ovat hieman erilaisia ja havaitseminen hankalampaa. Tästä syystä on suositeltavaa, että tarkastuksia tekevät henkilöt koulutetaan komposiittien tarkastamiseen erikseen. NRI järjestää CIC- eli Composite Inspection Course -kurseja, joissa käydään läpi komposiittien tarkastukseen liittyviä asioita.

11 Referenssejä komposiittikorjauksista

Komposiittikorjauksista on olemassa referenssikohteita NRI:llä ympäri maailmaa öljynjalostamoympäristöstä. Eri referenssikohteiden esittelyjä voi tarkastella NRI:n verkkosivuilla. Tässä kappaleessa esitellään vain Nesteen Naantalin jalostamolla toteutettuja komposiittikorjauksia. Yhteistä tapauksille on se, että linjojen sulkeminen tai tyhjentäminen korjauksen ajaksi ei ollut mahdollista, muutoin korjaus olisi luonnollisesti suoritettu pysyvällä menetelmällä uusimalla korjausta vaativa putkiosuus.

Ensimmäisenä tapauksena käydään läpi Naantalin jalostamolla toteutettu komposiittikorjaus Ex-alueella sijaitsevalle 3” liuotulinjalle. Kyseisessä hiiliteräksisessä linjassa esiintyi sisäistä korroosiota, jonka vuoksi seinämäpaksuus korjattavalla alueella oli heikentynyt. Alkuperäisestä 6,02 mm:n seinämäpaksuudesta oli paikoitellen jäljellä enää 20 % eli 1,41 mm. Kohteessa ei esiintynyt vuotoa. Korjattavan alueen pituus, jolla korroosiota esiintyi, oli 300 mm. Putken suunnittelulämpötila oli 30 °C ja suunnittelupaine 3,5 bar. Korjauksen aikana putken paine oli 2,8 bar ja käyttölämpötila ympäristön lämpötila. Kohteesta palvelutoimittajalle annettujen tietojen perusteella sopivaksi kerros määräksi esitettiin 12 kerrosta Thermo Wrap -komposiittia. [11; 26.]

Ennen korjausta korjausalueen lähellä oleva laippa suojattiin teippaamalla se. Korjauskohta esikäsiteltiin hiomalla se käsin hiomapaperilla, sillä esikäsiteltävä alue oli verrattain pieni. Esikäsitteilyn jälkeen lujitekuiturullasta leikatut suikaleet kyllästettiin epoksihartsiin ja käärittiin korjauskohtaan kuvan 11 osoittamalla tavalla. Komposiitin päälle käärittiin vielä puristuskalvoa kovettumisen ajaksi. Kovettumisen jälkeen komposiittikorjaus oli valmis ja korjatulle putkenosudelle saatiin lisäkäyttöaika. [11; 26.]



Kuva 11. Komposiitin kääriminen liuotinputken ympärille

Toisena tapauksena Naantalın komposiittikorjauksista esitellään Ex-alueella sijaitsevan 6” amiinilinjan korjaus. Korjaustarve johtui käyrän ja suoran putkiosuuden välisessä hitsisaumassa olevasta halkeamasta. Kyseisen linjan materiaalina on hiiliteräs ja sen suunnittelulämpötila on 90 °C ja suunnittelupaine 2 bar. Käyttöpaine on 1 bar ja käyttölämpötila 70–80 °C. Edellisestä liuotinlinjan suorasta putkesta poiketen amiinilinjan korjauskohta sijaitsi putkikäyrässä ja korjausalue ei ollut aivan yhtä tilava, sillä amiinilinjan vieressä kulki höyrysaattolinja kuvan 12 mukaisesti. Tämän lisäksi kohde oli vieläpä vuotava. [11; 26.]



Kuva 12. Vuotava amiinilinja sekä vieressä kulkeva hörysaattolinja

Korjaus aloitettiin tukkimalla vuotokohta Thermo Fill -täytemassalla ja kuminauhalla. Vuodon tukkiminen edellä mainitulla tavalla onnistui vaivattomasti, sillä paine oli pieni ja lämpötila korkea, joten vuotokohta saatiin nopeasti kuivaksi. Tämän jälkeen korjattavan alueen pinta esikäsiteltiin Bristle Blaster -pyörivällä teräsharjalla. Esikäsitellylle 200 mm pituiselle alueelle käärittiin 12 kerrosta Thermo Wrap -komposiittia ja annettiin sen kovettua puristuskalvon alla ohjeiden mukainen aika. Kovettumisen jälkeen korjatun kohteen käyttöä voitiin jatkaa. [11; 26.]

Mitä enemmän toimivia korjauksia komposiitilla tehdään, sitä enemmän luottamus kyseistä menetelmää kohtaan kasvaa. On kuitenkin syytä painottaa, että komposiittimenetelmä ei tule korvaamaan yhtäkään aikaisempaa korjausmenetelmää vaan se on yksi vaihtoehto lisää muiden korjausmenetelmien lisäksi, esimerkiksi juuri edellä kuvattujen mukaisiin kohteisiin.

12 Komposiittikorjauksen kustannukset

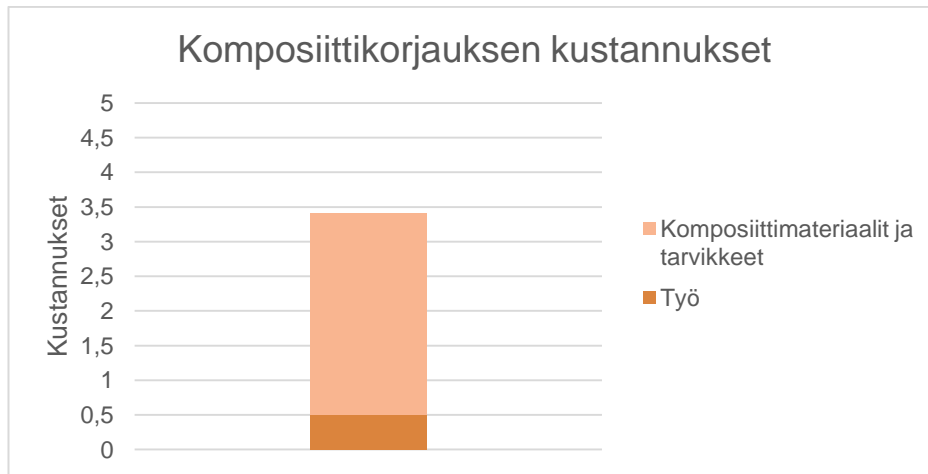
Komposiittikorjauksen käytön mahdollisuuksia selvittäessä kustannukset ovat yksi osa-alue, joka on syytä selvittää ennen korjauspäätöksen tekemistä ja korjaukseen ryhtymistä. Jotta komposiittikorjauksen kustannuksista saataisiin tietoa, kartoitettiin tässä työssä komposiittikorjauksen kustannuksia todellisen kohteen kautta.

Tähän työhön sisällytettävä kustannuksien kartoittaminen tehtiin 16” hiiliteräsputkelle. Putkistossa on sisäistä korroosiota ja heikoimmillaan seinämäpaksuuden on arvioitu olevan enää 3,5 mm alkuperäisen 9,5 mm:n seinämävahvuuden sijaan. Putkiston sisäinen korrosio on pahinta putkistossa kello 3–9 putkiston poikkileikkauksesta nähdessä. [27.]

Koska kyseessä ei ole vuotava kohde, ei kohteeseen tule vuodonestopantaa ennen komposiitin asentamista. Vuotavan kohteen tapauksessa kustannuksiin huomioitaisiin myös vuodonestopannan materiaali- ja asennuskustannukset.

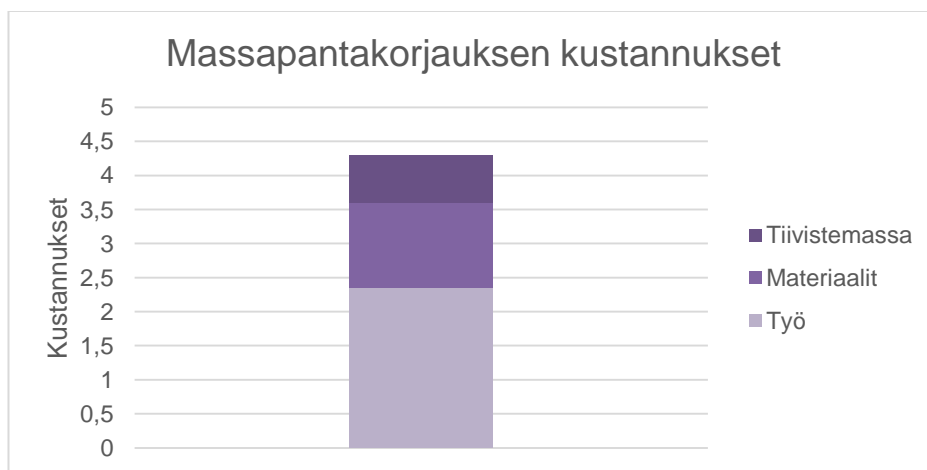
Vertailtavaksi korjausmenetelmäksi valittiin massapantakorjaus. Vertailu tehtiin samalle kohteelle kuin komposiittikorjauksessa eli 16” suoralle hiiliteräsputkelle, jossa ei ole vuotoa, vaan sisäistä korroosiota. Tällöin järkevin ratkaisu massapantakorjauksessa on laittaa korjausalueen pätyihin massapannat ja niiden väliin putki, joka hitsataan massapantoihin kiinni. Tiivistysmassalla täytetään vain päädyissä olevat massapannat, jolloin korjauspituuden muuttaminen ei vaikuta tiivistemassan eikä massantäyttöventtiilien määrään. Ainoastaan putkimateriaalin ja asennustyön kustannukset nousevat korjauspituuden kasvaessa. [7; 8; 10.]

Kuvien 13 ja 14 kustannukset on saatettu vertailukelpoisiksi keskenään. Niistä ei näe euromääriä, vaan suhteelliset kustannukset siten, että kustannusyksiköt ovat toisiaan vastaavia. Kuvassa 13 nähdään 16” suoran putken 500 mm korjauspituudelle laaditun komposiittikorjauksen kustannusarvion materiaalien ja tarvikkeiden suhde asennustyöhön. Kuvasta voidaan todeta, että materiaalien osuus kustannuksista on selvästi suurin. Työhön sisältyy komposiittikorjauksen asennustyö esikäsittelyineen, materiaaleihin ja tarvikkeisiin sisältyy kaikki korjauksessa tarvittavat materiaalit ja tarvikkeet sekä komposiitin päälle asennettava palosuojaeriste.



Kuva 13. 16” ei-vuotavan suoran putken komposiittikorjaus

Kuvassa 14 nähdään vastaavasti 16” suoran putken 500 mm korjauspituudelle laaditun massapantakorjauksen kustannusarvion materiaalien ja tiivistemassan suhde asennus- ja valmistustyöhön. Kuvassa työhön lukeutuu massapantojen ja niiden väliin tulevan putkikotelon valmistus- sekä asennustyö, materiaaleihin lukeutuu edellä mainittujen osien materiaalikustannuksien lisäksi massapantoihin tulevien massantäyttöventtiilien kustannukset ja tiivistemassan kustannuksiin kuuluu massapantoihin tulevan tiivistemassan kustannukset.



Kuva 14. 16” ei-vuotavan suoran putken massapantakorjaus

Massapantaratkaisussa materiaalien ja työn osuus vaihtelee sen mukaan, minkälaista ratkaisua korjaukseen käytetään. Jos kohde olisi vuotava eikä kohteessa voisi hitsata, tulisi tiivistemassan määrä olemaan hallitsevin kustannustekijä korjauksessa, sillä tällöin koko kotelo tulisi täyttää massalla kokonaisuudessaan. Korjauspituuden kasvaessa kasvaisi myös käytettävän tiivistemassan määrä. Massan kustannukset menevät tällaisessa ratkaisussa suorassa suhteessa korjauspituuteen nähden. Myös massantäyttöventtiilien lukumäärän kasvu pituuden kasvaessa nostaisi tällaisessa tapauksessa kustannuksia. Tähän on huomioitava myös massan pumppaamisajan pidentymisestä aiheutuva työkustannusten nousu korjauspituuden kasvaessa. [8; 10.]

Kuvista 13 ja 14 nähdään, että tässä tapauksessa ja tälle korjauspituudelle komposiittikorjauksen kustannusarvion kokonaiskustannukset ovat hieman matalammat kuin saman tapauksen massapantakorjauksen kokonaiskustannukset.

Eri kohteessa, eri materiaaleilla ja eri korjauspituudella materiaalikustannusten ja asennuskustannusten keskinäinen suhde voi olla hyvin erilainen. Kustannuksia onkin arvioitava aina tapauskohtaisesti. Korjausmenetelmän valintaan vaikuttavat kohteen eristettävyyys muista linjoista, hinta sekä muut korjausta vaativat osuudet samassa putkessa. [28.]

Jos vertaillaan komposiittikorjaukselle eri pituuksille laadittuja kustannusarvioita, voidaan todeta, että kun korjauspituus kasvaa noin viisinkertaiseksi eli 500 millimetristä 2 600 millimetriin, niin kokonaiskustannusarvio korjaukselle palosuojauksineen kasvaa noin 4,5 kertaiseksi. Materiaalikustannukset ovat kummassakin tapauksessa hallitsevin tekijä kustannuksista.

Niin komposiittikorjausmenetelmän kuin muidenkin menetelmien kustannuksista on huomioitava myös korjauksen jälkeiset kustannukset. Kun kohde on saatu korjattua, on sitä tarkkailtava kohteeseen sopivilla tarkastusmenetelmillä. Tämä aiheuttaa luonnollisesti tarkastuskustannuksia.

Komposiittikorjauksen palvelutoimittaja voi ehdottaa kohteeseen myös Best Effort -ratkaisua. Best Effort -ratkaisussa korjauksen suunnittelun perusteena ei käytetä AS-ME PCC-2 -standardilaskelmia, vaan siinä on mahdollista käyttää laskelmaperusteena tiedettyä maksimikäyttölämpötilaa. Tällöin voidaan päästä tilanteeseen, jossa korjausmateriaalina voidaan käyttää materiaalia, jolla on matalampi maksimikäyttölämpötila, jolloin kustannukset laskevat. Best Effort -ratkaisu tulee kyseeseen vain, jos varmasti tiedetään, että putkiston maksimikäyttölämpötila on komposiittimateriaalin maksimikäyttölämpötilan alapuolella. On tärkeää huomata, että kyseinen ratkaisu ei tällöin ole AS-ME PCC-2 -standardin mukainen. [11.]

Todellisuudessa komposiittikorjauksen materiaalikustannukset voivat olla kustannusarviota pienemmät, jos korjaus saadaan suoritettua pienemmällä kuiturullamäärällä kuin mitä kustannusarvion laskemisessa on käytetty. Kustannusarvio on aina yläraja kustannuksille ja todelliset kustannukset voivat olla arvioitua matalammat. [11.]

Kustannuksia arvioitaessa on hyvä pitää mielessä kokonaiskuva. Komposiittikorjaus on tilapäiskorjausmenetelmä. Se on ratkaisu, jolla halutaan saada lisäkäyttöaika kohteelle siihen saakka, että kohde voidaan eristää ja korjata pysyvällä menetelmällä. Jos tilapäiskorjauksella voidaan välttyä tuotannonmenetyksiltä, niin korjauskustannukset ovat niihin nähden pieniä. [7.]

13 Aineenkoetus komposiittimateriaalille

Aineenkoetuskokeet suoritettiin käyttäen aineenkoetuslaitteistoja Metropolia Ammatti-korkeakoulun materiaalitekniikan laboratoriossa. Tässä kappaleessa selostetaan tehdyt aineenkoetuskokeet, niiden suunnittelu, esivalmistelut ja toteutukset.

13.1 Rikkova aineenkoetus

Rikkova aineenkoetus on erinomainen tapa selvittää materiaalin ominaisuuksia esimerkiksi laaduntarkastuksessa. Tässä insinööriyössä testauksen pääpaino oli nimenomaan rikkovalla aineenkoetuksella komposiittimateriaalin ominaisuuksien kartoittamiseksi.

13.1.1 Testimateriaalit

Tähän työhön valikoitui testattavaksi komposiittimateriaaliksi Thermo Wrap -komposiittimateriaali, joka on E-lasikuituvahvistettu epoksihartsikomposiitti. Thermo Wrapilla on paras lämmönkesto tarjolla olevista komposiittikorjausmateriaaleista, sillä sen maksimikäyttölämpötila on 149 °C. Tämän vuoksi se sopii monenlaisiin kohteisiin jalostamoympäristössä. Toisaalta Thermo Wrap on kustannuksiltaan suurempi kuin esimerkiksi Syntho Glass, jonka maksimikäyttölämpötila on vain 90 °C. Thermo Wrap on eräs yleisimmin käytetyistä materiaaleista NRI:n komposiittikorjauksissa ja sen käytöstä löytyy referenssejä muun muassa Nesteen Naantalin jalostamolta, näitä referenssejä on esitelty kappaleessa 10.

