

Lauri Sipilä

PINTAKÄSITTELYN
VAIKUTUS ALUMIININ
JA HARTSIN LIITOKSESSA

Opinnäytetyö
Materiaali- ja pintakäsittelytekniikka


Elokuu 2011




MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU

Mikkeli University of Applied Sciences

KUVAILULEHTI

| | | | |
|--|--|-----------------------|------------|
|  MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU Mikkeli University of Applied Sciences | Opinnäytetyön päivämäärä 16.8.2011 | | |
| Tekijä(t) Lauri Sipilä | Koulutusohjelma ja suuntautuminen Materiaali- ja pintakäsittelytekniikka | | |
| Nimeke Pintakäsittelyn vaikutus alumiinin ja hartsin liitoksessa | | | |
| Tiivistelmä <p>Opinnäytetyössä tutkittiin eri pintakäsittelyjen vaikutusta alumiinin ja hartsin väliseen liitokseen. Tutkitut pintakäsittelyt olivat anodisointi, eri asteiset hionnat, sekä alumiinin käsittely kiinnitysaineella. Työssä käytetyt kiinnitysaineet olivat silaanipohjaisia. Vertailukohtana työssä oli käsittelemätön alumiinipinta ja käytettynä hartsina kaikissa tapauksissa sama polyesterihartsi. Tavoitteena oli tutkia toimeksiantajan tuotannossa käytettävällä esikäsittelyllä saatava liitoslujuus, sekä tutkia mahdollisia vaihtoehtoisia käsittelyjä, joilla päästäisiin samaan lujuuteen vähemmällä työmäärällä.</p> <p>Työssä saatiin selvitettyä käytössä olevalla menetelmällä, joka on karhennus hiontalaikalla, saavutettava lujuusaste, sekä pinnankarheuden Ra-arvo, jonka yläpuolella karhennus ei enää merkittävästi lisää liitoksen lujuutta. Tämä arvo on suoritettujen mittausten perusteella noin 1,5 µm. Työssä tutkitut menetelmät tuskin antavat toimeksiantajalle suuria tuotannollisia hyötyjä verrattuna käytettävään pintakäsittelyyn. Testeissä kevyemmällä hionnalla kuitenkin päästiin lujuudellisesti lähes samalle tasolle kuin hiontalaikalla karhentamisella.</p> | | | |
| Asiasanat (avainsanat) alumiini, hartsit, pintakäsittely, liittäminen | | | |
| Sivumäärä 17 + 4 | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">Kieli suomi</td> <td style="width: 50%;">URN</td> </tr> </table> | Kieli suomi | URN |
| Kieli suomi | URN | | |
| Huomautus (huomautukset liitteistä) | | | |
| Ohjaavan opettajan nimi Tapio Lepistö | Opinnäytetyön toimeksiantaja River Plast Oy | | |

DESCRIPTION

| | | |
|---|--|---|
|  MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU Mikkeli University of Applied Sciences | | Date of the bachelor's thesis 16.8.2011 |
| Author(s) Lauri Sipilä | Degree programme and option Material engineering | |
| Name of the bachelor's thesis The effect of surface treatment in aluminium resin bond | | |
| Abstract <p>The purpose of the bachelor thesis was to examine how different kind of surface treatments would effect to the bond strength of aluminium and polyester resin. Methods that were tested in this work were different grades of roughening the surface, anodizing and coupling agent treatment. For coupling agent, two different silanes were used. Roughening was done with grinding papers P40 and P120 and also with abrasive wheel. Anodized samples were left without closing treatment at the end of the anodizing process.</p> <p>Roughening gave considerable improvement to the bond strength as did one of the silanes. With the roughened surfaces an Ra value of approximately 1,5 µm was found to be the point above which further roughening did improve the bond strength very little in relation to the increase of the Ra value. With anodizing and the other silane only little improvement in bond strength was observed.</p> <p>One of the goals of this thesis was to improve the manufacturing process currently used in River Plast company, by finding less labour intensive pretreatment for aluminium without decrease in bond strength of the product. Although some of the tested methods gave approximately the same strength as the abrasive wheel treatment which is in use currently. None of them gave notable reduction in labour intensity.</p> | | |
| Subject headings, (keywords) aluminium, resin, surface treatment, bonding, joining | | |
| Pages 17 + 4 | Language Finnish | URN |
| Remarks, notes on appendices | | |
| Tutor Tapio Lepistö | Bachelor's thesis assigned by River Plast Oy | |

SISÄLTÖ

| | | |
|-----|---|----|
| 1 | JOHDANTO | 1 |
| 2 | PINTAKÄSITTELYIDEN, LIITOKSEN JA TESTAUKSEN TEORIA..... | 1 |
| 2.1 | Mekaaninen hionta..... | 1 |
| 2.2 | Anodisointi | 2 |
| 2.3 | Silaanikäsitteily..... | 2 |
| 2.4 | Hartsialumiini -liitoksen teoria..... | 3 |
| 2.5 | Kappaleiden testaus ja analysointi..... | 4 |
| 3 | KOEKAPPALEIDEN VALMISTUS JA TESTAUS | 5 |
| 3.1 | Testikappaleiden valmistus..... | 5 |
| 3.2 | Pinnankarheuksien määrittäminen | 5 |
| 3.3 | Pintaenergioiden mittaaminen | 6 |
| 3.4 | Vetokappaleiden valmistus..... | 7 |
| 3.5 | Vetokoe..... | 8 |
| 3.6 | Mikroskooppinen tutkimus | 8 |
| 4 | TULOKSET | 8 |
| 4.1 | Pinnankarheudet | 8 |
| 4.2 | Pintaenergiat ja kontaktikulmat | 9 |
| 4.3 | Leikkauslujuudet ja mikroskopia..... | 10 |
| 5 | TULOSTEN TARKASTELU | 11 |
| 6 | YHTEENVETO | 16 |
| | LÄHTEET..... | 18 |

LIITE/LIITTEET

- 1 Kontaktikulmat ja pintaenergiat
- 2 Vetokokeen mittaustulokset

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä selvitetään alumiini-inserttien ja polyesterihartsin välisten sidosten lujuutta lujitemuovituotannossa. Työssä vertaillaan alumiinin pintakäsittelyjen vaikutusta hartsin tarttuvuuteen. Painotus on käytännön sovellettavuudessa, joten tässä työssä on tutkittu pintakäsittelyjä, joita on mahdollista toteuttaa toimeksiantajan tuotannossa. Tavoitteena on selvittää tällä hetkellä käytettävän menetelmän hyödyllisyys ja hakea ko. menetelmälle mahdollisia vaihtoehtoja. Menetelmien eroja tutkitaan erinäisillä mittauksilla, sekä mekaanisella testauksella.