13.1.2 Testikappaleiden valmistaminen

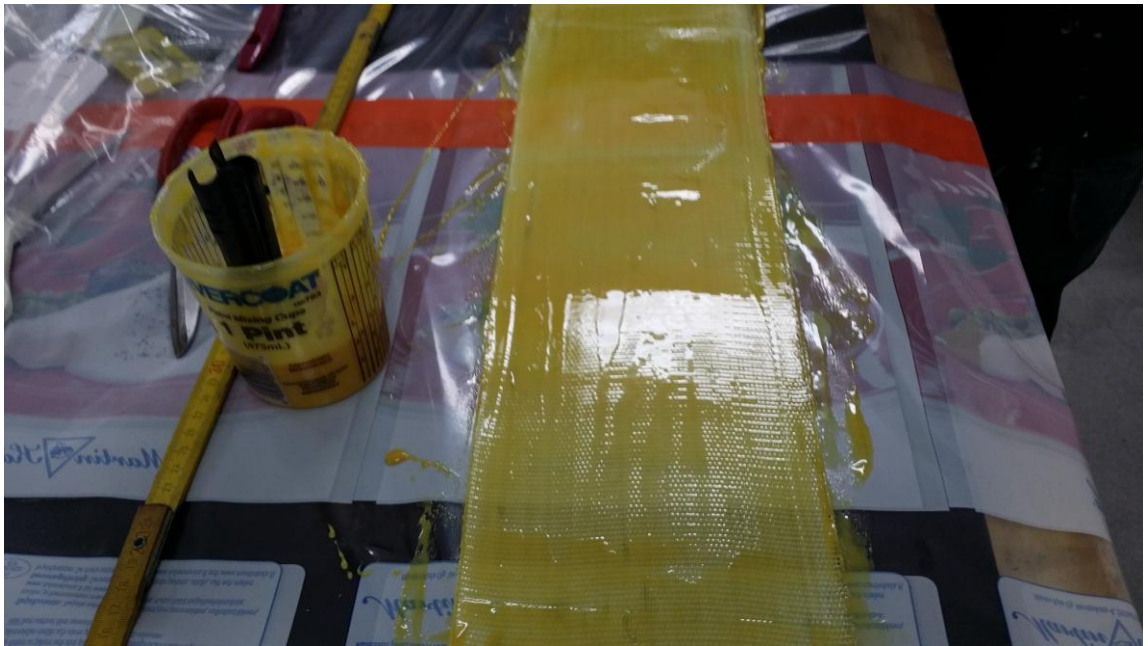
Komposiittilaminaatin valmistusraaka-aineina ovat Thermo Wrap -lasikuitumattorulla sekä Thermo Poxyl -epoksihartsin eli osa A sekä kovetin eli osa B, jotka nähdään kuvassa 15.



Kuva 15. Epoksihartsi sekä kovete pakkauksissaan

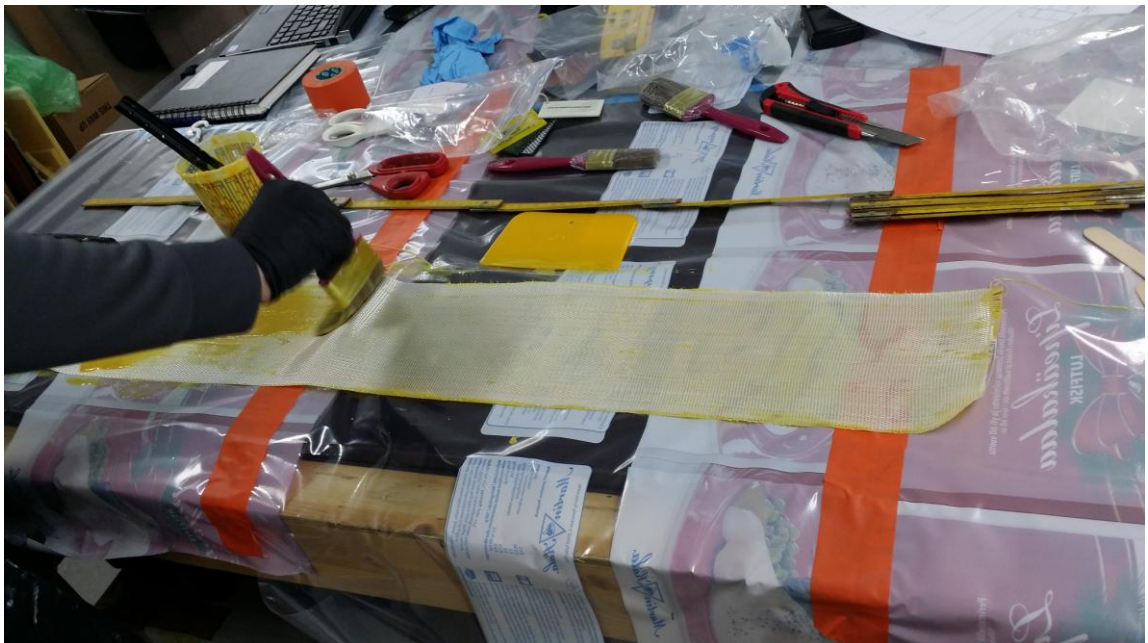
Komposiittimateriaalien kanssa samassa pakkauksessa olivat sekoitusastia, sekoitustikku, kaavain sekä suojahanskat. Laminaattien valmistusalustaksi soveltui tasomainen pöytä, jotta kappaleista tulee mahdollisimman suoria.

Testikappaleiden valmistus aloitettiin esivalmistelujen jälkeen sekoittamalla hartsi ja kovetin keskenään sekoituskupissa. On tärkeää, että hartsi ja kovetin sekoitetaan keskenään kokonaan sen vuoksi, että pulloissa on valmiiksi juuri sopiva määrä hartsia ja kovetinta oikean sekoitussuhteen aikaansaamiseksi. Mikäli kaikkea osaa hartseista ja kovetteesta ei käytettäisi, tulisi niiden sekoitussuhteesta väärä ja valmistettava komposiitti ei enää täyttäisi sille ilmoitettuja ominaisuuksia. Sekoituksen alkuvaiheessa hartseista vapautuu kaasuja, joiden vuoksi kaasusuojainta on syytä pitää kasvoilla. Kun sekoituksen alkuvaihe on ohi, ei kaasuja enää muodostu epoksihartseista. Pöydän päälle levitetyn kuitumaton päälle siveltiin valmista hartsia niin, että sitä oli varmasti joka kohdassa kuvan 16 mukaisesti.



Kuva 16. Epoksihartsilla kyllästetty Thermo Wrap -lasikuitumatto

Levityksen jälkeen hartsia kaavittiin materiaalien mukana toimitetulla kaavaimella tasaiseksi. Kun yksi puoli kuitumatosta oli kyllästetty hartsilla, kuitumatto käännettiin toisinpäin ja toinenkin puoli siveltiin hartsilla sekä kaavittiin, kuten kuvasta 17 voidaan nähdä.



Kuva 17. Thermo Wrap -lasikuitumaton kyllästäminen epoksihartsilla myös toiselta puolelta

Molempien puolien hartsilla kyllästämisen jälkeen kuitumatosta leikattiin sopivan kokoiset palat irti ja aseteltiin tarvittava määrä kerroksia päällekkäin oikean paksuuden aikaansaamiseksi kuvan 18 mukaisesti.



Kuva 18. Kovettumaton komposiittilaminaatti tasaisella alustalla

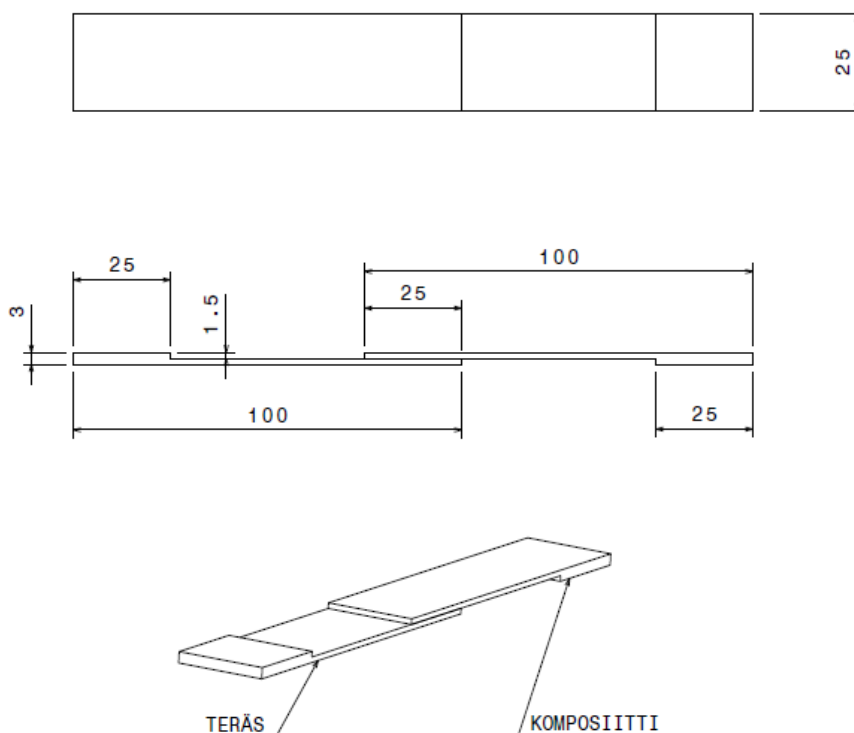
Jokaisen kerroksen jälkeen komposiitista kaavattiin ilmakuplia kerrosten välistä pois. Kun tarvittava kerrosmäärä kuitumattoa oli asetettu päällekkäin, asetettiin tuotteen päälle painolevy molemmilta puolilta tasaisen komposiittituotteen aikaansaamiseksi. Kovettumaton komposiittilaminaatti jätettiin lasialustalle muutamaksi vuorokaudeksi kovettumaan. Kovettumisen jälkeen laminaatista oli mahdollista valmistaa kappaleita testausta varten.

13.1.3 Teräs-komposiittivetokoe

Testin tavoitteena on selvittää, miten teräksen pinnan esikäsitteilyn toteuttaminen eri menetelmillä vaikuttaa komposiitin kiinnittymiseen teräksen pintaan. Liitoksen testaus suoritetaan vetokoealusteistolla, jolloin teräksen ja komposiitin välisen liitoksen leikkauslujuutta voidaan testata. Pinnankäsittelymenetelmiksi valittiin komposiittikorjauksissa kolme yleisesti käytetyintä menetelmää: hiekkapuhallus, hionta pyörivällä Bristle Blaster -teräsharjalla sekä Safety Tool -laikalla hionta. Teräsmateriaaliksi valittiin hiiliteräslävy ja komposiittimateriaaliksi Thermo Wrap -epoksihartsinen lasikuitukomposiitti.

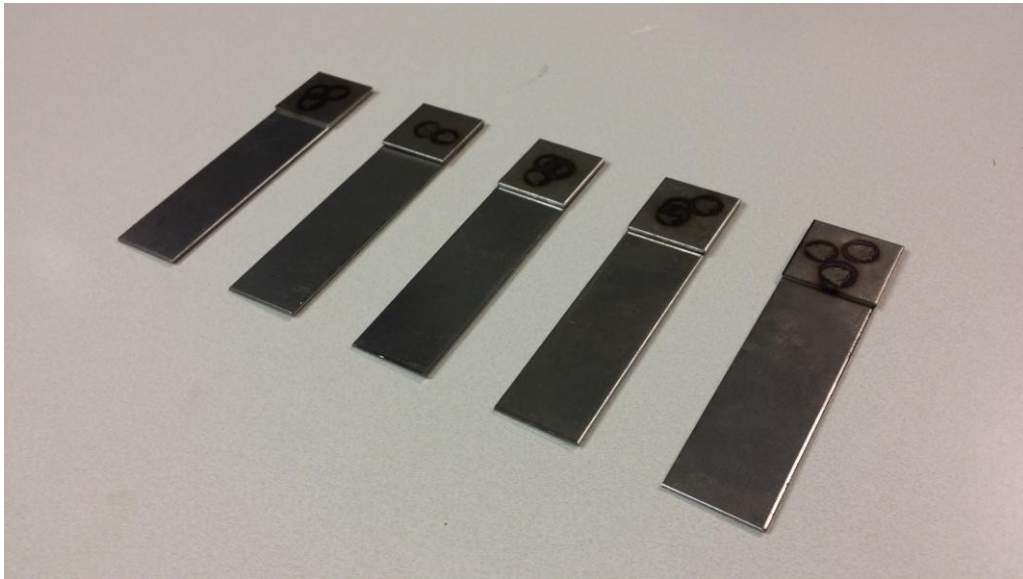
Standardi, jota mukailleen testi suoritettiin, on *ASTM D 5868 – Standard Test Method for Lap Shear Adhesion for Fiber Reinforced Plastic (FRP) Bonding*.

Testin suunnittelu aloitettiin tutustumalla ASTM D 5868 -standardiin teräksen ja komposiitin liitostestauksesta. Testiin valittiin standardissa suositeltu viiden toiston vähimmäissuositusmäärä, joten kolmella eri pinnanlaadulla testikappaleita tulisi valmistaa yhteensä viisitoista kappaletta. Testikappaleen mitat valittiin lähelle ASTM D 5868 -standardissa esitetyjä mittoja. Mitat olivat sekä teräs- että komposiittilatalle 100 x 25 x 1,5 mm. Sekä teräs- että komposiittiosan pätyyn liitettiin 25 x 25 x 1,5 mm pala, jotta kappale saataisiin asennettua vetokoneeseen suoraan. Kun kappaleiden mitat olivat selvät, aloitettiin kappaleiden valmistus leikkaamalla hiiliteräslevystä tarvittava määrä mittojen mukaisia teräspaloja. 100 x 25 lattoihin pistehitsattiin 25 x 25 latat kuvan 19 piirroksen mukaisesti.



Kuva 19. Testikappaleen mitoitus

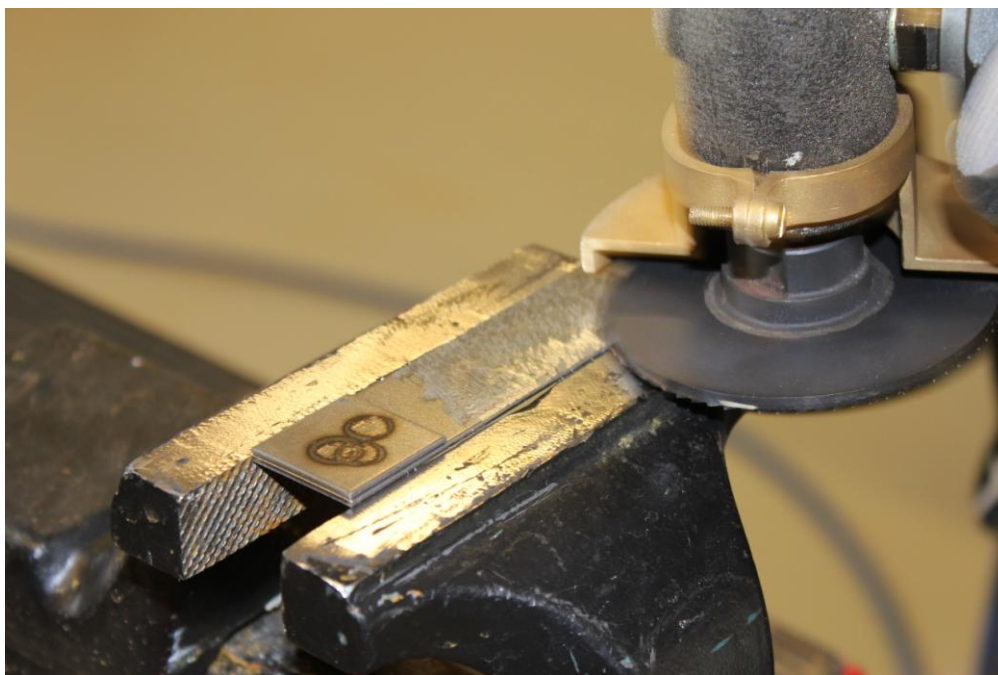
Kuvassa 20 nähdään valmiita teräskappaleita teräs-komposiittivetokoetta varten valmistettuna.



Kuva 20. Teräskappaleita komposiitin ja teräksen liitostestaukseen

Teräskappaleiden valmistuksen jälkeen oli niiden pintakäsittelyn vuoro. Tähän testiin valitut kolme pinnankarhennusvaihtoehtoa valikoituivat niiden komposiittikorjauksiin soveltuvuuden vuoksi. Näitä kolmea menetelmää käytetään yleisesti komposiittikorjauksien pinnankarhennuksissa ja näin ollen testissä pystyttiin vertailemaan yleisesti käytettyjen pinnankarhennusmenetelmien vaikutusta komposiitin kiinnittyvyyteen hiiliteräsmateriaalin pintaan.

Ensimmäiset viisi teräskoekappaletta käsiteltiin paineilmakäyttöisellä Safety Tools Allmetin Safety Tool A-0105 -työkalulla, johon oli kiinnitetty A-0500-hiomalaikkaterä. Safety Toolin paineilmakäyttöiset pinnankarhennustyökalut sopivat erinomaisesti jalostamoympäristön komposiittikorjauskohteiden pinnankarhennukseen niiden ATEX-luokituksensa vuoksi. Ne sopivat käytettäväksi Ex-alueilla 1–2. Viisi teräskoekappaletta karhennettiin Safety Tool A-0105 -työkalulla kuvan 21 mukaisesti. [29.]



Kuva 21. Teräskoe-kappaleen pinnankarhennusta Safety Toolilla

Toinen viiden kappaleen sarja hiiliteräksisiä 100 x 25 lattoja karhennettiin paineilma-käyttöisellä MBX Bristle Blaster -teräsharjakoneella. Työkalussa on pyörivä kehä, johon on kiinnitetty teräksisiä piikkejä. Bristle Blaster on hyväksytty käytettäväksi Ex-alue 1:llä mahdollisesti räjähdysvaarallisessa ympäristössä Ex II 2G c IIA T4 X:n mukaisesti, kuten kuvasta 22 näkyy. [30.]



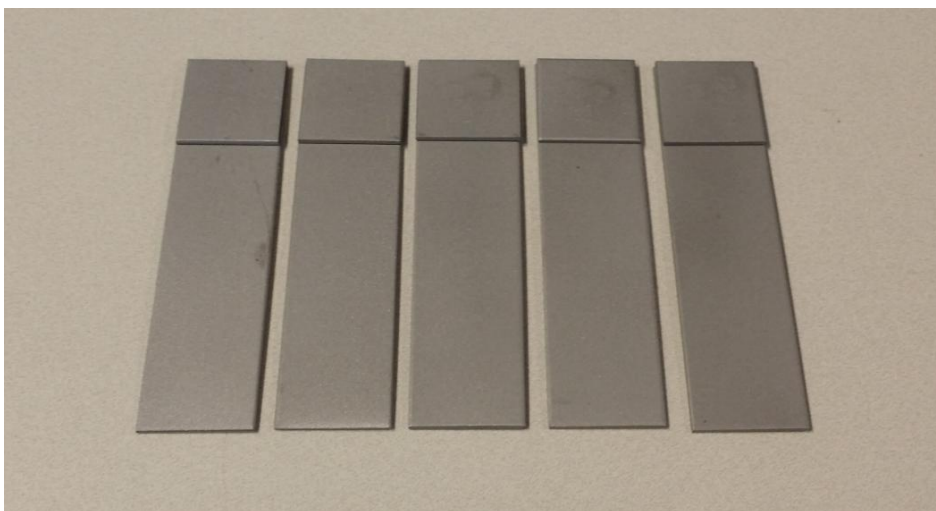
Kuva 22. MBX Bristle Blaster

Kuvasta 23 voidaan visuaalisesti todeta pinnanlaatu, joka Bristle Blasterilla karhentamalla saatiin aikaan.



Kuva 23. Teräskappaleen pinnanlaatu Bristle Blasterilla karhentamisen jälkeen

Kolmas ja viimeinen sarja teräskappaleita käsiteltiin lasikuulapuhaltamalla. Puhalluksessa käytettävien kuulien koko oli 300–400 μm . Kuvasta 24 voidaan todeta visuaalisesti lasikuulapuhallettujen teräskappaleiden pinnanlaatu.



Kuva 24. Lasikuulapuhalletut teräskappaleet

Kun kaikki teräskappaleet oli pintakäsitelty, niiden pinnankarheus mitattiin kuvan 25 mukaisella Mitutoyo Surftest 201 -pinnankarheusmittarilla.



Kuva 25. Pinnankarheuden mittaus

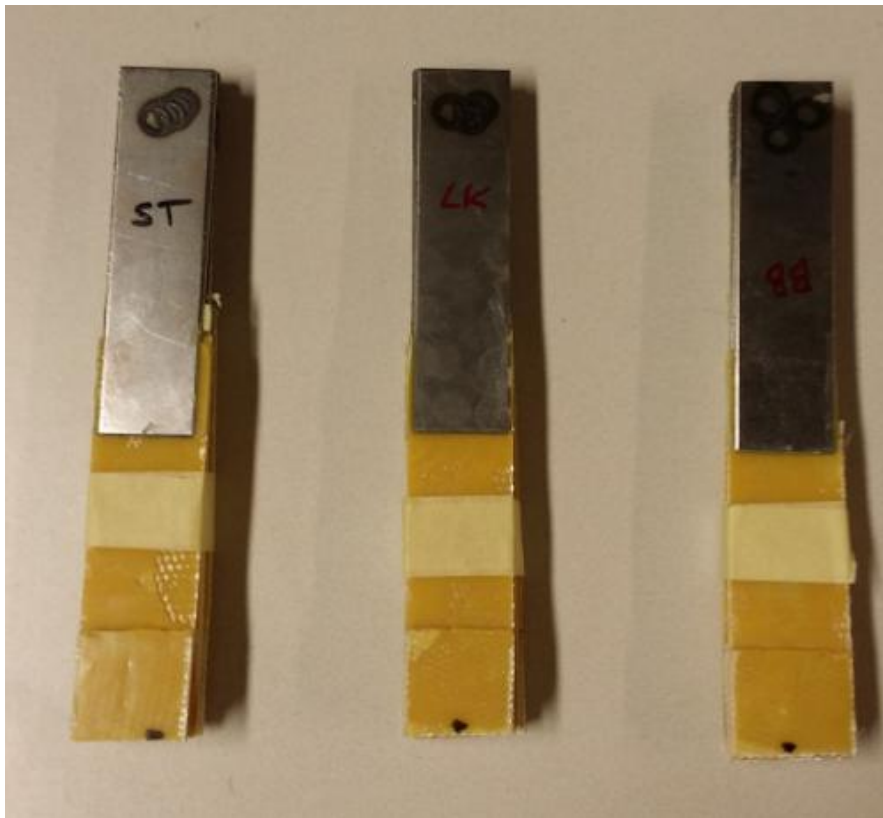
Pinnankarheuden mittaustulokset kirjattiin ylös ja ne nähdään taulukossa 4.

Taulukko 4. Pinnankarheusmittauksen tulokset

Kappale	Karhennustyökalu	Pinnankarheus [Ra]	Keskiarvo [Ra]
1A	Bristle Blaster	8,72	9,8
1B	Bristle Blaster	8,98	
1C	Bristle Blaster	9,26	
1D	Bristle Blaster	9,28	
1E	Bristle Blaster	12,58	
2A	Lasikuulapuhallus	2,70	2,7
2B	Lasikuulapuhallus	2,79	
2C	Lasikuulapuhallus	2,53	
2D	Lasikuulapuhallus	2,75	
2E	Lasikuulapuhallus	2,63	
3A	Safety Tool	4,46	6,8
3B	Safety Tool	9,12	
3C	Safety Tool	5,68	
3D	Safety Tool	5,96	
3E	Safety Tool	8,70	

Tuloksista nähdään, että Bristle Blasterilla käsittelemällä saatiin karhein pinta keskiarvolla Ra 9,8, lasikuulapuhaltamalla hienoin pinta keskiarvolla Ra 2,7 ja Safety Toolilla tehty pinnankarheus oli näiden kahden väliltä pinnankarheuden keskiarvon ollessa 6,8.

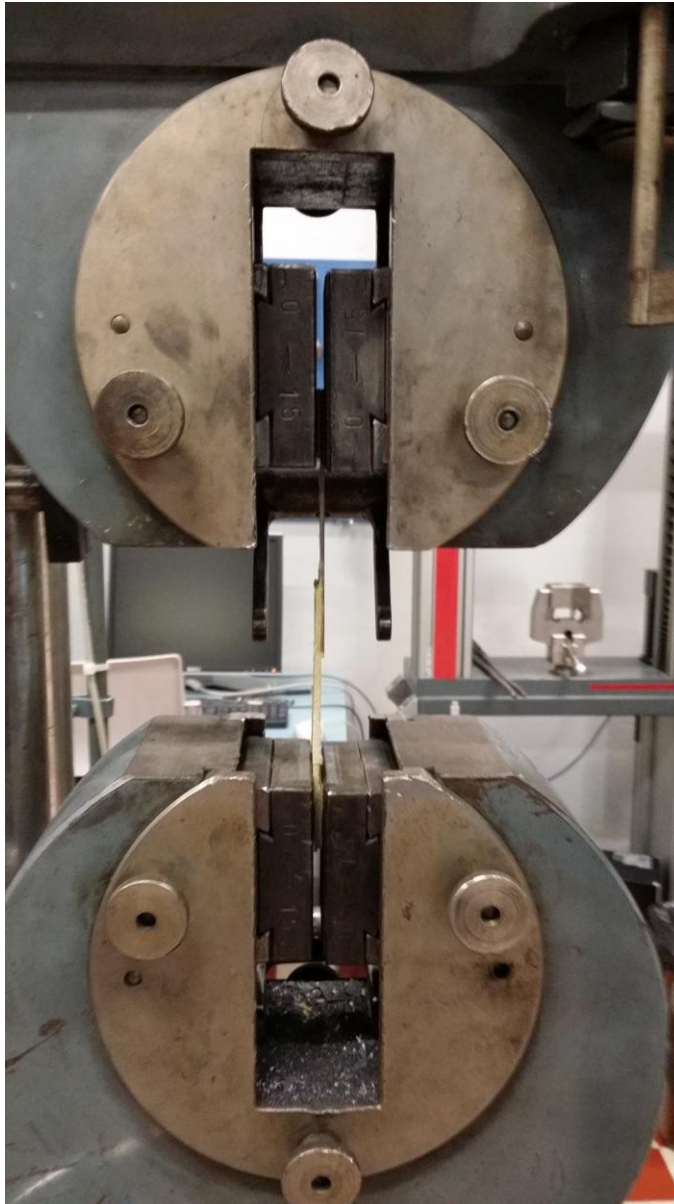
Pinnankarheusmittauksen jälkeen vuorossa oli komposiitin kiinnitys teräskappaleisiin valmiiden testikappaleiden valmistamiseksi. Testikappaleet valmistettiin kuvan 17 piirroksen mukaan siten, että liitoksen pinta-alaksi tuli kaikissa kappaleissa 625 mm². Liitokselle jätettiin teräskappaleen reunaan 25 mm pituusmitta teippaamalla teräskappaletta siten, että kyseinen 25 mm pituus jäi liitokselle käytettäväksi. Leveys suunnassa 25 mm tuli suoraan teräskappaleen leveydestä. Teräksen liitospinta puhdistettiin liuottimella. Puhtaalle liitospinnalle aseteltiin lasikuituvahvisteista, epoksihartsiin kyllästettyä komposiittia ja se jätettiin kuivumaan useaksi vuorokaudeksi. Valmiit testikappaleet olivat kuvan 26 mukaisia.



Kuva 26. Teräs-komposiittivetokoekappaleita

Testikappaleiden ollessa valmiita, oli vuorossa vetokokeen suorittaminen. Vetokoe suoritettiin Wolpert-vetokoneella asettamalla testikappale koneen leukojen väliin kuvan 27 mukaisesti ja kiristämällä kiinnitysleuat kappaleeseen kiinni liukumisen estämiseksi.

Kiristäminen oli suoritettava huolellisesti eikä kiristyksessä saanut käyttää liiallista voimaa, mikä havaittiin konkreettisesti koetta aloittaessa. Ensimmäinen teräskomposiittivetokoe kappale, tunnuksella 1A, petti liitoksestaan kiristettäessä kappaletta vetokoneen leukojen väliin, joten sitä seuraavien kappaleiden kanssa kiristäminen tehtiin varovaisemmin.



Kuva 27. Koekappale on kiinnitetty vetokoneeseen

Kun kappale saatiin kiinnitettyä vetokoneen leukojen väliin, käynnistettiin tietokoneella voimamittausohjelma ja vetokone laitettiin käyntiin. Vetonopeutena kokeessa käytettiin standardissa ASTM D 5868 suositeltua arvoa 13 mm/min. Kokeessa tarkoituksena oli aiheuttaa teräksen ja komposiitin väliseen liitokseen leikkausjännitys ja havainnoida,

millä voimalla liitos pettää. Kukin kappale petti teräs-komposiittiliitoksen kohdalta adheesion pettäessä. Kustakin koetilanteesta kirjattiin ylös maksimivoima, jolla liitos irtosi. Arvot kirjattiin ylös kappaleen 13.1 taulukkoon 5.

13.1.4 Komposiitin ja teräksen kovuuskoe

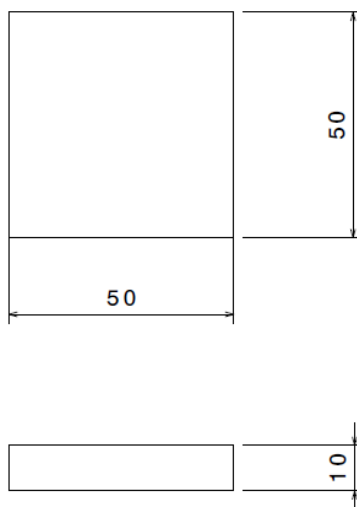
Kovuuskokeen tavoitteena on vertailla kuitulujitetun polymeerikomposiitin ja hiiliteräksen kovuusarvoja käyttäen samaa kovuusmittausmenetelmää kummallekin materiaalille vertailukelpoisten tulosten saamiseksi.

Kovuus määritellään materiaalin kyvyksi vastustaa pinnan läpi tunkeutuvaa vierasta esinettä. Kovuusmittaustuloksilla voidaan varovasti ja suuntaa antavasti arvioida materiaalin kykyä kestää abrasiivista kulumista.

Kokeeseen valittu kovuusmittausmenetelmä on Vickers-kovuusmittausmenetelmä. Vickersin kovuusmittauslaitteistossa on pyramidin muotoinen kärki, jonka kylkikulma on 136 astetta. Kärkeä painetaan testattavaan materiaaliin määrätyn ajan määrätyllä voimalla. Tämän jälkeen pyramidikärjen muodostama painuma mitataan kulmasta kulmaan. Kovuusmittauksia on tehtävä samasta materiaalista useampia ja otettava saaduista arvoista keskiarvo luotettavan tuloksen aikaansaamiseksi. Standardi, jota koeksessa käytettiin pohjana, on SFS-EN ISO 6507-1, joka on metallien Vickers-kovuuskoestandardi. Komposiiteille ei ole olemassa Vickers-kovuuskoestandardia, mutta metallien vastaavaa standardia oli mahdollista soveltaa komposiitin Vickers-kovuuden mittaamiseen.

Koestettavaksi teräsmateriaaliksi valittiin hiiliteräslevy ja komposiittimateriaaliksi Thermo Wrap -komposiitti, joka koostuu lasikuidusta ja epoksihartsista. Komposiittimateriaalin paksuudeksi valittiin 10 mm, teräskappaleen paksuudeksi 1,5 mm. Kummastakin materiaalista otettiin 10 kovuusmittausarvoa, joista laskettiin keskiarvo.

Teräskappale valmistettiin leikkaamalla 1,5 mm paksusta hiiliteräslevystä 25 x 25 mm kokoinen pala kovuustestiä varten. Komposiittikappale puolestaan valmistettiin Thermo Wrap -komposiitista leikkaamalla epoksihartsiin kyllästetystä lasikuitumatosta 50 x 50 mm x 10 mm kokoisia paloja kuvan 28 mukaisesti yhteensä 20 kerrosta, jotka aseteltiin ja paineltiin päällekkäin ja annettiin kovettua.