Tämän opinnäytetyön toimeksiantaja on River Plast Oy, joka on Puumalassa Etelä-Savossa toimiva lujitemuoviteollisuuden yritys. Yritys on perustettu vuonna 1995, ja se on erikoistunut ajoneuvoteollisuuden lujitemuovituotteisiin. Päätuotteena ovat autokoriteollisuuden elementit. Valmistusmenetelmänä River Plast käyttää injektiovaakuumitekniikkaa. Suurin osa tuotteista viedään välillisesti Pohjoismaihin ja Baltiaan. Yrityksen liikevaihto on noin 0,9 M€.

2 PINTAKÄSITTELYIDEN, LIITOKSEN JA TESTAUKSEN TEORIA

Työssä tutkittavia pintakäsittelymenetelmiä ovat mekaaninen hionta, anodisointi sekä silaanikäsitteily. Hionnan osalta vertaillaan myös eri pinnankarheuksien merkitystä. Hionta suoritetaan toimeksiantajan prosessissa käsin kulmahiomakoneella, joten hiontasuunta ei tässä työssä tutkita tarkemmin. Referenssinä käytetään käsittelemätöntä alumiinipintaa. Hartsina käytetään Reichold PolyLite 645-M888 polyesterihartsia.

2.1 Mekaaninen hionta

Toimeksiantaja käyttää tällä hetkellä mekaanista hiontaa alumiinikappaleiden esikäsitteilynä. Karhentaminen hiomalla lisää kappaleen pinta-alaa, koska pintaan syntyy erimuotoisia uria ja kuoppia. Liitospinnan pinta-alan kasvamisen voidaan olettaa parantavan liitoksen lujuutta. Pinnan epätasaisuuksiin tunkeutunut liitosaine myös välittää rasituksia erilailla kuin tasaiselle pinnalle levitetty liitosaine. Tämänkin voidaan olettaa näkyvän liitoslujuudessa[1]. Jotta nykyisen hiontatyön hyödyllisyys saadaan selvitettyä, testit suoritetaan vähintään kolmella eri karheuteen hiotulla kappaleella. Yksi näistä on hiomaton pinta, yksi vastaa tuotannossa käytettävää pintaa ja yksi on hiottu

karheammaksi kuin tuotannossa tällä hetkellä. Useampien erikarheuksisten testikappaleiden käytöllä voidaan luonnollisesti saada tarkempia tuloksia hartsin ja alumiini liitoksen kestävyys ja pinnankarheuden suhteesta.

2.2 Anodisointi

Anodisointi on alumiinin sähkökemiallinen pintakäsittelymenetelmä, jossa alumiinin pinnassa olevaa oksidikerrosta kasvatetaan. Tämä tapahtuu asettamalla alumiinikappale anodiksi liuokseen (esim. rikkihappoliuos). Katodista liuokseen johdettava sähkövirta hajottaa vettä vedyksi ja hapeksi, joista happi reagoi alumiinin pinnan kanssa muodostaen alumiinioksidia [3]. Anodisoinnissa alumiinin pintaan muodostuvassa oksidikerroksessa on perusaineeseen asti ulottuvia huokosia. Käsittelyn loppuvaiheessa nämä huokokset suljetaan. Työssä selvitetään, kuinka hyvin hartsi voi tunkeutua näihin huokosiin, varsinkin jos sulkeminen jätetään tekemättä. Tavoitteena on selvittää, lisääkö hartsin tunkeutuma ko. huokosiin hartsin ja alumiinin välisen liitoksen lujuutta. Testauksessa käytetään sekä anodisoinnin kokonaan läpikäynyttä että sulkeamatonta alumiinia. Työssä ei tutkita tarkemmin anodisoinnin prosessiarvoja, vaan testikappaleet hankitaan anodisoituina alumiinin toimittajalta.

2.3 Silaanikäsittely

Silaanipohjaisilla kemiallisilla kiinnitysaineilla voidaan parantaa liitosten ominaisuuksia. Niitä on käytetty 1950-luvulta lähtien parantamaan lasikuitujen kestävyttä [4]. Silaanikäsittelyllä voidaan vaikuttaa myös alumiinin ja polyesterin väliseen liitokseen. Tässä tapauksessa silaanikäsittelyn suurin ongelma voi olla sen aiheuttama työmäärä. Käsiteltävä pinta on puhdistettava ennen kiinnitysaineen levittämistä, joten tavoitteena oleva työmäärään vähentäminen ei välttämättä toteudu. Toisaalta, jos kiinnitysaine voidaan sekoittaa hartsiin, työmäärä todennäköisesti vähenee. Liitoksen ominaisuuksien parantumisen uskotaan johtuvan kiinnitysaineen reagoimisesta sekä metalli- että polymeeripinnan kanssa [4]. Silaaneilla on tavallisesti seuraava molekyyli rakenne.



Silaanimolekyylin keskustana toimii pii, johon liittyvät toiminnalliset ryhmät R ja X. X-ryhmät ovat hydroksyyli ryhmiä, jotka muodostavat liitoksia metallipinnan omien

hydroksyyliiryhmien kanssa [5]. Tästä syystä silaanit soveltuvat metalleille, joissa on ko. ryhmiä. Tämä rajaa silaanin käyttöä lähinnä jalometallien kanssa, alumiini sisältää vaadittuja hydroksyyliiryhmiä. Silaanin R-ryhmä on organofunktionaalinen (organofunctional), ja sen koostumus vaihtelee riippuen silaanilta vaadituista ominaisuuksista [4; 5]. Liitoksen polymeeripinnalla muodostuu kemiallisia sidoksia silaanin sisältämän R-ryhmän ja polymeerimatriisin välille [4; 5]. Käytettäessä silaanipohjaisia kiinnitysaineita on selvittävää kiinnitysaineen ja hartsin yhteensopivuus. Tämä on edellytyksenä onnistuneelle liitokselle. Styreenillä tai vastaavalla monomeerillä kopolymerisoidun polyesterihartsin kanssa käytettäväksi soveltuvat silaanit, joiden toiminnallisessa R-ryhmässä on metakryyliä [4].

2.4 Hartsialumiini-liitoksen teoria

Hartsin ja alumiinin välinen liitos perustuu adheesioon eli kahden aineen väliseen vetovoimaan. Adheesiota ja sen toimintamekanismeja on tutkittu hyvin paljon, silti adheesion kaikkia piirteitä ei tunneta tarkasti nykyisinkään. Normaalisti adheesion aiheuttavat mekanismit jaetaan neljään ryhmään, jotka ovat adsorptio, diffuusio, mekaaninen lukittuminen ja sähköstaattinen-mekanismi [2; 4]. Useimmissa tapauksissa adheesion aikaansaa kaikkien tai osan edellä mainittujen ilmiöiden yhdistelmä. Riippumatta toimintamekanismista adheesion kannalta on tärkeää, että hartsin kostuttaa alumiinin pinnan mahdollisimman hyvin. Tästä syystä erilaisilla pintakäsitteltyjen pintojen ja hartsin väliset kontaktikulmat selvitetään [1; 2]. Kontaktikulman avulla on myös mahdollista määrittää eri materiaalien rajapintojen pintaenergiat.