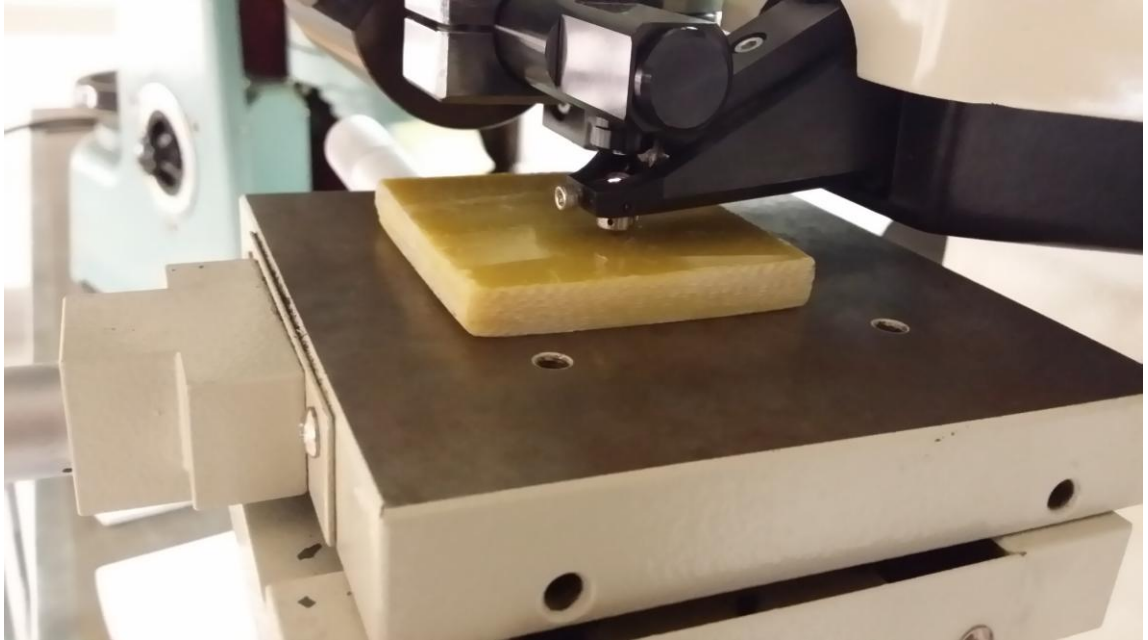
Kuva 28. Kovuuskoekappaleen mitoitus

Kokeet suoritettiin Vickers-kovuuskoelaitteistolla, johon kuuluu mikroskooppi, kovuusmittauskärki sekä tietokone, joka laskee testaajan mittaaman painumajäljen perusteella materiaalin kovuusarvon.

Kovuuskokeessa koekappale aseteltiin kovuuskoelaitteiston mittausalustalle kuvan 29 mukaisesti. Laitteistosta valittiin tarvittavat parametrit eli käytettävä paino sekä pitoaika. Tässä kokeessa käytetty paino oli 5 kg ja kovuuskärjen pitoajaksi valittiin 10 s. Koe aloitettiin käyttämällä 10 kg massaa, mutta se todettiin heti ensimmäisen yrityksen jälkeen liian suureksi. Kovuusmittauskärjen jättämä jälki oli niin suuri, ettei se mahtunut mittauskärkien väliin. Kun massaksi valittiin 5 kg, mahtui kärjen jättämä jälki mittauskärkien väliin hyvin.

Kappaleen etäisyys säädettiin sellaiseksi, että kappale näkyi tarkasti mikroskoopin kautta. Tarkennuksen jälkeen mikroskoopin tilalle käännettiin kovuusmittauskärki ja kovuusmittaus aloitettiin valitsemalla kovuusmittausprosessi Vickers-kovuuskoelaitteistosta. Kovuusmittauskärki painui kappaleen pintaan 5 kg painolla ja tätä pidettiin yllä 10 s ajan. Sen jälkeen kovuusmittauskärki nousi pois kappaleen pinnasta. Mikroskooppi käännettiin kovuusmittauskärjen tilalle ja mitattiin kärjen painaman pyramidikuvion kärjestä kärkeen -mitat koneessa olevien mittaviivojen avulla. Näiden

mittojen perusteella kone lasi materiaalille kovuusarvon. Sekä teräs- että komposiittimateriaalille mitattiin 10 kovuusarvoa, jotta saataisiin muodostettua luotettava keskiarvo. Kokeen tulokset on esitetty kappaleessa 14.2.

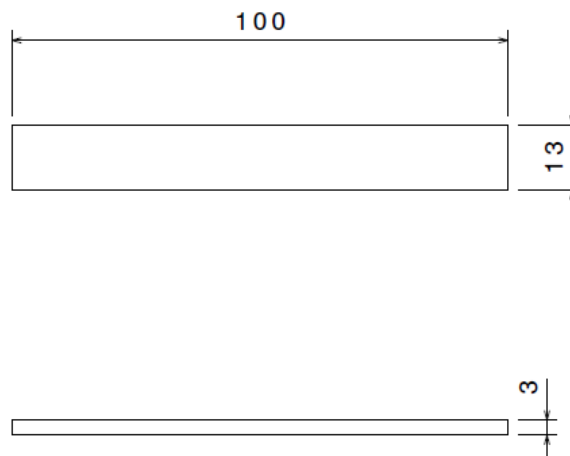


Kuva 29. Komposiittikappaleen kovuusmittaus Vickers-kovuuslaitteistolla

13.1.5 Iskukoe

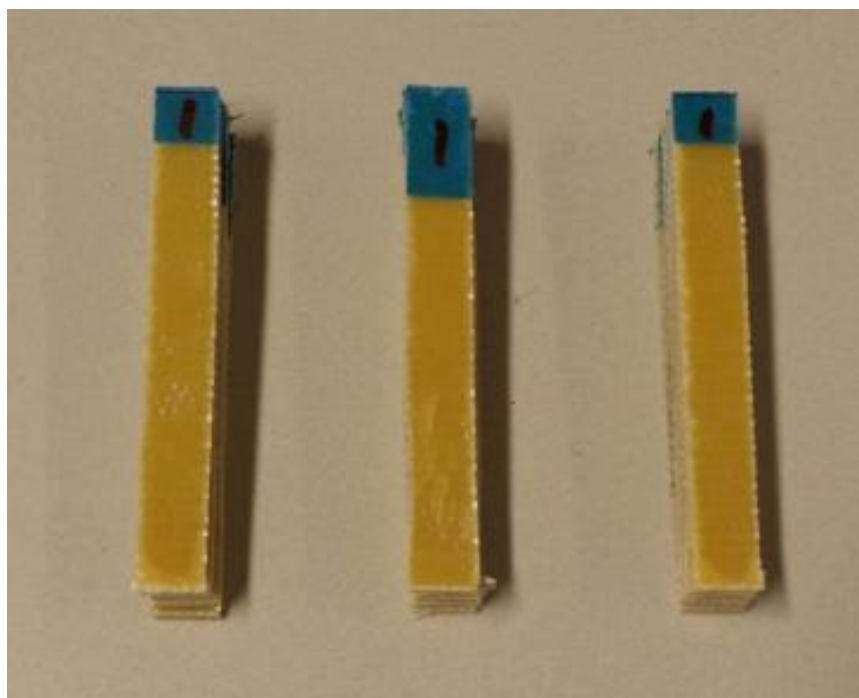
Iskukoe valittiin erääksi tässä työssä suoritettavaksi kokeeksi sen vuoksi, että haluttiin nähdä komposiitin käyttäytymisen muuttuminen iskun alaisena eri lämpötiloissa. Tässä työssä tehtävä koe mukailee standardia *ASTM D 6110 – Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics*. Iskukoelaitteistona käytettiin Charpy-iskukoevasaraa, jonka iskuenergia on 300 joulea.

Iskukoekappaleiden nimellispaksuus oli 3 mm, leveys 13 mm ja pituus 100 mm kuvan 30 mukaisesti. Kokeessa käytettäväksi toistomääräksi valikoitui standardissa suositeltu viiden toiston vähimmäismäärä. Kokeessa haluttiin testata komposiitin käyttäytymistä matalassa lämpötilassa, huoneenlämpötilassa sekä korotetussa lämpötilassa ja vertailla iskukäyttäytymistä niiden välillä.



Kuva 30. Iskukoekappaleen mitoitus

Iskukoe-kappaleet valmistettiin yhdestä Thermo Wrap -laminaattilevystä. Laminaattilevyn tuli kuusi kerrosta Thermo Wrap -lasikuiturullasta leikattuja suikaleita, jotka kyllästettiin Thermo Poxi -epoksihartsiin. Kovettuneesta komposiittilaminaattilevystä leikattiin kuvan 30 mittojen mukaisia iskukoesauvoja yhteensä viisitoista kappaletta. Kuvasta 31 nähdään valmiit iskukoe-kappaleet kolmessa pinossa. Jokaiseen iskukoe-kappaleeseen tehtiin keskelle kappaletta reunaan v-lovi, jonka syvyys ja leveys on 1 mm. Loven tarkoitus on toimia jännityksen keskittäjänä ja kohdistaa mahdollista murtumaa loven kohdalle.



Kuva 31. Komposiittilaminaatista leikattuja iskukoesauvoja päällekkäin kolmessa pinossa

Koe aloitettiin jäädyttämällä viisi koekappaletta $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilaan. Kun kappaleiden lämpötila oli laskenut $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$:seen, aloitettiin matalan lämpötilan iskukoe. Kuvan 32 Charpy -iskukoelaitteiston iskuvasara viritettiin ylös iskuasentoon ja iskuenergiaindikaattori nollattiin. Iskukoe-kappale asetettiin iskukoelustalle niin, että se oli tuettu molemmista päädyistään. Tämän jälkeen iskukoevasaran lukitus vapautettiin. Vapautuksen jälkeen iskukoevasara teki heilahdusliikkeen yläasennostaan iskien tukien varaan asetettua iskukoe-kappaletta keskelle. Koekappaleen absorboima iskuenergia luettiin iskuenergiaindikaattorista iskun jälkeen. Koe suoritettiin matalalle lämpötilalle yhteensä viisi kertaa.



Kuva 32. Charpy-iskukoelaitteisto

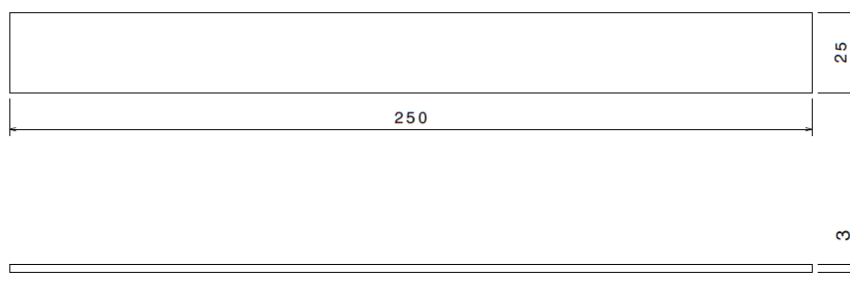
Huoneenlämpötilassa olevien iskukoe-kappaleiden lämpötila oli 19,5 °C kokeen alkaessa. Iskukoe suoritettiin myös näille kappaleille yhteensä viisi kertaa edellä kuvatun mukaisesti.

Korotetun lämpötilan koetta edelsi iskukoe-kappaleiden lämmittäminen lämpökäsittely-uunissa lämpötilaan 105 °C. Kun kappaleet olivat saavuttaneet halutun lämpötilan, korotetun lämpötilan iskukoe aloitettiin. Tämä koe suoritettiin myös viisi kertaa samalla tavalla kuin edellä mainitut iskukokeet.

Kokeissa ylös kirjatut energia-absorptiolukemat sekä valokuvat isketyistä kappaleista on esitetty kappaleessa 14.3.

13.1.6 Suolasumukoe ja vetokoe

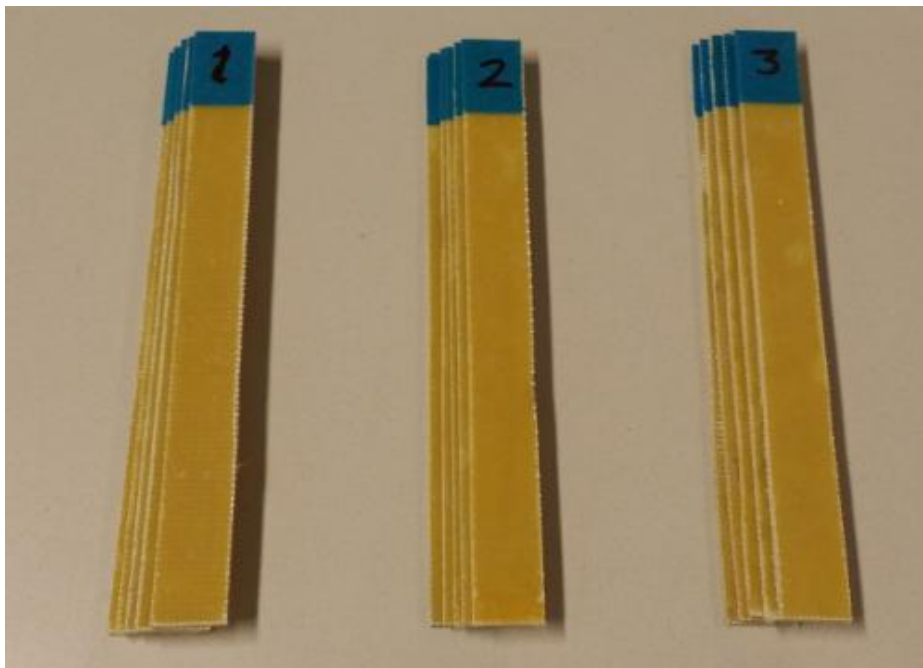
Tämän testin tarkoituksena oli tarkastella, miten komposiitin mekaaniset ominaisuudet muuttuvat, kun se altistetaan suolaiselle ja kostealle ympäristölle ja kuinka paljon komposiitti absorboi kosteutta altistettuna kyseiselle ympäristölle määrätyn ajanjakson ajaksi. Kokeessa selvitettiin myös, miten korotettu lämpötila vaikuttaa komposiitin veto-
lujuuteen. Suolasumuympäristölle sekä korotetulle lämpötilalle altistetuille sauvoille tehtiin vetokoe ja tuloksia verrattiin huoneenlämpötilassa olleiden, altistamattomien sauvojen vetokoetuloksiin. Standardi, jota kokeessa käytettiin pohjana, on *ASTM D3039 – Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. Koekappaleiden nimellimitat olivat 250 x 25 x 3 mm kuvan 33 mukaisesti.



Kuva 33. Suolasumu- ja vetokoekappaleen mitoitus

Vetokoekappaleet valmistettiin Thermo Wrapista kyllästämällä kuiturullasta leikattuja suikaleita Thermo Poxyl-epoksiin. Kerroksia laitettiin päällekkäin 6 kappaletta halutun paksuuden saavuttamiseksi. Laminaattilevyjä valmistettiin kolme kappaletta tarvittavilla mitoilla, joista vetokoekappaleet leikattiin mittojen mukaan. Valmiin laminaatin päälle asetettiin tasainen levy ja laminaatti jätettiin kovettumaan. Kovettumisen jälkeen lami-

naattilevyistä leikattiin mittojen mukaisia vetokoesauvoja yhteensä 15 kappaletta. Kuvassa 34 nähdään valmiita vetokoesauvoja.



Kuva 34. Valmiita vetokoesauvoja leikattuina kolmesta erillisestä laminaattilevystä

Laminaattilevyn numero, joista sauvat leikattiin, merkittiin sauvaan, jotta eri laminaattien väliset mahdolliset erot saataisiin minimoitua. Tämä varmistettiin siten, että kustakin laminaattilevystä leikatut sauvat jaettiin eri koesarjoihin niin, että kussakin sarjassa oli jokaisesta kolmesta laminaattilevystä leikattuja sauvoja tasaisesti.

Kun sauvat oli jaettu kolmeen koesarjaan, vietiin suolasumukoesarjan sauvat Metropolian pintakäsittelytekniikan toimipisteen laboratoriossa sijaitsevaan suolasumukaappiin kahdeksi viikoksi eli 336 tunniksi. Ennen kaappiin asettamista sauvojen massa punnittiin Precisa 600 D -puntarilla, jotta testauksen jälkeen voitaisiin todeta, onko niissä tapahtunut massan lisääntymistä. Massan punnitsemisen jälkeen Q-FOG -suolasumukaapin säiliöön valmistettiin 5 % suolaliuos. Tämän jälkeen sauvat laitettiin kaapin sisälle ja ohjauspaneelista asetettiin testausajaksi 336 tuntia.

Sauvojen annettiin olla jatkuvassa, neutraalissa suolasumutestauksessa kahden viikon ajan. Viikon kuluttua kokeen aloittamisesta sauvojen massa käytiin punnitsemassa ja kaappiin käytiin lisäämässä suolavesiliuosta. Koetta jatkettiin massan välipunnituksen

jälkeen. Kun yhteensä 336 tuntia oli kulunut, sauvat nostettiin kaapista pois ja niiden massa punnittiin jälleen.

Suolasumusauvoille sekä kymmenelle muulle sauvalle tehtiin lopuksi vetokoe eri olosuhteissa olleiden sauvojen keskinäiseksi vertailemiseksi.

13.2 Rikkomaton aineenkoetus

Rikkomattomassa aineenkoetuskokeessa testausmenetelmäksi valikoitui isotooppikuvaus. Isotooppikuvauskokeen tavoitteena on selvittää, onko komposiitilla korjattua putkiston osaa mahdollista tarkastaa NDT-menetelmillä. Koemenetelmäksi valittiin isotooppikuvaus, sillä se on hyvin yleinen putkistojen tarkastusmenetelmä. Isotooppikuvauksella on mahdollista havaita putken seinämässä olevat epäjatkuvuudet, esimerkiksi korroosion aiheuttama seinämän ohentuminen. Tarkoituksena oli selvittää, nähdäänkö komposiitin alta teräsputkessa olevat virheet.

Kokeessa lähdettiin liikkeelle isotooppikuvaukseen sopivan putkiston osan hankinnalla. Kappaleeksi valikoitui hiiliteräksinen 4” putkenpätkä, pituudeltaan 600 mm. Kuvattavaan kappaleeseen koneistettiin valmiiksi 10 virhettä kuvan 35 mukaisesti, joita isotooppikuvauksessa oli tarkoitus tarkastella. Kolme virheistä oli 40 mm pituisia, 2 mm leveydeltään ja syvyydeltään olevia viivamaisia naarmuja. Naarmut olivat putken pituussuuntaan nähden 0°, 45° ja 90° kulmassa. Loput seitsemän virhettä olivat reikiä, joista kaksi ulottui putken seinämän läpi. Neljä rei’istä oli muodoltaan suorina, kolme kartiomaisia. Reikien halkaisijat vaihtelivat 2 mm–10 mm välillä.



Kuva 35. Testiputki isotooppikuvausta varten lasikuulapuhalluksen jälkeen

Virheiden koneistuksen jälkeen putki oli valmis päällystettäväksi komposiitilla. Ennen päällystämistä putken pinta täytyi esikäsitellä riittävän tartunnan aikaansaamiseksi. Putken pinta käsiteltiin lasikuulapuhalluksella. Puhallukseen käytetyt lasikuulat olivat kooltaan 300–400 µm.

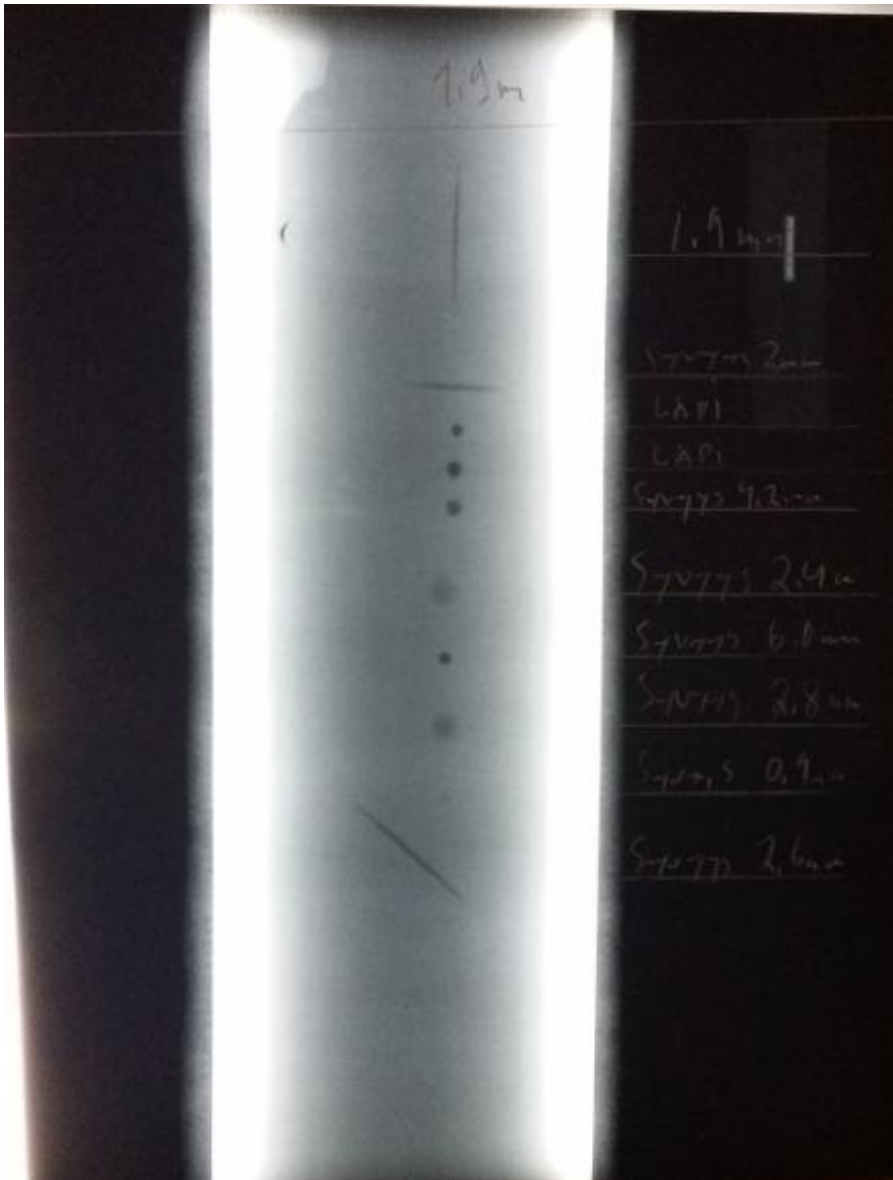
Komposiittimateriaaliksi kappaleeseen valittiin Thermo Wrap Inspectable. Thermo Wrap Inspectablessa käytetty epoksimateriaali tekee siitä helpommin tarkastettavan radiografisilla menetelmillä. [25; 31.]

Testiputken komposiittiin kääriminen aloitettiin puhdistamalla putken pinta asetonilla rasvan ja lian poistamiseksi. Putkeen tehdyt reiät ja viillot täytettiin täytehartsilla, jotta komposiitille saataisiin tasainen asennuspinta. Tämän jälkeen putken pintaan käärittiin Thermo Wrap Inspectable -komposiittia yhteensä kuusi kerrosta ja annettiin komposiitin kovettua (kuva 36).



Kuva 36. Testiputki päällystettynä komposiitilla

Valmis testiputkenpätkä tarkastettiin lopuksi isotooppikuvauslaitteistolla. Kuvat otettiin yhteensä kolmesta suunnasta: 0, 45 ja 90 asteen suunnassa putkeen koneistettuihin virheisiin nähden. Kuvassa 37 nähdään isotooppikuvauksesta kehitetty kuva, joka otettiin 0 asteen suunnassa. Kuvassa kaikkein ulommaisin haalea reuna putkessa on komposiittia, kirkkaan valkoinen osuus itse teräsputkea. Kuvasta voidaan selvästi nähdä virheet, jotka putkeen tehtiin ennen komposiitilla päällystämistä.



Kuva 37. Isotooppikuva testiputkesta 0 asteen suunnassa virheisiin nähden

Kehitettyjen isotooppitarkastuskuvien perusteella tarkastusasiiantuntijoiden taholta todettiin, ettei komposiitti teräsputken päällä estä teräsputken tarkastamista. Tehdyn isotooppikokeen perusteella voidaan todeta, että radiografista tarkastusmenetelmää voidaan käyttää komposiitilla vahvistetun teräsputken tarkastamiseen.

14 Aineenkoetuskokeiden tulokset

Aineenkoetuskokeiden tuloksia tarkasteltaessa on otettava huomioon mahdolliset virhetekijät, jotka aiheuttavat virhettä tuloksiin. Tällaisia tekijöitä ovat muun muassa mittauksesta tai kokeen suorittajasta aiheutuvat virheet, koekappaleiden mittojen vaihtelu, koekappaleen suoruuden vaihtelu vetokoneessa, kuitujen suoruuden vaihtelu suhteessa vedon suuntaan vetokokeessa, koekappaleiden kiinnityspinta-alan vaihtelu toistojen välillä, ilman jääminen koekappaleen sisälle valmistuksen aikana ja koekappaleen kiinnittymisen epäonnistuminen.

14.1 Teräs-komposiittivetokokeen tulokset

Tämän kokeen tuloksina saatiin maksimivoima, jolla teräs-komposiittikappaleen välinen liitos petti kussakin kappaleessa. Tarkoituksena oli havainnoida, miten pinnankarheus eri menetelmillä vaikuttaa komposiitin kiinnittyvyyteen teräksen pintaan. Tulokset on koottu taulukkoon 5, josta nähdään kunkin kappaleen pinnankarheus sekä vedon maksimivoima, jolla teräksen ja komposiitin välinen liitos petti. Ennen koetta oletuksena oli, että karhein pinnankarheus saisi aikaan lujimman liitoksen.

Tässä kokeessa karheimman kappalesarjan pinnankarheuskeskiarvona oli Ra-arvona 9,8. Taulukon 5 tuloksista nähdään, että suurimman pinnankarheuden omaavien kappaleiden maksimivoiman keskiarvo oli suurin, kuten oletettiin. Arviointia tehdessä on kuitenkin huomioitava, että kyseisen sarjan kappaleista vetokoe saatiin suoritettua vain neljälle kappaleelle. On mahdollista, että viides toisto olisi tuottanut pienemmän maksimivoiman, joka olisi laskenut maksimivoiman keskiarvoa kyseiselle sarjalle. Tosin vaikka viidennen toiston maksimivoima olisi ollut sama kuin kyseisen sarjan pienin maksimivoima ja näistä viidestä olisi otettu keskiarvo, olisi tämän sarjan maksimivoiman keskiarvo ollut edelleen suurin kaikista sarjoista. Voidaan siis todeta, että testissä käytetyistä pinnankarheuksista karheimmalla pinnalla saatiin aikaiseksi lujin liitos komposiitin ja hiilliteräksen välille.

Kun havainnoidaan muidenkin sarjojen pinnankarheuksien sekä maksimivoimien arvoja, voidaan todeta, ettei pienin maksimivoima ollutkaan pienimmällä pinnankarheuden arvolla, vaan pienin maksimivoiman keskiarvo tuli pinnankarheuden Ra-arvolla 6,8. Tämä pinnankarheus saatiin aikaan Safety Tool -työkalulla. Tuloksista ei siis voi vetää

suoraa korrelaatiota pinnankarheuden ja liitoslujuuden välille. Voidaan vain todeta, että kokeen tuloksien perusteella näistä kolmesta pinnankarhennusmenetelmästä suositeltavin liitoslujuuden kannalta on Bristle Blaster, jolla saatiin aikaan karhein ja samalla komposiitin tarttumiselle otollisin pinnankarheus.

Kokeessa virhettä saattoivat aiheuttaa kappaleiden suoruuden poikkeamat vetokoneen leukojen välissä, pitopinta-alan vaihtelu, liitospinta-alan vaihtelu, kappaleiden mahdollinen luisuminen vetokoneen leukojen välissä sekä komposiittilaminaatin kerrosten suoruuden poikkeaminen valmistusvaiheessa.

Tulokset olivat odotetun mukaisia siltä osin, että suurimmalla pinnankarheudella saatiin suurin liitoslujuus teräksen ja komposiitin välille. Odottamatonta oli se, että pienimmällä pinnankarheuden arvolla ei tullut pienintä liitoksen pettämisen maksimivoiman arvoa. Tuloksista voidaan todeta, että Bristle Blasterilla saadaan aikaan hyvä liitoslujuus ja sopiva pinnankarheus, joka sijoittuu juuri komposiittikorjauksille suositellulle pinnankarheusalueelle.

Taulukko 5. Teräs-komposiittivetokokeen tulokset ja kappaleiden pinnankarheudet

Kappale	Karhennustyökalu	Pinnankarheus [Ra]	Keskiarvo [Ra]	Vetokokeen maksimivoima [N]	Maksimivoiman keskiarvo [N]
1A	Bristle Blaster	8,72	9,8	Ei arvoa	4008
1B	Bristle Blaster	8,98		3661	
1C	Bristle Blaster	9,26		4341	
1D	Bristle Blaster	9,28		3766	
1E	Bristle Blaster	12,58		4262	
2A	Lasikuulapuhallus	2,7	2,7	3844	3755
2B	Lasikuulapuhallus	2,79		3792	
2C	Lasikuulapuhallus	2,53		3661	
2D	Lasikuulapuhallus	2,75		4367	
2E	Lasikuulapuhallus	2,63		3112	
3A	Safety Tool	4,46	6,8	3164	3452
3B	Safety Tool	9,12		3426	
3C	Safety Tool	5,68		3583	
3D	Safety Tool	5,96		3583	
3E	Safety Tool	8,7		3504	

14.2 Komposiitin ja teräksen kovuuskokeen tulokset

Kovuuskokeen tuloksina saatiin Vickers HV5 -kovuusarvot hiiliteräkselle ja Thermo Wrap -komposiitille. Kovuudet mitattiin yhteensä kymmenestä kohdasta molemmista materiaaleista. Kovuuskokeen tulokset on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Vickers-kovuuskokeen tulokset

Materiaali	Vickers-kovuus [HV5]	Keskiarvo [HV5]
Hiiliteräs	111,9	109
	109,4	
	109,6	
	103,0	
	107,9	
	106,6	
	110,3	
	115,3	
	105,3	
	111,8	
Thermo Wrap - komposiitti	21,1	19
	21,0	
	19,1	
	17,3	
	18,6	
	17,7	
	17,8	
	18,5	
	20,4	
	19,6	

Tuloksista voidaan todeta, että hiiliteräksen kovuus on noin kuusinkertainen epoksi-hartsisen lasikuitukomposiitin kovuuteen nähden. Tästä voidaan suuntaa antavasti arvioida, että komposiitin kuluminen on nopeampaa kuin teräksen, jos siihen kohdistuu hankausta tai muuta materiaalin pintaa kuluttavaa rasitusta sitä kovemmasta partikkelista.

Vickersin kovuuskoetta ei yleisesti käytetä muovien kovuuden mittaamiseen, vaan yleensä siihen käytetään Shore-kovuusmittausta. Vickers kuitenkin valikoitui testimenetelmäksi, sillä testissä haluttiin vertailla hiiliteräksen ja komposiitin kovuuksia keskenään.

Virhettä saattoi kovuuskokeessa aiheutua hartsikerroksen paksuuden vaihtelusta pinnassa sekä kokeen suorittajasta kovuusmittauskärjen jättämän jäljen mittauksessa. Ennen koetta haasteena odotettiin sitä, nähdäänkö mittauskärjen jälkeä komposiitista. Kokeessa havaittiin, että mittauskärjen jättämä jälki näkyi kyllä selvästi komposiitin pinnasta.

14.3 Iskukokeen tulokset

Iskukokeen tuloksina saatiin komposiittimateriaalin absorboima iskuenergia sekä valokuvat iskukokeen jälkeisistä kappaleista. Taulukossa 7 on esitetty eri lämpötiloissa komposiitti-iskusauvojen absorboimat iskuenergiat.

Taulukko 7. Iskusauvojen absorboima iskuenergia

Testikappale	Lämpötila [°C]	Iskuenergia indikaattorista [kgm]	Iskuenergia jouleina [J]	Keskiarvo [J]
C1	-16	0,70	13,7	13,1
C4		0,63	12,4	
C7		0,59	11,6	
C10		0,79	15,5	
C13		0,625	12,3	
C2	19,5	0,625	12,3	13,6
C5		0,45	8,8	
C8		0,625	12,3	
C11		1,09	21,4	
C14		0,68	13,3	
C3	105	0,49	9,6	11,7
C6		0,54	10,6	
C9		0,825	16,2	
C12		0,49	9,6	
C15		0,64	12,6	

Iskuenergia-absorption tuloksista nähdään, että eniten iskuenergiaa absorboivat huoneenlämpötilassa olleet iskukoe-kappaleet. Matalan lämpötilan iskukappaleet absorboivat hieman huoneenlämpötilassa olleita vähemmän iskuenergiaa. Tätä suurempi ero absorptiossa nähdään huoneenlämpötilassa ja matalassa lämpötilassa iskettyjen ja korotetussa lämpötilassa iskettyjen kappaleiden välillä siten, että korotetun lämpötilan kappaleet absorboivat kaikkein vähiten iskuenergiaa.