Pintaenergian arvoista on mahdollista määrittää laskemalla pintojen toisistaan erottamiseen tarvittavan työn teoreettinen arvo [4]. Nämä laskelmat ovat kuitenkin hyvin monimutkaisia, ja niiden tarkkuus riippuu paljolti siitä, kuinka tarkasti kappaleen pinnan karheus on mitattu. Hartsin tunkeutuminen epätasaisen pinnan huokosiin on myös laskettavissa pintaenergioiden avulla [4], mutta näissäkin laskuissa on huomattavan paljon muuttujia, jotka heikentävät laskujen käytännön sovellettavuutta. Niinpä hartsin tarttuvuudesta alumiiniin saadaan todennäköisesti luotettavampia ja todellista tilannetta paremmin ilmentäviä tuloksia käyttämällä ainetta rikkovaa testausta. Tässä työssä ei siten ole nähty tarpeelliseksi käsitellä tarkemmin pintaenergioiden teoreettista laskentaa, vaan työssä tyydytään kontaktikulman selvittämiseen ja sitä kautta erilaisten pin-

tojen kostumisen tutkimiseen ja vertailuun. Youngin yhtälö kertoo pintaenergioiden suhteen kontaktikulmaan.

$$Y_{lv} \cdot \cos \theta = Y_{sv} - Y_{sl} \quad (2)$$

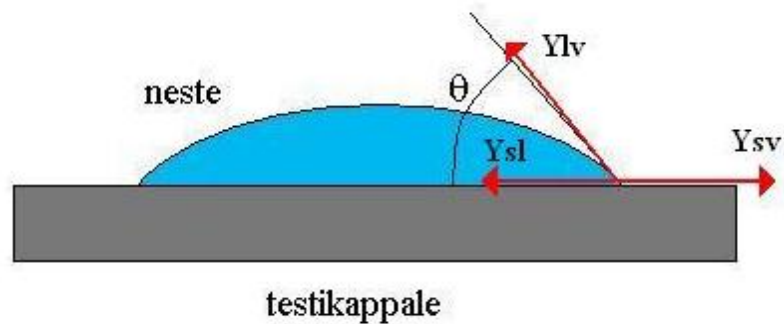
θ kontaktikulma

Vapaat pintaenergiat:

Y_{lv} neste-kaasu

Y_{sv} kiinteä-kaasu

Y_{sl} kiinteä-neste



KUVA1. Kontaktikulman määrittäminen

Mittaukset suoritetaan kontaktikulmamittarilla. Kuvassa 1 on esitetty kontaktikulman ja vapaiden pintaenergioiden yhteyden periaate. Mitä pienempi kontaktikulma on sitä paremmin pinta kostuu [1]. Vaikka pinnan kostuminen on merkittävä tekijä, ei se kerro suoraan liitoksen lujuutta [2].

2.5 Kappaleiden testaus ja analysointi

Testikappaleista määritetään pinnankarheuden Ra-arvot. Mekaanisesti hiotuilla testikappaleilla on huomioitava, että osa testattavista kappaleista saavuttaa Ra-arvon 1,10 μm , jonka yläpuolella pinnankarheuden merkityksen voidaan olettaa vähenevän [1]. Erilaisten pintojen kontaktikulmat selvitetään, kuten edellä on mainittu. Hartsin ja esikäsiteltyjen pintojen välisestä liitoksesta selvitetään sauman leikkauslujuus, sillä se kuvaa hyvin tuotantokappaleiden kokema rasiusta. Leikkauslujuuden määrittämiseen käytetään vetokonetta. Koekappaleiden valmistuksessa on pyrittävä siihen, että

alumiinin ja hartsin liitospintaan kohdistuu mahdollisimman vähän muita kuin leikkausvoimia. Sauman suurimman leikkauslujuuden ohella on myös tärkeää selvittää ko. sauman hajoamismekanismeja, jotta saadaan selville, hajoaako liitos hartsin ja alumiinin rajapinnasta vai hartsikerroksen sisältä. Tämän johdosta liitospinnat tutkitaan mikroskoopilla vetokokeen jälkeen. Testauksessa pyritään hyödyntämään valmista standardia, jotta saatujen tulosten vertailu olisi laajemmin mahdollista. Testikappaleiden dimensiot ja kiinnitys määräytyvät sovellettavan standardin mukaan. Käytettävä standardi on SFS-EN 14869-2, mutta sitä tullaan soveltamaan vain siltä osin kuin se koetaan tarpeelliseksi.

3 KOEKAPPALEIDEN VALMISTUS JA TESTAUS

3.1 Testikappaleiden valmistus

Kokeissa käytetyt testikappaleet valmistettiin 2 mm paksusta alumiinilevystä pois lukien anodisoidut kappaleet, jotka valmistettiin 1,5 mm:n levystä. Testikappaleiden osat leikattiin levyleikkurilla, jolloin leikkauspinnat säilyivät siisteinä. Myös mittatarkkuus ja mittojen vaihtelu kappaleiden välillä saatiin tällä menetelmällä pidettyä hyvällä tasolla. Leikatuille osille suoritettiin vaadittavat esikäsitteilyt. Testaus suoritettiin seitsemälle erilaiselle esikäsitteilylle, joista kolme olivat karhennuksia, kaksi erilaisia silaaneja, yksi anodisoitu sulkematon pinta ja yksi käsittelemätön alumiinipinta. Jokaista tapausta kohti valmistettiin kolme testikappaletta. Käsittelemätön ja anodisoitu alumiini eivät vaatineet erillistä esikäsitteilyä. Toimeksiantajan tuotannossa käytettävää pintaa vastaavat koekappaleet karhennettiin kulmahiomakoneella, jossa oli hiontalaikka. Kaksi erää koekappaleita karhennettiin hiomapaperilla. Käytetyt hiomapaperien karheudet olivat P40 ja P120. Hionta tehtiin kuivana ja vaihdellen hiontasuuntaa. Myös silaanikäsitteilyä varten valmistetut koekappaleet käsiteltiin kevyesti P120-hiomapaperilla.

3.2 Pinnankarheuksien määrittäminen

Koekappaleiden pinnankarheudet määritettiin optisella profiilometrillä. Profiilometrin toiminta perustuu kappaleesta heijastuvan valon mittaamiseen, sillä pystytään analysoimaan pinnanmuotojen ja -karheuksien lisäksi myös pinnoitteiden kalvonpaksuuksia hyvin tarkasti. Laitteeseen kuuluu moottoroitu horisontaalinen mittaustaso, johon

näytteet kiinnitetään mittauksen ajaksi. Profilometrillä koekappaleiden pinnoista saatiin pinnankarkeuden Ra-arvot ja lisäksi tarkat pintaprofiilit, jolloin kappaleiden pinnanmuotojen tarkka vertailu oli mahdollista. Mittauksissa oli huomioitava, että laitteen suuri tarkkuus voi aiheuttaa tuloksiin vääristymää. Tästä syystä mittatuloksille suoritettiin vielä suodatus profilometrin analysointiohjelmistolla.

3.3 Pintaenergioiden mittaus

Kontaktikulma- ja pintaenergiamittausta varten valmistettiin erilliset näytekappaleet. Mittaus toteutettiin käsittelemättömälle alumiinille, anodisoidulle pinnalle sekä yllä mainituille karhennetuille pinnoille. Mittauksia ei toteutettu alkuperäisen suunnitelman mukaan työssä tutkittavalla polyesterihartsilla, koska suunnitelmaa tehtäessä ei ollut tiedossa kontaktikulmamittarin tarkat ominaisuudet ja sen mahdollistamat mittaukset. Kuten teoriaosuudessa on mainittu, vapaiden pintaenergioiden selvittämistä esikäsitellyistä näytteistä ei koettu välttämättömäksi tämän työn kannalta, vaan tarkoitus oli tutkia vain kontaktikulmat. Testien suorittamisen yhteydessä kokonaispintaenergioiden selvittäminen osoittautui kuitenkin riittävän yksinkertaiseksi ja niin vähän aikaavieväksi, että ne päätettiin selvittää. On huomattava, että vapaa pintaenergia ja kokonaispintaenergia eivät ole sama asia, mutta kokonaispintaenergian arvokin kertoo pinnan ominaisuuksista.

Pintaenergioiden ja kontaktikulmien mittaamiseen käytettävässä laitteessa on vaakatasossa oleva liikuteltava mittaustaso, jolle testattava kappale laitetaan. Laitteeseen kiinnitetystä ruiskusta pinnalle asetetaan pisara nestettä, jonka ominaisuudet tiedetään ennalta. Mittatasoa ja näytettä sivulta kuvaava kamera tallentaa kuvan pisarasta, ja tästä kuvasta voidaan mittaushjelmiston avulla määrittää mm. nesteen ja näytteen välinen kontaktikulma. Kun tällaisia mittauksia suoritetaan useampia, useammalla ominaisuuksiltaan tunnetulla nesteellä, pystytään saaduista mitta-arvoista määrittämään koekappaleen pintaenergia. Mittauksissa käytetyt nesteet olivat tislattu vesi, glyseroli ja etyleeniglykoli. Edellä kuvatulla menettelyllä voitiin koekappaleista selvittää kontaktikulmien lisäksi pintaenergiat. Kontaktikulmien arvot ovat myös edelleen verrattavissa keskenään, vaikka eivät kerrokaan työssä käytetyn hartsin ja näytteiden välistä kontaktikulmaa.

3.4 Vetokappaleiden valmistus

Koekappaleiden osista koottiin pinnankarheusmittausten jälkeen testikappaleet veto-koetta varten. Koska toimeksiantajan tuotannossa käytetään injektiovakuumitekniikkaa tuotteiden valmistuksessa, koettiin alipaineen käyttäminen testikappaleiden valmistuksessa oleellisena. Täten saatavat tulokset olisivat hyödynnettävissä mahdollisimman hyvin yrityksen toiminnassa. Testikappaleiden liitettävien pintojen väliin laitettiin jatkuvakuituista lasikuitumattoa, sillä toimeksiantajan tuotannossa alumiiniinsertit on ympäröity kyseisellä matolla. Toinen kuitujen saumaan lisäämisestä saatava hyöty oli sauman paksuuden kasvattaminen, jolloin vetokokeen onnistumisesta saatiin varmempaa.

Työssä käytetty polyesterihartsin nimi oli Reichold Polylite 645-M888. Kyseessä on normaali styreeniä sisältävä polyesterihartsi. Testikappaleiden liittäminen tehtiin lasipöydällä, joka puhdistettiin ja käsiteltiin irrotusaineella, jonka tarkoituksena on estää hartsin liiallinen tartunta pöytään ja näin mahdollistaa valmiiden testikappaleiden irrottamisen pöydästä. Kappaleiden osat aseteltiin pöydälle ja ympäröitiin tiivistysnauhalla, johon tehtiin läpivienti alipainepumpun letkulle. Koska liitospinnat olivat pinta-alaltaan verrattain pieniä suhteessa koekappaleiden kokonaisalaan, hartsin levittäminen käsin suoraan liitospintaan koettiin parhaaksi menetelmäksi.

Ennen hartsin injektointia suoritettiin silaanikäsittely sitä vaatineille testikappaleille. Tutkittavana oli kaksi eri valmistetta: Dynasytan HYDROSIL 2926 ja Dynasytan MEMO. Injektoinnin jälkeen paikalleen asetettiin testikappaleiden loput osat ja kaikki testikappaleet peitettiin yhdellä muovikalvolla, joka kiinnitettiin reunoistaan kappaleita ympäröivään tiivistenauhaan. Alipainepumppu kytkettiin päälle, jolloin testikappaleet sisältävään ”säkkiin” muodostui alipaine ja liitettävät osat saatiin painumaan toisiaan vasten. Muovikalvon ja tiivistenauhan välisen liitoksen pitävyys tarkistettiin, jotta voitiin varmistua, että kalvon alle ei päässyt virtaamaan ilmaa. Koekappaleiden liittämisessä käytettiin 0,5 barin alipainetta. Kappaleet olivat puristuksessa yön yli noin 16 tuntia, jonka jälkeen alipainepumppu kytkettiin pois päältä. Testikappaleiden irrotus pöydästä suoritettiin mahdollisimman varovasti, jotta kappaleet tai pöytä eivät vaurioituisi. Vaarana oli myös, että testattaviin saumoihin syntyisi alkusäröjä, jotka vaikuttaisivat vetokokeiden tuloksiin. Koekappaleiden päihin kiinnitettyjen täyteosien pintoja ei käsitelty millään tavoin ennen liittämistä, sillä vetokokeen aikana vetoko-

neen leuat puristavat osia yhteen ja lisäävät kitkaa liitoksessa siinä määrin, että liitoksen pintojen esikäsitteilyä ei pidetty tarpeellisena. Kahdesta koekappaleesta kyseiset täyteosat kuitenkin irtosivat, kun kappaleita irrotettiin pöydästä liittämisen jälkeen. Kyseiset koekappaleet jouduttiin tämän vuoksi valitettavasti hylkäämään. Pöydän käsitteily suuremmalla määrällä irrotusainetta olisi saattanut estää vahingon. Hylätyistä koekappaleista toinen oli hiontalaikalla karhennettu ja toinen silaanilla käsitelty. Muut koekappaleet todettiin ehjiksi ja vetokokeeseen soveltuviksi.