Ero oli silmännähtävissä kappaleiden muodonmuutoksissa, kuten kuvasta 34 nähdään. Kuvassa 38 vasemman pystyrivin viisi iskukoe kappaletta olivat $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa, keskimmäisen pystyrivin viisi kappaletta olivat $19,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa ja oikean pystyrivin viisi kappaletta olivat $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa iskukokeen aikana. Kuvasta selvästi nähdään, että korotettu lämpötila vaikutti iskukokeessa kappaleisiin niin, että ne muuttivat muotoaan eniten. Yksikään kokeessa olleista sauvoista ei mennyt kokonaan poikki, mutta korotetun lämpötilan sauvoista osa meni leveyssuunnassa noin puoleen väliin asti poikki.

On todettava, että komposiittisauvat muuttivat muotoaan odotettua vähemmän. Kun delaminaatiota ja hartsin säröilyä esiintyi kaikissa iskukoe kappaleissa, vain korkean lämpötilan kappaleissa oli visuaalisesti havaittavissa myös kuitujen katkeamista. Kestävyyttä iskun suunnassa kappaleille antoivat iskun suuntaiset kuidut, sillä Thermo Wrap -komposiitissa lasikuidut on punottu ristikkäin 0 ja 90 asteen suunnassa. Testikappaleet pyrittiin laminoimaan niin, että kuidut menisivät iskun suuntaan nähden suoraan ja kohtisuoraan kussakin kerroksessa.



Kuva 38. Iskukoe kappaleet iskukokeen jälkeen

Iskukokeessa haluttiin nähdä, miten iskuenergian absorptio ja iskukäyttäytyminen muuttuvat iskuenergian pysyessä vakiona ja testikappaleen lämpötilan muuttuessa. Testin tuloksien perusteella voidaan todeta, että lämpötilan korotus vaikuttaa selvästi iskukäyttäytymiseen siten, että lämpötilaltaan korkeammat kappaleet muuttivat muoto-

aan enemmän kuin lähellä huoneenlämpötilaa olevat kappaleet. Matalan lämpötilan kappaleet muuttivat muotoaan lähes samalla tavalla kuin huoneenlämpötilassa olevat kappaleet. On mahdollista, että jos matalan lämpötilan testikappaleiden lämpötila olisi ollut vieläkin alhaisempi kuin tässä testissä käytetty lämpötila, olisi muodonmuutos voinut olla suurempi.

Virhettä ja vaihtelua testikappaleiden välillä on voinut aiheutua testin suorittajasta, kappaleen asettelusta iskualustalle, laminaattikerrosten asettelun vaihtelusta, joka taas on voinut aiheuttaa iskun suunnassa hieman erilaisia kokonaislujuuden arvoja sekä kappaleiden mittojen vaihtelevuudesta.

14.4 Suolasumukokeen ja vetokokeen tulokset

Vetokoetestikappaleet jaettiin kolmeen ryhmään taulukon 8 mukaisesti.

Taulukko 8. Vetosauvojen jako eri sarjoihin

Kappale	Laminaattilevy	Altistus
1A	1	Suolasumu
1B	1	Huoneenlämpö
1C	1	Korotettu lämpötila
1D	1	Suolasumu
1E	1	Huoneenlämpö
2A	2	Korotettu lämpötila
2B	2	Suolasumu
2C	2	Huoneenlämpö
2D	2	Korotettu lämpötila
2E	2	Suolasumu
3A	3	Huoneenlämpö
3B	3	Korotettu lämpötila
3C	3	Suolasumu
3D	3	Huoneenlämpö
3E	3	Korotettu lämpötila

Suolasumulle altistettavista kappaleista punnittiin massa ennen ja jälkeen altistuksen taulukon 9 mukaisesti. Ennen välipunnitusta ja punnitusta altistuksen jälkeen sauvat pyyhittiin sauvojen pinnalle tiivistyneestä kosteudesta. Tuloksia arvioitaessa on huomioitava se, että kosteus on päässyt imeytymään sauvoihin myös sauvojen leikattujen reunojen kautta. Käytännön komposiittikorjauksessa tällaista avonaista reunaa ei korjauksiin jää, jolloin kosteutta ei pääse imeytymään reunojen kautta.

Taulukko 9. Suolasumulle altistettujen kappaleiden kosteuspitoisuudet

Kappale	Massa ennen altistusta 3.3.2016 [g]	Massa välipunnituksessa 10.3.2016 [g]	Massa altistusjakson päätyttyä 17.3.2016 [g]	Kosteuspitoisuus välipunnituksessa [%]	Kosteuspitoisuus altistusjakson päätyttyä [%]
1A	35,4	35,7	36,4	0,8	2,8
2E	31,5	32	32,4	1,6	2,9
1D	29,7	30,3	30,5	2,0	2,7
3C	27,7	28,2	28,5	1,8	2,9
2B	28,3	28,9	29,1	2,1	2,8

Kosteuspitoisuus ilmaisee taulukossa 9 sen, kuinka paljon kosteutta kappaleessa on verrattuna alkutilanteeseen. Kosteuspitoisuus on laskettu massan kasvun perusteella. Todellisessa komposiittikorjauksessa komposiitin reuna ei jää samalla tavalla näkyviin kuin kokeen kappaleissa, jolloin kosteuden imeytyminenkin on paljon pienempää. Suurin osa kosteudesta pääsee imeytymään juuri avonaisten reunojen kautta.

Vetokoeosuudessa sekä suolasumualtistetuille sauvoille että kymmenelle muulle sauvalle suoritettiin vetokoe Wolpert-vetokoneella. Tavoitteena oli selvittää eri olosuhteille altistettujen sauvojen keskinäisiä eroavaisuuksia vetokokeen tuloksien perusteella. Kokeessa testattiin yhteensä viittätoista sauvaa, joista viisi oli ollut 336 tuntia suolasumukaapissa, viisi oli ollut huoneenlämpötilassa ja loput viisi altistettiin 30 minuutiksi 108 °C lämpötilaan juuri ennen vetokoetta. Komposiittisauvojen vetokokeen tulokset on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. Vetokokeen tulokset komposiittisauvoille

Kappale	Altistus	Maksimijännitys [MPa]	Keskiarvo maksimijännityksestä [MPa]
1A	Suolasumu	280	278
1D	Suolasumu	297	
2B	Suolasumu	300	
2E	Suolasumu	281	
3C	Suolasumu	230	
1B	Lämpötila 19,5 °C	200	236
1E	Lämpötila 19,5 °C	210	
2C	Lämpötila 19,5 °C	297	
3A	Lämpötila 19,5 °C	229	
3D	Lämpötila 19,5 °C	247	
1C	Lämpötila 108 °C	284	300
2A	Lämpötila 108 °C	345	
2D	Lämpötila 108 °C	305	
3B	Lämpötila 108 °C	283	
3E	Lämpötila 108 °C	283	

Taulukosta 10 nähdään, että jännityksen arvot vaihtelivat suuresti sarjojen sisällä. Keskiarvojen perusteella suurimman jännityksen kestäivät ennen vetoa 30 minuutiksi 108 °C lämpötilalle altistetut sauvat, toiseksi suurimman 336 tuntia 5 % suolasumuliuoksessa ja 35 °C lämpötilassa olleet sauvat ja vähiten kestäivät huoneenlämpötilassa säilytetyt sauvat. Jännitystulokset eivät olleet odotusten mukaisia. Oletus oli, että huoneenlämpötilassa olleet sauvat olisivat kestäneet eniten jännitystä. Maksimijännityksen arvojen suuri vaihtelu voi johtua muun muassa siitä, että vetojen välillä oli keskinäisiä eroja vetokokeen leukojen puristusvoimassa, sauvojen asettelussa vetokoneeseen ja kappaleiden liukumisessa vetokoneen leukojen välissä. Tämän lisäksi vetosauvojen välillä virhettä ja tuloksien vaihtelua voivat aiheuttaa erot vetosauvojen todellisissa mitoissa, huokoisuuserot, laminointivaiheessa kerrosten välisien suuntauksien erot, sauvojen laminaatista leikkaamisessa syntyneet erot ja mahdolliset virheet sekä sauvojen tasomaisuuden erot.

Komposiittien vetokokeen tarkoituksena oli vertailla eri olosuhteille altistettujen sauvojen tuloksia keskenään. Tuloksia ei tule vertailla standardin ASTM D 3039 mukaisesti tehtyjen kokeiden tuloksien kanssa, sillä kyseistä standardia käytettiin tässä kokeessa vain suuntaa antavana pohjana kokeelle. Täten tulosten vertailu on mielekästä vain tämän kokeen eri olosuhteille altistettujen sauvojen kesken, mikä oli kokeen tarkoituksenakin.

Mielenkiintoisimmat erot nähtiin sarjojen välillä siinä, että vaurioitumistavat olivat sarjojen sisällä hyvin samantyyliisiä, mutta sarjojen välillä erilaisia. Vaurioitumistavat sauvoissa voidaan nähdä kuvasta 39, jossa vasemman laidan vaakarivin viisi sauvaa olivat ensimmäistä sarjaa eli suolasumualetistettuja, keskimmäisen vaakarivin viisi sauvaa olivat 19,5 °C lämpötilassa ja oikean laidan vaakarivin viisi sauvaa olivat olleet 108 °C lämpötilassa 30 minuutin ajan juuri ennen vetoa.



Kuva 39. Komposiittisauvat vetokokeen jälkeen

Kuvasta 39 nähdään, että vasemman laidan suolasumusauvat hajosivat lähes yhtenäisellä tavalla, huoneenlämpötilassa olleet kuvan keskellä olevat sauvat hajosivat kerrosten välisellä delaminaatiolla, matriisin voimakkaalla irtoilulla sekä kuitujen katkeilulla sauvan reunasta ja kuvan oikean laidan korotetun lämpötilan sauvat hajosivat joko katkeamalla vetokoneen leukojen läheltä kokonaan tai vaurioitumalla 45 asteen kulmassa leukojen läheltä. Taulukoihin 11, 12 ja 13 on koottu sauvakohtaisesti vaurioitumistyyppit, joilla sauvat vaurioituivat vetokokeessa.

Taulukossa 11 on selostettu 336 tuntia suolasumulle altistettujen sauvojen vauriotyypit.

Taulukko 11. Suolasumusauvojen vauriotyypit

Kappale	Altistus	Vauriotyyppi
1A	Suolasumu 336 h	Kuitujen katkeilu pitkittäin reunassa, 45 asteen kulmassa sauvan keskellä kuitujen katkeilua ja matriisin irtoilua
1D	Suolasumu 336 h	45 asteen kulmassa ylhäällä lähellä leukaa kuitujen katkeilua ja matriisin irtoilua
2B	Suolasumu 336 h	Vaakatasossa alhaalta kiinnitysleuan läheltä kuitujen katkeilua ja matriisin irtoilua
2E	Suolasumu 336 h	Muutama kuitu irtoillut pitkittäin reunassa, alhaalla kiinnitysleuan lähellä 45 asteen kulmassa kuitujen katkeilua ja matriisin irtoilua
3C	Suolasumu 336 h	Päällimmäisen kuitukerroksen delaminaatiota sauvan yläpäästä puoleen väliin

Taulukossa 12 on selostettu 19,5 °C lämpötilan sauvojen vauriotyypit.

Taulukko 12. Huoneenlämpöisten sauvojen vauriotyypit

Kappale	Altistus	Vauriotyyppi
1B	Lämpötila 19,5 °C	Delaminaatiota kerrosten välissä, kuitujen katkeilua reunassa pitkittäin, päällymmäinen kuitukerros katki vaakatasossa kiinnitysleuan läheltä, matriisin irtoilua
1E	Lämpötila 19,5 °C	Delaminaatiota kerrosten välissä, kuitujen katkeilua reunassa pitkittäin, matriisin irtoilua
2C	Lämpötila 19,5 °C	Delaminaatiota kerrosten välissä, kuitujen katkeilua reunassa pitkittäin, päällymmäinen kuitukerros katki vaakatasossa kiinnitysleuan läheltä, matriisin irtoilua
3A	Lämpötila 19,5 °C	Delaminaatiota kerrosten välissä, kuitujen katkeilua reunassa pitkittäin, päällymmäinen kuitukerros katki vaakatasossa kiinnitysleuan läheltä, matriisin irtoilua
3D	Lämpötila 19,5 °C	Delaminaatiota kerrosten välissä, kuitujen katkeilua reunassa pitkittäin, matriisin irtoilua

Taulukossa 13 on selostettu 108 °C lämpötilan sauvojen vauriotyypit.

Taulukko 13. Korotetun lämpötilan vauriotyypit

Kappale	Altistus	Vauriotyyppi
1C	Lämpötila 108 °C	45 asteen kulmassa kuituja katki kiinnitysleuan läheltä
2A	Lämpötila 108 °C	45 asteen kulmassa kuituja katki kiinnitysleuan läheltä
2D	Lämpötila 108 °C	Sauva kahteen osaan ylhäältä läheltä kiinnitysleukaa vaakatasossa
3B	Lämpötila 108 °C	45 asteen kulmassa kuituja katki kiinnitysleuan läheltä
3E	Lämpötila 108 °C	Sauva kahteen osaan alhaalta läheltä kiinnitysleukaa vaakatasossa

Kosteassa ympäristössä komposiitin hartsimateriaali voi absorboida itseensä vettä. Komposiittikorjauksessa komposiittiin ei jää avonaisia reunoja, jolloin kosteuden imeytyminen on paljon hitaampaa kuin tässä työssä tehdyssä kokeessa. Suolasumutestin jälkeinen vetokoe altistetuille ja altistamattomille komposiittisauvoille ei osoittanut havaittavaa heikentymistä suolasumualtistetuissa kappaleissa maksimijännityksen perusteella, sillä vetokokeiden tuloksissa oli muista tekijöistä johtuvaa vaihtelua hyvin paljon. Sen sijaan suolasumualtistettujen sauvojen massa kasvoi hieman altistuksen aikana, sillä kosteutta pääsi absorboitumaan komposiittilaminaatin leikattujen reunojen kautta kappaleeseen. Altistaminen kostealle ja suolaiselle ympäristölle vaikutti komposiittikappaleiden vaurioitumiskäyttäytymiseen edellä esitettyjen tuloksien mukaisesti.

Lämpötilan vaikutusta komposiitin lujuuteen pyrittiin myös selvittämään ja saatujen maksimijännitysten tuloksien perusteella on haasteellista vetää johtopäätöksiä, sillä tulokset poikkesivat toisistaan hyvin paljon, mikä johtui todennäköisesti monesta eri virhettä aiheuttavasta tekijästä. Jotta lämpötilan vaikutuksesta aiheutuvat erot huomattaisiin, olisi suositeltavaa järjestää uusintakoe pienemmillä kappaleiden välisillä mittaja asetteluvaihteluilla ja altistaa kappaleet pidemmäksi ajaksi korotetulle lämpötilalle. Kuten suolasumukappaleiden, myös korotetun lämpötilan kappaleiden vaurioitumiskäyttäytyminen oli kyllä selvästi erilainen kuin huoneenlämpötilaisilla vertailukappaleilla. Korotetun lämpötilan sarja oli myös sarjoista ainoa, jossa vetosauvoja meni kokonaan poikki.

15 Päätelmät

Komposiittikorjauksia on tehty maailmalla paljon, ja esimerkiksi Neptune Research Inc:llä on kolmen vuosikymmenen kokemus komposiittikorjauksista. Komposiittimateriaalit ovat kehittyneet korjauksista saatujen kokemusten myötä, ja menetelmää käytetäänkin maailmalla yleisesti useissa petrokemian alan yrityksissä tilapäiskorjauksiin.

Kun uuden korjausmenetelmän käyttöönottoa harkitaan yrityksessä, on siitä hyvä saada käytännön kokemuksia yrityksen sisällä. Aluksi menetelmää on suositeltavaa kokeilla matalan riskin kohteissa. Jos kokemukset ovat hyviä, on todennäköistä, että komposiittikorjauksien käyttöä voidaan laajentaa useampiin kohteisiin. Useat referenssit eri laatuista kohteista antavat myös tietoa menetelmän käyttömahdollisuuksista.