3.5 Vetokoe

Valmiit koekappaleet testattiin vetokokeella. Kokeissa käytettiin kuormituskehää, jonka merkki ja malli olivat Shimadzu Autograph AG 100. Kuten aikaisemmin on mainittu, vetokokeen tarkoituksena oli mitata alumiinin ja polyesterihartsin välisen liitoksen leikkauslujuutta. Koekappaleet oli suunniteltu siten, että testattavaan saumaan kohdistuisi mahdollisimman vähän muita kuin leikkausvoimia. Kokeissa voitiin käyttää normaaleja vetoleukoja, jotka linjattiin ennen kokeita. Kokeet pystyttiin suorittamaan suunnitellusti. Käytetty vetonopeus oli kaikkien testikappaleiden kanssa 1 mm/min. Kaikista testikappaleista myös mitattiin sauman pituus ennen vetokoetta, jotta pystyttiin määrittämään saumojen jännitysarvot. Kokeiden jälkeen rikkivedetyt kappaleet talletettiin tarkempaa tutkimista varten.

3.6 Mikroskooppinen tutkimus

Vetokokeen jälkeen testikappaleille suoritettiin silmämääräisen tutkimuksen lisäksi mikroskooppinen tutkimus. Tavoitteena oli etsiä alumiinin pinnasta hartsin- ja/tai kuitujäämiä. Tutkimukseen käytettiin stereomikroskooppia. Mikroskooppisella tutkimuksella saatiin pinnoista myös kuvia, joita pystytään vertailemaan keskenään.

4 TULOKSET

4.1 Pinnankarheudet

Toimeksiantajan tuotannosta saadun referenssikappaleen pinnankarheuden Ra-arvoksi todettiin mittauksissa noin 10 μm , mikä tarkoittaa kyseessä olevan hyvin karhea pinta. Silmämääräisestäikin havainnoituna pinta voitiin todeta selvästi karheammaksi kuin

aiemmin mainittu 1,10 μm :n Ra-arvo, jonka yläpuolella pinnanlaadun merkityksellä on tutkittu olevan vain vähän vaikutusta liitoslujuuteen [1]. Tästä syystä ei nähty tarpeellisenä tehdä testikappaleita, jotka olisivat pinnanlaadultaan huomattavasti referenssikappaleita karheampia. Kulmahiomakoneen hiomalaikalla, jota käytetään menetelmän yrityksen tuotannossa, hiotut koekappaleet tehtiin siten, että ne olivat silmämääräisesti arvioiden hieman karheampia kuin referenssi. Näiden kappaleiden mitatut Ra-arvot sijoittuivatkin jonkin verran referenssin arvon yläpuolelle, jolloin koekappaleiden pinnanlaadun vaikutuksista voidaan tehdä toimeksiantajaa hyödyttäviä päätelmiä. Eri tavoilla käsiteltyjen pintojen Ra-arvojen keskiarvot on esitetty taulukossa 1.

TAULUKKO 1. Pinnankarheudet

| | Referenssi | Laikattu | Hiottu-P40 | Hiottu-P120 | Anodisoitu | Käsittelymätön |
|----------------------|------------|----------|------------|-------------|------------|----------------|
| Ra (μm) | 9,04 | 13,82 | 2,95 | 1,88 | 1,35 | 0,8 |

Mitatuissa Ra-arvoissa ei havaittu käsittelyjen sisällä merkittävää vaihtelua muissa kuin yhdessä P40-hiomapaperilla hiotussa kappaleessa, jossa ollut naarmu näkyi mitaustuloksissa huomattavasti suurempana Ra-arvona. Kyseisen kappaleen arvo jätettiin pois pinnanlaatuojen keskiarvojen määrittämisestä, sillä se ei vastannut P40-hiomapaperilla saatavaa pinnanlaatua kappaleen naarmuuntumisen johdosta. Tuotantoympäristössä tämän kaltainen naarmuuntuminen olisi normaalia, mutta koska tutkimuksessa haluttiin vertailla eri hiontapapereilla syntyviä eroja, oli perusteltua karsia ko. mittaustulos keskiarvon määrittämisestä. Muutoin koekappaleista mitatut Ra-arvot nousevat hyvin johdonmukaisesti, kun siirrytään kevyistä rankempiin pintakäsittelyihin. Huomion arvoista mittaustuloksissa on myös se, että vain käsittelemättömän alumiinipinnan Ra-arvo oli alle 1 μm . Tämä osoittaa kaikkien pintakäsittelyjen karhentavan alumiinin pintaa siinä määrin, että sillä tulisi olla havaittavaa vaikutusta liitoksen lujuuteen [1]. Profilometrillä toteutetut Ra-arvojen mittaukset ovat myös erittäin tarkkoja, koska mittauspisteiden määrä mitattavalla pinnalla on todella suuri.

4.2 Pintaenergiat ja kontaktikulmat

Pintaenergioiden ja kontaktikulmien selvittämisellä haluttiin tutkia, kuinka erilaisten pintakäsittelyjen vaikutus näkyisi koekappaleiden kostumisessa. Mitatut kokonaispin-

taenergiat olivat melko lähellä toisiaan, vain käsittelemättömän pinnan arvo poikkesi huomattavasti muista. Kontaktikulmien arvoissa oli jonkin verran eroja.

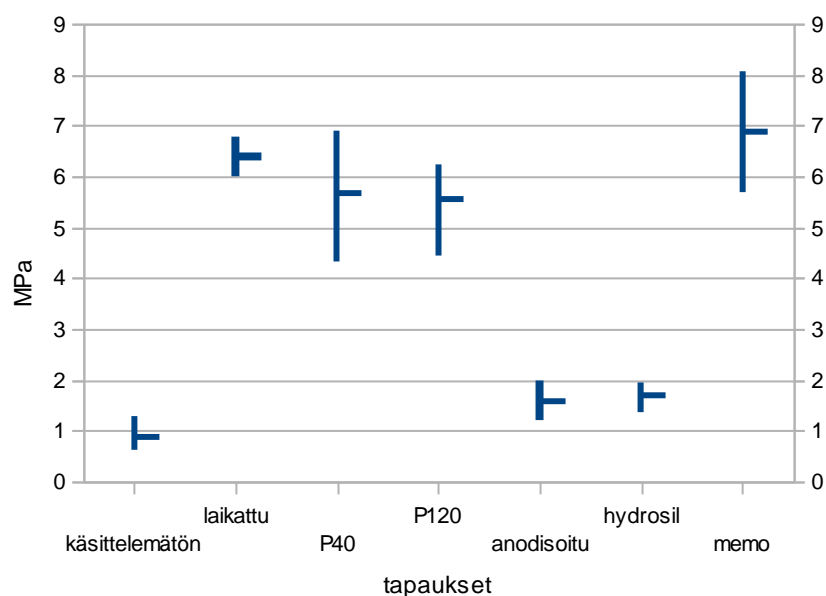
TAULUKKO 2. Kontaktikulmat määritettynä glyserolilla

| | Käsittelemätön | Laikattu | Hiottu-P40 | Hiottu-P120 | Anodisoitu |
|---------------|----------------|----------|------------|-------------|------------|
| Kontaktikulma | 79.6° | 80.4° | 90.3° | 81.0° | 89.6° |

Taulukossa 2 on esitetty glyserolin ja eri pintojen väliset kontaktikulmat. Kuten taulukosta 2 käy ilmi, sekä käsittelemättömän että hiontalaikalla ja P120-hiomapaperilla karhennettujen näytteiden kontaktikulmat ovat lähellä toisiaan. Vastaavasti anodisoitun ja P40-hiontapaperilla käsitellyn näytteen arvot ovat lähellä toisiaan. Myös tislattulla vedellä suoritetuissa mittauksissa oli havaittavissa vastaava trendi. Etyleeniglykolilla määritetyissä kontaktikulmissa oli huomattavaa vaihtelua ja poikkeavuutta kahdesta muusta mittauksesta, jolle ei ollut muuta ilmeistä syytä kuin testien suorittajan kokemattomuus.