Korjausta suunniteltaessa on valittava käytössä olevista komposiittimateriaaleista kulloisellekin kohteelle ominaisuuksiltaan parhaiten soveltuva. Korjattavan kohteen pinnan esikäsitteleminen ennen komposiittin käärimistä on ensiarvoisen tärkeää hyvän adheesioajan aikaansaamiseksi korjattavan kohteen ja komposiitin välille. Työssä tehty testi komposiitin ja teräksen välisen liitoksen testaamiseksi osoitti, että pinnankarhennus Bristle Blaster -työkalulla sai aikaan parhaimman liitoslujuuden testatuissa kappaleissa.

Komposiittikorjauksen elinkaaren hallintaa varten on korjaukselle suositeltavaa laatia korjauskohtainen tarkastusohjelma, jonka mukaan korjausta tarkastetaan säännöllisin väliajoin koko sen elinkaaren ajan. Tarkastusohjelma on laadittava korjausta suunniteltaessa komposiittikorjauksen koko kestoajan ajalle, jotta mahdolliset muutokset ja viat havaitaan ajoissa.

Komposiittikorjauksista on erittäin suositeltavaa laatia seurantalista samaan tapaan kuin massapantakorjauksista. Lista tulisi kirjata korjattu kohde, työtilausnumero, korjauspäivämäärä, kohteen sisältö sekä korjauksen suunniteltu kesto samaan tapaan kuin massapantakorjauksissakin. Seurantalistaa päivittämällä pysytään ajan tasalla alueella sijaitsevista komposiittikorjauksista. Tällä tavoin niistä on selvät suunnitelmat muun muassa korjausten poistoajankohdalle. Komposiittimateriaalilla korjattu kohde on myös syytä asettaa erityisvalvontaan korjauksen jälkeen.

Jos korjausta vaativa kohde täyttää lämpötila- ja painerajoitukset ja sisältää kemiallisesti komposiitin kanssa soveltuvaa nestettä tai kaasua, on komposiittimateriaalin käyttö tilapäisissä putkistokorjauksissa varteenotettava vaihtoehto.

Testit, joita komposiitille voi mahdollisissa jatkotutkimuksissa tehdä, ovat muun muassa painekoe komposiittikorjatulle putkelle, vetokoe pidemmällä altistusajalla korotetulle lämpötilalle, useammalle eri korotetulle lämpötilalle suoritettu vetokoe, useampia eri NDT-testimenetelmiä komposiittimateriaalille ja rikkovia aineenkoetustestauksia eri komposiittimateriaalien välillä. Testejä voitaisiin jatkotutkimuksissa toteuttaa myös asennettuina olleille komposiittikorjauksille sen jälkeen, kun niiden elinkaari korjauskohdeessa on päättynyt. Testeihin voisi sisältyä sekä ainetta rikkomattomia että myös rikkovia testauksia.

16 Yhteenveto

Tämän insinööriyön toimeksianto tuli Neste Oyj:ltä, tavoitteena tutkia komposiittimateriaalia ja -menetelmää sekä käytön mahdollisuuksia tilapäiskorjauksissa. Työssä perehdyttiin kuitulujitettujen polymeerikomposiittien ominaisuuksiin teoriassa. Tämän lisäksi korjausmenetelmä käytiin vaihe vaiheelta läpi suoralle putkelle. Myös käyrien, tahaarojen ja säiliöiden korjausmenetelmät selvitettiin. Korjausta varten tehtävät laskukaavat käytiin läpi. Työssä selvitettiin myös komposiittien kustannuksia, laatua ja tarkastusta.

Komposiittimateriaalille suoritettiin aineenkoetuskokeita. Niihin lukeutui vetokoe teräksen ja komposiitin väliselle liitokselle, kovuuskoe, iskukoe, vetokoe komposiittimateriaalille sekä ainetta rikkomaton isotooppikuvauskoe. Kokeiden tuloksia analysoitiin ja tehtiin päätelmiä materiaalin ominaisuuksista.

Työn tuloksena saatiin selvitys komposiittimateriaalista sekä komposiittikorjausmenetelmän toteuttamisesta vaihe vaiheelta. Komposiittimenetelmästä voidaan todeta, että sille on käyttöä muiden tilapäiskorjausmenetelmien rinnalla etenkin putkistojen vahvistuskorjauksissa.

Haasteita komposiitin käytölle asettaa joissakin korjauskohteissa vallitseva lämpötila, jonka ei tulisi missään olosuhteissa ylittää komposiittimateriaalille ilmoitettua maksimiraja-arvoa.

Uusien korjausmenetelmien tutkiminen on tärkeää, jotta näitä menetelmiä saataisiin otettua käyttöön vaihtoehtoisten, jo toimiviksi todettujen menetelmien rinnalle. Tulevaisuudessa komposiittimenetelmän käyttö tulee todennäköisesti laajentumaan, kun komposiittikorjauksista saadaan hyviä kokemuksia ja kun tieto menetelmästä leviää.

Lähteet

- 1 Neste Oyj. Verkkodokumentti. <<https://www.neste.com/fi/>> Luettu 7.1.2016.
- 2 Oy Composite Aspect Ab. Verkkodokumentti. <<http://www.compositeaspect.fi/fi/>> Luettu 30.12.2015.
- 3 Neptune Research Inc. Verkkodokumentti. <<http://www.neptuneresearch.com>> Luettu 20.1.2016.
- 4 Kunnossapidon perusteet. Verkkodokumentti. Opetushallitus ja kunnossapitoyhdistys ry. <<http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/perusteet.html>> Luettu 27.12.2015.
- 5 Temporary/permanent pipe repair – Guidelines. Verkkodokumentti. Health & Safety Executive. <<http://www.hse.gov.uk/research/otopdf/2001/oto01038.pdf>> Luettu 30.12.2015.
- 6 Selection of Pipe Repair Methods. Verkkodokumentti. Gas Technology Institute. <<http://ntl.bts.gov/lib/50000/50800/50840/FilGet7.pdf>> Luettu 24.2.2016.
- 7 Askola, Petri. Kunnossapitomestari, mekaaninen. Neste Oyj. Porvoo. Suulliset tiedonannot. 1–2/2016.
- 8 Suomi, Tommi. Aluevastaava, mekaaninen. Neste Oyj. Porvoo. Suullinen tiedonanto. 1/2016.
- 9 Toivonen, Sami. Kunnossapitomestari, mekaaninen. Neste Oyj. Porvoo. Suullinen tiedonanto. 2/2016.
- 10 Suomi, Tommi 2014: Massapantakorjaukset petrokemianalan kunnossapidossa. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Kone- ja tuotantotekniikka.
- 11 Paetau, Dennis. Composite Aspect Oy Ab. Sipoo. Suulliset tiedonannot. 1-3/2016.
- 12 Thermo Wrap Technical Overview. Sähköinen dokumentti. Neptune Research Inc. Luettu 15.2.2016.
- 13 Saarela Olli, Airasmaa Ilkka, Kokko Juha, Skrifvars Mikael & Komppa Veikko. Komposiittirakenteet. Helsinki: Hakapaino Oy, 2007.
- 14 Major, Grzegorz. Mechanical Engineer. Neptune Research Inc. Sähköpostikeskustelu. 2/2016.

- 15 Thermo Wrap. Verkkodokumentti. Neptune Research Inc.
<<http://www.neptuneresearch.com/product/thermo-wrap/>> Luettu 26.2.2016.
- 16 Composite Guard FP. Verkkodokumentti. Neptune Research Inc.
<<http://www.neptuneresearch.com/product/composite-guard-fp/>> Luettu 26.2.2016.
- 17 Syntho Glass XT Technical Overview. Sähköinen dokumentti. Neptune Research Inc. Luettu 29.2.2016.
- 18 Syntho Glass XT. Verkkodokumentti. Neptune Research Inc.
<<http://www.neptuneresearch.com/product/syntho-glass-xt/>> Luettu 29.2.2016.
- 19 Thermo Wrap Inspectable. Verkkodokumentti. Neptune Research Inc.
<<http://www.neptuneresearch.com/product/thermo-wrap-inspectable/>> Luettu 26.2.2016.
- 20 Composite Clamp Application Procedure. Sähköinen dokumentti. Neptune Research Inc. Luettu 29.2.2016.
- 21 NRI's procedures for wrapping tanks/blind pipes using Thermo-Wrap. Sähköinen dokumentti. Neptune Research Inc. Luettu 7.3.2016.
- 22 The American Society of Mechanical Engineers. 2011. ASME PCC-2-2011. Repair of Pressure Equipment and Piping. New York.
- 23 Composite Guard FP. Process Piping Rehabilitation & Fire Proofing. Verkkodokumentti. Neptune Research Inc.
<<http://neptuneresearch.com/map/map-files/CGFP%20CS%20Ref%20&%20Petro%20-%20Hydrogen%20Pipe%20Repair%20English.pdf>> Luettu 2.3.2016.
- 24 Suomen standardoimisliitto SFS. 2015. SFS-EN ISO 24817. Petroleum, petrochemical and natural gas industries. Composite repairs for pipework. Qualification and design, installation, testing and inspection.
- 25 Non-destructive Testing of Composite Materials. Verkkodokumentti. National Composites Network.
<<https://compositesuk.co.uk/system/files/documents/ndtofcomposites.pdf>> Luettu 26.2.2016.
- 26 Tapio, Antti. Aluevastaava, mekaaninen. Neste Oyj. Naantali. Suullinen tiedonanto. 2/2016.
- 27 Silvennoinen, Rauno. Laitetarkastaja. Neste Oyj. Porvoo. Suulliset tiedonannot. 1–3/2016.

- 28 Myyryläinen, Simo. Aluevastaava, mekaaninen. Neste Oyj. Porvoo. Sähköpostikeskustelu. 2/2016.
- 29 Safety Tools Allmet Product Catalogue. Sähköinen dokumentti. Safety Tools Allmet. Luettu 20.2.2016.
- 30 MBX Bristle Blaster Product Catalogue. Sähköinen dokumentti. Monti Tools Inc. Luettu 20.2.2016.
- 31 Kaczmarczyk, Krzysztof. Managing Director. Neptune Research Inc. Sähköpostikeskustelu. 2/2016.
- 32 Chemical Compatability Chart. Verkkodokumentti. Oy Composite Aspect Ab. <<http://www.compositeaspect.fi/sites/files/Chemical-Compatibility-Chart-9-13.pdf>> Luettu 7.1.2016.

NRI:n tuotteiden kemiallinen yhteensopivuus



QUALITY. RELIABILITY. INTEGRITY.

NRI EPOXIES: CHEMICAL COMPATIBILITY

Introduction

NRI's pre-impregnated and field-saturated composites are manufactured to restore, protect and reinforce pipes, pipeline components, and civil structures. Proper glass and/or carbon fiber product and binding resin selection are critical to provide the longest life, lowest lifecycle cost, best corrosion performance, and to minimize the risk failure in presence of chemical compounds in aggressive environments. NRI presents this compatibility chart to demonstrate that our systems are highly resistant to the most common aggressive corrosive chemicals.

Key

SS = Syntho-Steel
SPHC = Syntho-Poxy HC
SPOL = Syntho-Poxy OL
SPSS = Syntho-Poxy SS
LV = Subsea LV

SG = Syntho-Glass
XT = Syntho-Glass XT
VS = Viper-Skin
THW = Thermo-Wrap
THWCF = Thermo-Wrap CF

E = Excellent
G = Good
A = Acceptable
P = Poor

NR = Not Recommended
NE = Not Evaluated

Chemical	SS	SPHC	SPOL	SPSS	LV	SG	XT	VS	THW	THWCF
Acetic Acid 20%	G	NR	A	A	E	NE	E	E	A	NE
Acetone	E	NR	E	E	A	E	E	G	G	E
Ammonium Hydroxide 29%	E	A	NE	NE	G	E	E	A	E	E
Copper Sulfate	E	G	NE	NE	E	E	E	E	E	E
Diesel	E	E	E	E	E	E	E	G	E	E
Diethanolamine	E	G	NE	NE	E	E	E	G	E	E
Ethanol	E	NR	E	E	E	E	E	E	E	G
Ethylene Dichloride	A	NR	E	E	G	A	G	A	G	A
Gasoline	E	NR	E	E	E	E	G	G	E	G
Hydrochloric Acid, 40%	E	NR	E	E	E	E	E	E	G	E
Hydrofluoric Acid, 40%	NE	NE	NE	NE	NE	P	P	P	P	NE
Isohexane	G	E	NE	NE	E	E	E	E	E	E
Isopropyl Alcohol	G	E	E	E	E	E	G	E	E	G
Methanol	G	NR	E	E	G	E	E	E	E	E
Methyl Ethyl Ketone (2-butanone)	A	NR	E	E	G	G	G	A	G	E
NAPHTHA	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
Sodium Hydroxide (Caustic Soda)	E	E	E	E	E	G	E	E	G	E
Sulfuric Acid, 40%	E	A	E	E	E	G	E	G	E	E
Toluene	G	E	E	E	E	E	G	A	E	E
Water	E	A	E	E	E	E	E	E	E	E

Please contact us with any questions concerning a specific chemical that is not reflected on this table.

Prepared By:

Ruth Arias,
Chemical Engineer

Neptune Research Inc. (NRI) NRI[®], Syntho-Glass[®]XT is a registered trademark of NRI while Viper-Skin[™], Thermo-Wrap[™], Thermo-Wrap[™]CF, Syntho-Steel[™], Thermo-Poxy[™], Syntho-Poxy[™]HC, Syntho-Poxy[™]OL, Syntho-Poxy[™]SS, and Syntho-Subsea[™]LV are trademarks of NRI. NRI utilizes a process of continuous product improvement for all of our products. While we do strictly adhere to our product specifications, we routinely implement product improvements therefore the information contained in this report is for general information purposes only. Results shown above are based on standard laboratory tests and industry knowledge. While we endeavor to keep the information up to date and correct, we make no representations or warranties of any kind, express or implied. Therefore, please contact your local NRI distributor or office for the most current product specifications. NRI warrants the quality of this product when used according to directions. User shall determine suitability of product for use and assumes all risk. The seller will not accept liability for more than product replacement.

NRI Chemical Compatibility, Updated: 08/02/2013

3875 FISCAL COURT, SUITE #100 • RIVIERA BEACH, FL 33404 USA • 561.683.6992 • NEPTUNERESARCH.COM

NRI:n komposiittimateriaalien tuotetiedot

THERMO-WRAP™

COMPOSITE REPAIR SYSTEM FOR HIGH TEMPERATURE AND PROCESS PIPING



Description

Thermo-Wrap™ is a custom engineered composite system utilizing a high strength, bidirectional, woven fiberglass tape in conjunction with NRI's proprietary Thermo-Poxy™ epoxy system for the repair and restoration of pipes operating at elevated temperatures. This operator qualified engineered system was designed to conform to and recognized by ASME PCC-2, ASME B31, ISO TS24817, DOT, API, and CSA Z662 standards for nonmetallic reinforcing solutions, thus ensuring product application integrity. Thermo-Wrap is specifically designed for repair applications which require the composite to maintain the high design strengths in high temperature environments, while still curing under room temperature conditions.

Mechanical Properties

Test	Method	Temperature	Results
Tensile Strength	ASTM D3039	75°F (23°C)	101,500 psi (6,998 bar)
		300°F (149°C)	70,650 psi (4,871 bar)
Tensile Modulus	ASTM D3039	75°F (23°C)	4,480 ksi (308,885 bar)
		300°F (149°C)	3,570 ksi (246,142 bar)
Flexural Strength	ASTM D790	75°F (23°C)	121,700 psi (8,390 bar)
Flexural Modulus	ASTM D790	75°F (23°C)	4,180 ksi (288,200 bar)
Hardness, Shore D @ 75°F (24°C)	ASTM D2240	75°F (23°C)	90
In-Plane Shear Strength	ASTM D5379	75°F (23°C)	13,055 psi (900 bar)
Chord Shear Modulus	ASTM D5379	75°F (23°C)	629 ksi (43,368 bar)
Lap Shear (to steel)	ASTM D5868	75°F (23°C)	3,700 psi (255 bar)
CTE	ASTM E831	75°F (23°C)	6.79 µm/m°C
Heat Deflection Temperature (HDT)	ASTM D648	75°F (23°C)	>515°F (268°C)

©Neptune Research Inc. (NRI) NRI® is a registered trademark, while Thermo-Wrap™ and Thermo-Poxy™ are trademarks of NRI. NRI utilizes a process of continuous product improvement for all of our products. While we do strictly adhere to our products' specifications, we routinely implement product improvements. Therefore, please contact your local NRI distributor or office for the most current product specifications. NRI warrants the quality of this product when used according to directions. Apply protective coatings per company standards. User shall determine suitability of product for use and assumes all risk. The seller will not accept liability for more than product replacement. THW DS 0214

Typical Applications

- Flare lines
- Steam piping
- Girth welds, elbows, tees
- Chemical processing lines
- Anywhere elevated temperatures are of concern or expected

Benefits

- High temperature rating with an ambient cured epoxy
- No heating or post-curing required
- Full factory engineering calculations, consultation, and support ensuring safe and successful repairs

Physical Properties

VOCs: None

Pot Life: 75 Minutes @ 75°F (24°C)

Working Time:

45 Minutes @ 75°F (24°C)

Gel Time:

Approx. 161 Minutes @ 70°F (21°C)

Cure Time:

Approx. 18 Hours @ 75°F (24°C)

Service Temperature:

Max: Up to 300°F (149°C)

Application Temperature:

50° to 200°F (5° to 93°C)

Solids Content: 100%

Shelf Life: 12 Months with recommended storage methods



NRI
Innovative Composite Solutions



NEPTUNERESEARCH.COM

3875 FISCAL COURT, SUITE #100 • RIVIERA BEACH, FL 33404 USA • 561.683.6992

NRI:n komposiittimateriaalien tuotetiedot

THERMO-WRAP™ CF
 CARBON FIBER COMPOSITE REPAIR SYSTEM
 FOR HIGH TEMPERATURE & PROCESS PIPING

THERMO-WRAP™ CF

CARBON FIBER COMPOSITE REPAIR SYSTEM FOR HIGH TEMPERATURE & PROCESS PIPING

Description Thermo-Wrap™CF is a custom-engineered, carbon-fiber composite system utilizing a high strength, biaxial hybrid carbon and glass fiber in conjunction with NRI's proprietary Thermo-Poxy™ epoxy system for the repair and restoration of pipes, structural integrity, and corrosion protection. A unique advantage is that Thermo-Wrap CF is designed to maintain high tensile strength at high temperatures.

Typical Applications

- Flare lines, blow down lines, steam piping, chemical processing lines
- Girth welds, elbows, tees
- High temperature environments

Benefits

- High temperature rating with an ambient-cured epoxy
- No heating or post-curing required
- High tensile strength and stiffness vs glass systems
- Design conforms to ASME PCC-2, ASME B31, ISO TS24817, DOT, API, and CSA Z662 standards for nonmetallic reinforcing and repair

Coverage Sold based on square foot of coverage

Thickness As determined by NRI engineering calculations

Mixing & Mix Ratio Power mix Part A, then combine with Part B and power mix. Do not mix partial kits. Resin to hardener 100:27 by volume.

Pot Life 75 minutes @ 75°F (24°C), less at higher temperatures

Limitations

- Epoxy application temperature: minimum of 50°F (10°C) and maximum of 200° (93°C)
- Maximum allowable sustained humidity must be less than 90%

Related Products The following products are system components of the Thermo-Wrap CF system:

- Thermo-Fill HC
- Thermo-Poxy
- Syntho-Coat or Syntho-Glass UV

Composite Laminate Properties	Property	Circumferential Direction	Axial Direction
	Tensile Modulus	8 Msi	2.29 Msi (15.8 GPa)
	Thermal Expansion Coefficient	3.2ppm/°F	10.31 ppm/°F
	Property	Typical Test Value	
	Laminate Thickness	0.018 "	
	Poisson Ratio	0.132	
	Shore D Hardness	90@ 75°F (24°C)	

Design Thermo-Wrap CF was designed to conform to ASME PCC-2, ASME B31, ISO TS24817, DOT, API, and CSA Z662 standards for nonmetallic reinforcing solutions. Consult NRI Engineering for specified use.

NRI:n komposiittimateriaalien tuotetiedot

THERMO-WRAP™ INSPECTABLE
 INSPECTABLE COMPOSITE REPAIR SYSTEM
 FOR HIGH TEMPERATURE & PROCESS PIPING

THERMO-WRAP™ INSPECTABLE

INSPECTABLE COMPOSITE REPAIR SYSTEM

FOR HIGH TEMPERATURE & PROCESS PIPING

Description Thermo-Wrap™ Inspectable is a custom engineered composite repair system that utilizes high stiffness, non-crimped bi-directional fiberglass architecture in conjunction with NRI's patented Thermo-Poxy™ Inspectable epoxy system. Using common radiographic inspection methods, owners and operators have the ability to monitor the integrity of an "in-service" Thermo-Wrap Inspectable repair through the course of its intended design life. Thermo-Wrap is used to repair corroded or damaged piping with harsh chemical services and elevated temperatures.

Typical Applications

- Flare lines, blow down lines, steam piping, chemical processing lines
- Girth welds, elbows, tees
- High temperature environments

Benefits

- Inspectable via radiography
- High temperature rating with an ambient-cured epoxy
- Non-shielding
- Patented polymer inspection capability
- Design conforms to ASME PCC-2, ASME B31, ISO TS24817, DOT, API, and CSA Z662 standards for nonmetallic reinforcing and repair

Coverage Sold based on square foot of coverage required

Thickness As determined by NRI engineering calculations

Mixing & Mix Ratio Power mix Part A, then combine with Part B and power mix. Do not mix partial kits. Resin to hardener 5:1 by volume.

Pot Life 75 minutes @ 75°F (24°C), less at higher temperatures

Limitations

- Application temperature shall be a minimum of 50°F (10°C) and a recommended maximum of 280°F (138°C)
- Relative humidity must be 85% or below
- Pipe surface must be 5°F (-15°C) above dew point

Related Products The following products are system components of the Thermo-Wrap Inspectable system:

- Filler: Thermo-Fill™HT
- Primer / Saturant: Thermo-Poxy™ Inspectable
- UV Protection, if necessary: Syntho-Coat™ or Syntho-Glass®UV
- Compression Film

Composite Laminate Properties	Property	Circumferential Direction	Axial Direction
	Tensile Modulus	4.29 Msi (29.6 GPa)	2.29 Msi (15.8 GPa)
	Thermal Expansion Coefficient	5.72ppm/°F (10.3 ppm/°C)	8.41 ppm/°F (15.14 ppm/°C)
	Property	Typical Test Value	
	Laminate Thickness	0.027 " (0.69mm)	
	Poisson Ratio	0.132	
	Glass Transition Temperature	367°F (186°C)	
	Shear Modulus of Polymer	177 ksi (1.22 GPa)	
	Shore D Hardness	87	
	Energy Release Rate	2 in.lbf/in ² (350J/m ²)	

Design The Thermo-Wrap composite repair system was designed to conform to ASME PCC-2, ASME B31, ISO TS24817, DOT, API, and CSA Z662 standards for nonmetallic reinforcing solutions. Consult NRI Engineering for specified use.

NRI:n komposiittimateriaalien tuotetiedot

SYNTHO-GLASS® XT
 EXTREME STRENGTH, FIBERGLASS REPAIR SYSTEM

SYNTHO-GLASS® XT

EXTREME STRENGTH, FIBERGLASS COMPOSITE SYSTEM

Description Syntho-Glass®XT system is a unique pre-impregnated, bi-directional composite used to repair and reinforce both internal and external corrosion on pipes or structures. Our factory-saturated product ensures proper fiber-to-resin content ratios which are crucial to reliable performance.

Typical Applications

- Pipeline integrity
- Transmission and distribution pipe lines
- Oil and gas risers
- Girth welds on vessels and pipelines
- Straights, elbows, tees, and flanges
- Process piping: chemicals, oil, gases, water, and steam
- Atmospheric corrosion

Benefits

- Moisture-cured polyurethane resin reduces composite preparation time by over 50%
- Non-shielding
- Pre-saturation optimizes fiber-to-resin ration and provides a material with a constant strength property
- Can be applied to damp, sweating, or immersed surfaces
- No heating or post-curing required
- Can be applied to any geometry including, but not limited to elbows, Tees, and flanges
- Design conforms to ASME PCC-2, ASME B31, ISO TS24817, DOT, API, and CSA Z662 standards for nonmetallic reinforcing solutions

Theoretical Coverage As determined by NRI engineering calculations

Thickness As determined by NRI engineering calculations

Mixing & Mix Ratio No mixing required

Pot Life 20 minutes @ 75°F (24°C), less at higher temperatures

Limitations Application temperature: minimum of 40°F (4°C) and maximum of 150°F (66°C)
Maximum service temperature: 194°F (90°C)

Related Products The following products are system components of the Syntho-Glass XT system:

- Filler: Syntho-Poxy™HC, Syntho-Steel
- Anti-Corrosion Primer: Syntho-Subsea™LV Epoxy
- UV protection: Syntho-Coat or Syntho-Glass®UV
- Compression Film

Properties	Property	Circumferential Direction	Axial Direction
	Tensile Modulus	3.56 Msi (30.5 GPa)	1.96 Msi (15.8 GPa)
	Thermal Expansion Coefficient	5.40ppm/°F (10.3 ppm/°C)	29.00ppm/°F (15.14 ppm/°C)
	Property	Typical Test Values	
	Hardness, Shore D	83	
	Laminate Thickness	0.013	
	Poisson Ratio	0.133	
	Energy Release Rate	0.525	

Design Syntho-Glass XT was designed to conform to ASME PCC-2, ASME B31, ISO TS24817, DOT, API, and CSA Z662 standards for nonmetallic reinforcing solutions. Consult NRI Engineering for specified use.

NRI:n komposiittimateriaalien tuotetiedot

VIPER-SKIN™

CARBON FIBER COMPOSITE REINFORCEMENT SYSTEM

VIPER-SKIN™

CARBON FIBER COMPOSITE REINFORCEMENT SYSTEM

Description Viper-Skin™ is the first bi-axial, hybrid carbon and glass fiber polyurethane pre-impregnated system that blends the unsurpassed strength and stiffness of carbon with the ease and use of a moisture-cured, factory-saturated fiber.

Typical Applications

- Transmission and distribution pipelines
- Oil and gas risers
- Mechanical dents and defects
- Girth welds on vessels and pipelines
- Process piping: chemicals, oil, gases, water and steam

Benefits

- Moisture-cured polyurethane resin reduces composite preparation time by over 50%
- Factory-saturation optimizes fiber to resin ration and provides a material with a constant strength property
- Non-shielding
- Can be applied to damp, sweating, or immersed surfaces
- No heating or post-curing required
- Can be applied to any geometry including, but not limited to elbows, Tees, and flanges
- Design conforms to ASME PCC-2, ASME B31, ISO TS24817, DOT, API, and CSA Z662 standards for nonmetallic reinforcing solutions

Coverage As determined by NRI engineering calculations

Thickness As determined by NRI engineering calculations

Mixing & Mix Ratio No mixing required

Pot Life 20 minutes @ 75°F (24°C), less at higher temperatures

Limitations

- Application temperature: minimum of 32°F (0°C) and maximum of 150° (66°C)

Related Products The following products are system components of the Viper-Skin system:

- Load Transfer Epoxy: Syntho-Poxy™ HC Reinforcing
- Anti-Corrosion Primer: Syntho-Subsea™ LV Epoxy
- Insulating Glass Layer: Syntho-Glass®XT
- UV protection: Syntho-Coat or Syntho-Glass®UV
- Compression Film

Composite Laminate Properties	Property	Circumferential Direction	Axial Direction
	Tensile Modulus	8 Msi	2 Msi
	Thermal Expansion Coefficient	1.79 ppm/°F	13 ppm/°F
	Property	Typical Test Value	
	Laminate Thickness	0.018 "	
	Poisson Ratio	0.132	
	Shore D Hardness	83	

Design Viper-Skin was designed to conform to ASME PCC-2, ASME B31, ISO TS24817, DOT, API, and CSA Z662 standards for nonmetallic reinforcing solutions. Consult NRI Engineering for specified use.

Surface Preparation Surface preparation and profiling shall promote continuous intimate contact between the CFRP system and pipe by providing a clean, smooth, and circumferential surface. Surface preparation shall be in accordance with SSPC-SP1 "Solvent Cleaning" and SSPC-SP10 / NACE 2 "Near White Blast Cleaning" 1-3 mil surface roughness (25-75 microns). If an existing coating is present, roughen to degloss. The Viper-Skin composite repair system is a bond-critical composite repair system requiring a strong adhesive bond between the clean pipe and the Viper-Skin system.

Komposiittikorjauksen arviointilomake

Lomakkeen täyttäjän tiedot

Nimi:

Puhelinnumero:

Sähköpostiosoite:

Täyttöpäivämäärä:

Korjausyrityksen tiedot

Yhteyshenkilö:

Puhelinnumero:

Sähköpostiosoite:

Korjauksen yleistiedot

Hätäkorjaus:

Kyllä

Ei

Laskelmat saatava:

Samana päivänä

Muu päivä, milloin

Korjauksen toivottu kestoikä:

Toivottu aloituspvm:

Kohteen tila:

Ei-vuotava

Vuotava

Toiminnan kehittäminen/Toni Laurila

3.2.2016

Putkiston tiedot

Putkilinjan ID-tunniste:

Putkiston sijainti:

Putken nimellissuuruus:

Putken nimellisseinämäpaksuus:

Suunnittelupaine:

Suunnittelulämpötila:

Käyttöpaine:

Käyttölämpötila:

- Jatkuva
- Ajoittainen
- Syklinen

Jos lämpötilahuippuja, niiden maksimilämpötila ja kesto aika:

Putken pinnan lämpötila:

Putkessa kulkeva tuote:

Tuotteen pitoisuus:

Putken materiaali:

Putken muoto:

- Suora
- T-haara
- Käyrä
- Säiliö

Korjausolosuhteet

Paineettomaksi saattaminen korjauksen ajaksi:

- Kyllä
- Ei

Maksimiaika, jos voidaan saattaa paineettomaksi:

Voidaanko painetta alentaa korjauksen ajaksi:

- Kyllä
- Ei

Toiminnan kehittäminen/Toni Laurila

3.2.2016

Jos painetta voidaan alentaa, alennettu paine:

Voidaanko putki tyhjentää:

- Kyllä
- Ei

Onko putken pinta kuiva korjauksen aikana

- Kyllä
- Ei

Jos korjausalueen lähellä on esteitä, etäisyys niihin:

Esteen tyyppi

- Laippa
- Venttiili
- Seinämä
- Muu, mikä

Putken kannakointi

- Maanalainen
- Riippukannake
- Liukukannake
- Pukki
- Muu

Voidaanko kannakointia purkaa, jos korjauksen tiellä:

- Kyllä
- Ei

Vaikuttaako korjaukseen muita esteitä/olosuhteita:

Toiminnan kehittäminen/Toni Laurila

3.2.2016

Korjausalueen pinnankäsittely

Onko putki siinä kunnossa, mukaan lukien korjauskohta, että siihen voidaan käyttää yhtä seuraavista pinnankäsittelytavoista? Jos kyllä, merkitse mitä tapaa käytetään:

- SSPC-SP11 Power Tool Cleaning to Bare Metal
- SSPC-SP5/NACE 1 White Metal Blast Cleaning
- SSPC-SP10/NACE 2 Near White Blast Cleaning
- SSPC-SP3 Power Tool Cleaning

Jos näitä ei voida käyttää, kerro miksi:

Vaurion/vaurioiden kuvaileminen

Vaurion aksiaalinen pituus:

Vaurion ympärysmittan pituus:

Toivottu aksiaalipituus korjaukselle:

Onko vaurio, tai korroosio:

- Sisäinen
- Ulkoinen

Kuvaile vauriota:

Seinämän ohentuma (tai jäljellä oleva seinämäpaksuus):

Jos putki vuotaa, kerro asennetun vuodonestopannan mitat:

Toiminnan kehittäminen/Toni Laurila

3.2.2016

Vaurio		
Sijainti (esim. klo 3-9)		
Käytettävissä oleva esteetön pituus korjaukselle		
Vaurion koko (pituus x leveys)		
Vaurion syvyys		
Vaurion syy (mekaaninen, sisäinen tai ulkoinen korroosio)		
Vaurion tyyppi (korroosio, ohentuma)		
Vuotava/ei-vuotava		
Jos vuotava, vuodon tyyppi (puhalta-va, tiputtava)		

Toiminnan kehittäminen/Toni Laurila

3.2.2016

Piirrä seuraavaan luonnostelmaan kaikki vauriot, joihin korjausta tarvitaan:

Piirrä kuvaan vaurio, putkiston haarakohdat sekä mahdolliset esteet ja etäisyydet niihin.



Edellä olevan kuvan lisäksi liitä mukaan mahdollisia valokuvia, piirustuksia ja dokumentteja, jotka auttavat korjauksen suunnittelemisessa.

Muuta huomioitavaa korjauksessa (esimerkiksi palosuojavaatimukset):