4.3 Leikkauslujuudet ja mikroskopia

Koekappaleista mitattiin liitoksen leikkauslujuudet käyttäen vetokoetta.

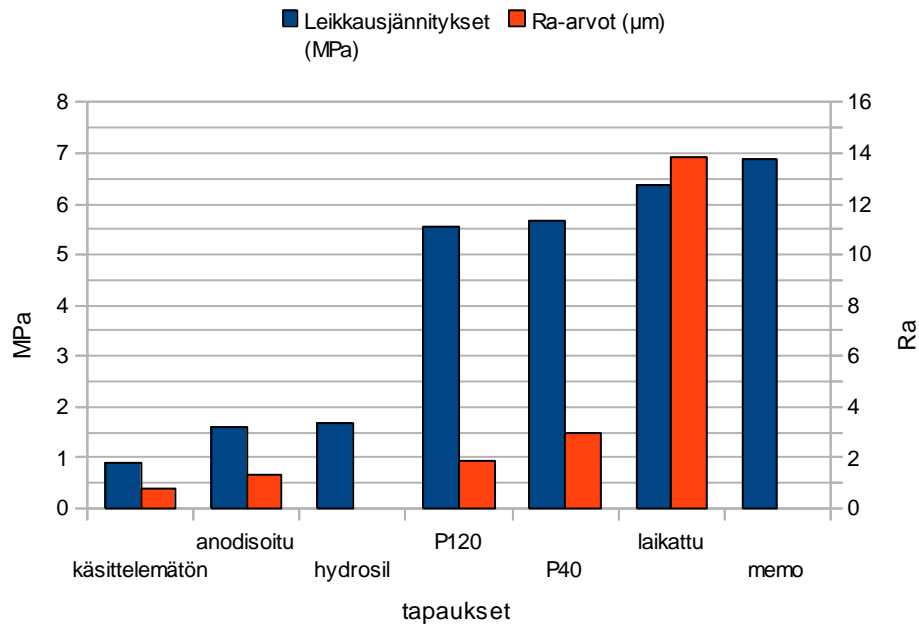


KUVA 2. Leikkauslujuudet

Kuvassa 2 on esitetty eri käsittelyjen leikkauslujuuksien keskiarvot sekä lujuusarvojen vaihteluvälit käsittelyjen sisällä. Kuvassa 2 esitetyistä arvoista voidaan nähdä, että koetulosten hajonta on suurinta hiomapaperilla karhennetuissa kappaleissa sekä toisen silaanikäsitteilyn tapauksessa. Muissa käsittelyissä vaihtelu on hyvin pientä. Molemmilla hiomapaperilla karhennetuissa sarjoissa oli yksi lujuusarvoiltaan muita selvästi huonompi koekappale, jonka vaikutus näkyy kyseisten sarjojen kohdalla leikkauslujuuden suurena hajontana. Dynasytan MEMO -silaanilla käsitteilyjen kappaleiden leikkauslujuuksien hajontaa on vaikea analysoida tarkasti, koska kyseisestä sarjasta rikkoutui yksi testikappale valmistuksen aikana ja vetokoe jouduttiin suorittamaan täten vain kahdella koekappaleella. Yleisti voidaan todeta, että kokeissa useammalla koekappaleella saavutettu 5 Mpa:n leikkauslujuuden arvo on varsin hyvä ja osoittaa polyesterihartsin ja alumiinin välisen sidoksen olevan varsin luja edellyttäen, että alumiinin pinta on valmisteltu liittämistä varten. Kuvasta 2 voidaan myös nähdä, että vaikka molempien silaanien kohdalla koekappaleille tehtiin samanlainen hyvin kevyt käsittely P120-hiomaspaperilla lujuusarvoissa on suuret erot. Tämä antaa vaikutelman, että liitosten lujuusarvot johtuvat juuri silaanikäsitteilyistä eivätkä hionnasta. Mikrokooppisessa tutkimuksessa osassa testikappaleista oli selvästi havaittavissa sekä hartsi- että kuitujäämiä. Joidenkin kappaleiden pinnoilla oli silmämääräisestikin havaittavia jäämiä.

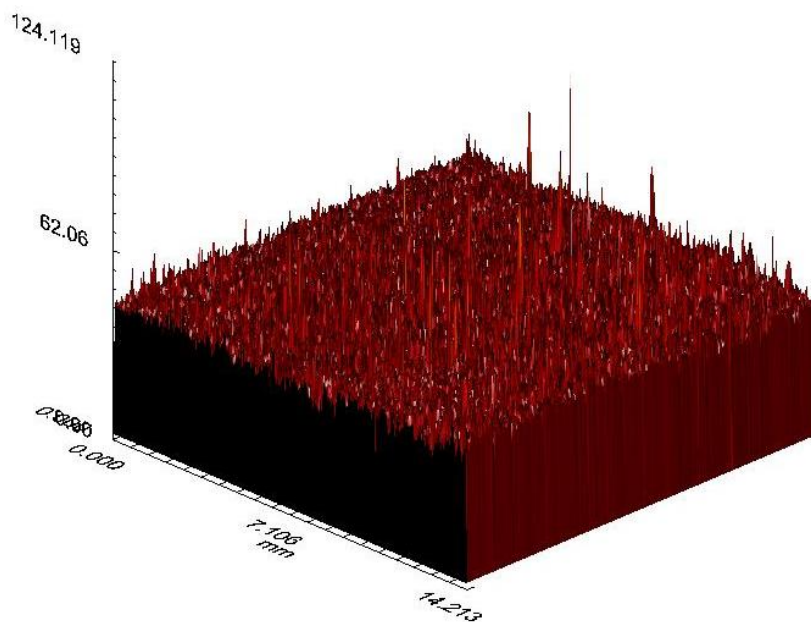
5 TULOSTEN TARKASTELO

Tehdyissä mittauksissa tuli selkeästi esiin, että pintakäsittelyn vaikutus alumiinin ja polyesterihartsin liitoksessa on merkittävä, kuten voitiin olettaakin. Vertaamalla eri mittaustuloksia keskenään voidaan arvioida, onko eri mittaussuureiden välillä nähtävissä suoraa verrannollisuutta tai muuta yhteyttä. Kuvassa 3 on vertailtu leikkauslujuutta ja pinnankarheusarvoja keskenään. Molemmat lukemat ovat mitattujen arvojen keskiarvoja. Pinnankarheuden kasvaessa leikkauslujuus suurenee aluksi, mutta suurilla pinnankarheuden arvoilla (P120-käsittely) leikkauslujuudessa ei tapahdu enää merkittävää lisääntymistä. Taulukosta 1 ja kuvasta 4 voidaan lukea anodisoitujen koekappaleiden mitatuksi pinnan Ra-arvoksi 1,35 μm ja P120-hiomaspaperilla käsitteilyjen vastaavaksi arvoksi 1,88 μm . Tulokset antavat vaikutelman, että pinnan Ra-arvon kasvattamisella saatava leikkauslujuuden kasvu kyllä tasaantuu ja karhennuksen lisäämisen hyöty vähenee merkittävästi, mutta leikkauslujuuden taitekohta näyttäisi olevan hieman korkeammalla kuin kirjallisuudessa esitetyssä 1,10 μm :n Ra-arvossa.



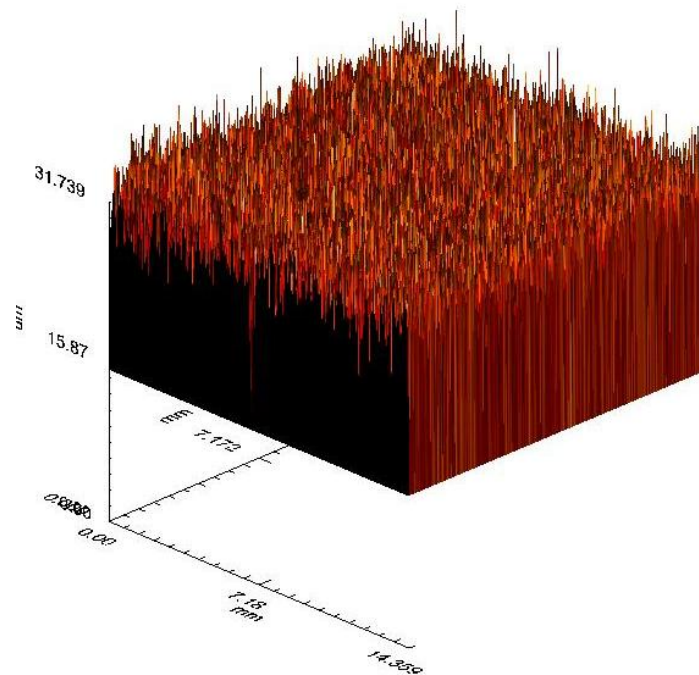
KUVA 3. Jännitysten ja Ra-arvojen yhteys

Mittausten perusteella kyseinen leikkauslujuuden taitekohta olisi jossain edellä mainittujen $1,35\mu\text{m}$:n ja $1,88\mu\text{m}$:n välillä. Tosin ero on niin pieni $1,10\mu\text{m}$:iin, että sen vaikutus käytännön sovelluksissa on hyvin vaatimaton. Anodisoidun ja P120 hioma paperilla käsiteltyjen pintojen erot käyvät selkeämmin ilmi, kun verrataan niiden pintaprofiileja.



KUVA 4. P120-hiomapaperilla käsitelty pinta

Kuvassa 4 on P120-hiomapaperilla käsitellystä alumiinipinnasta profilometrillä kuvattu pintaprofiili kolmiulotteisena kuvana. Pinnasta erottuu selkeästi muita kohtia korkeampia huippuja, joita on pinnalla selkeästi erillään toisistaan. Jos kuvan 4 profiilia verrataan kuvassa 5 olevaan anodisoidusta pinnasta otettuun pintaprofiiliin, voidaan huomata joitakin eroja. Anodisoidusta pinnasta puuttuvat hiotulla pinnalla olevat yksittäiset huiput, mikä onkin luonnollista ottaen huomioon, että anodisointi on sähkökemiallinen pinnoitusmenetelmä, jossa alumiinin pinnalla olevaa oksidikerrosta kasvatetaan. Pintaprofiilista on nähtävissä myös anodisoidun pinnan kauttaaltaan tasaisesti huokoinen rakenne, sillä koekappaleelle ei ole tehty sulkukäsittelyä.



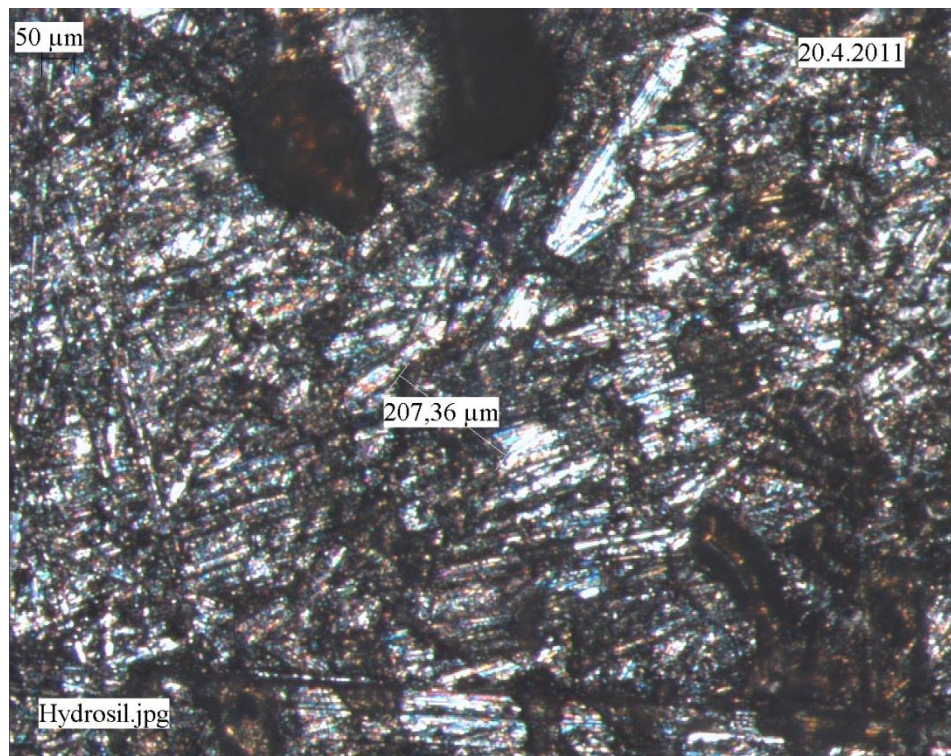
KUVA 5. Anodisoitu pinta

Vaikka sulkematon anodisoitu pinta onkin huokoinen eikä sen Ra-arvo täten ole kovin paljon P120-hiomapaperilla hiotun pinnan Ra-arvoa alempi, oli näiden kahden pintakäsittelyn välillä huomattava ero kuvissa 2 ja 3 esitetyissä leikkauslujuuden arvoissa. Tämä viittaisi siihen, että anodisoidun pinnan huokokset ovat halkaisijaltaan liian pieniä, jotta kokeissa käytetty polyesteriharts oli pystynyt kunnolla tunkeutumaan niihin ja luomaan lujaa sidosta. On myös mahdollista, että edellä mainittuihin huokosiin on hartsin injektoinnin yhteydessä jäänyt ilmaa, joka ei ole päässyt poistumaan vaan on jäänyt täyttämään huokosta ja näin estänyt hartsin kunnollisen pääsyn sinne.

Myöskin hiotulle pinnalle ominaisilla huipuilla on mitä ilmeisimmin suuri vaikutus hartsin ja alumiinin välisen sidoksen lujuudessa. On huomattava, että P120-

hiomapaperilla käsitellyn pinnan pintaprofiilissa näkyvät huiput ovat mittasuhteiltaan merkittävästi suurempia kuin anodisoidun pinnan huiput. Suurempiin pinnan epätasaisuuksiin hartsin on helppo tarttua ja voidaan olettaa, että aikaisemmin tämän työssä mainituista adheesion toimintamekanismeista ainakin mekaaninen lukittuminen on vahvasti läsnä, kun pinnankarheus muuttuu suuremmaksi. Anodisointia käytetään teollisuudessa alumiinin pintakäsittelynä adheesion parantamiseksi, mutta liitosaineena on tällöin yleisesti käytössä jokin epoksihartsi. Epoksinhartsin ja anodisoidun alumiinin välisessä adheesiossa yhtenä merkittävänä huomioonotettavana seikkana on alumiinin pinnassa olevan oksidikerroksen ja epoksihartsin välinen kemiallinen reagointi [1]. Polyesterihartsilla, jota tässä työssä käytettiin, ei vastaavan kaltainen ilmiö ole samassa määrin läsnä.

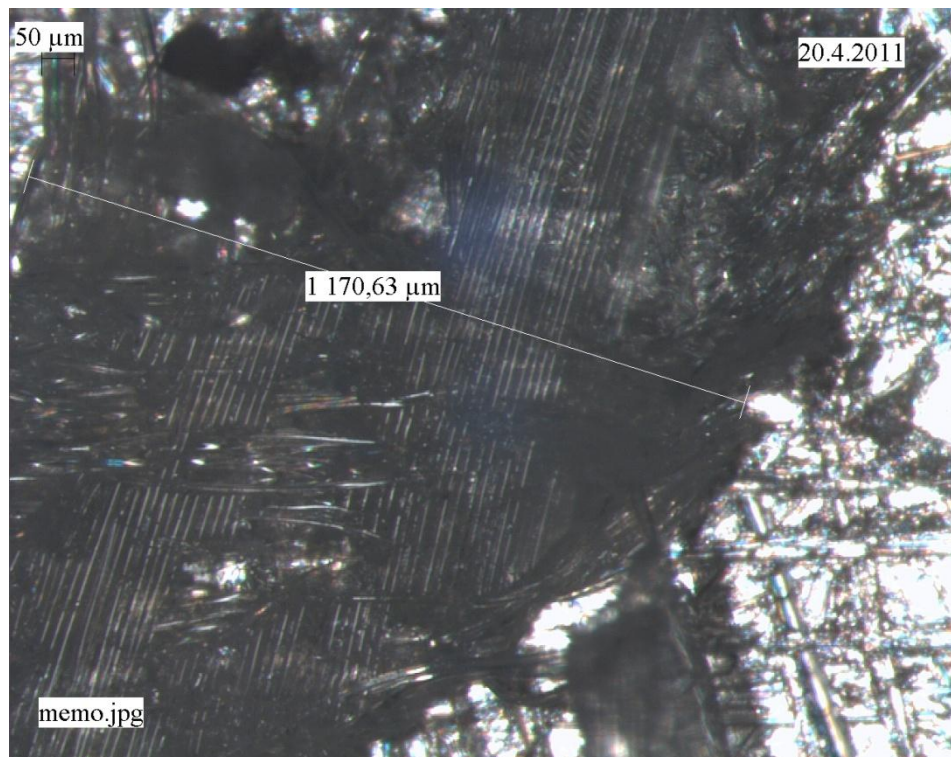
Kemiallisiin sidoksiin perustuvien silaanien kohdalla voidaan kuvasta 3 todeta, että Hydrosil-valmiste ei parantanut alumiinin ja hartsin välistä sidosta kun taas Memon voidaan nähdä parantaneen liitoslujuutta jopa merkittävästi.



KUVA 6. HYDROSIL käsitelty Al-pinta vetokokeen jälkeen

Erot käyvät hyvin selville myös vetokokeiden jälkeen stereomikroskoopilla suoritetussa tarkastelussa. Kuva 6 esittää Hydrosil:llä käsitellyn koekappaleen pintaa vetokokeen jälkeen ja siinä nähdään, että pinnalla on hyvin pieniä jäämiä hartsia, mutta ei

ollenkaan kuitujäämiä. Kun tätä verrataan kuvaan 7, jossa on nähtävissä vastaava kuva Memolla käsitellystä koekappaleesta, huomataan selkeä ero. Kuvassa 7 on selvästi nähtävissä suuria jäämiä sekä hartsista että lujitekuiduista. Hartsi näkyy kuvassa tummempana ja pinnan tekstuurltaan tasaisempuna kuin alumiinin pinta. Kuitukankaasta irronneet kuidut taas näkyvät yhdensuuntaisina viivamaisina muodostelmina hartsijäämien joukossa. Kuvassa 7 voidaan myös nähdä, että joissain kohdissa kuitukankaasta on jäänyt useampiakin kuitukerroksia kiinni kappaleen pintaan. Näissä kohdissa kuvassa näkyy vaakatasossa kulkevaa viivoitusta, joka ei ole aivan yhtä terävää kuin muu kuva, koska kuva on tarkennettu lähemmäs alumiinin pintaa. Mitään ilmeistä tai selkeää syytä näiden kahden silaanin aivan erilaisille tuloksille ei havaittu testien yhteydessä.



KUVA 7. MEMO-käsitelty Al-pinta vetokokeen jälkeen

Kaikille testikappaleille suoritettiin vetokokeet alle 72 tuntia niiden valmistuksen jälkeen, ja ne odottivat vetokoetta huoneen lämmössä. Koekappaleiden kuumennus uunissa ennen vetokoetta olisi voinut parantaa hartsin ominaisuuksia ja vaikuttaa suotuisasti myös silaanien toimintaan vetokokeessa.

6 YHTEENVETO

Tutkimusten tuloksista tehtävissä olevat johtopäätökset eivät ole kovinkaan yllätyksellisiä, mikä oli jossain määrin odotettavissakin. Tehdyillä testeillä pystyttiin selvästi osoittamaan alumiinipinnan karhennuksen liitoslujuutta lisäävä vaikutus alumiinin ja polyesterihartsin välisessä liitoksessa. Tämä oli työn alusta asti odotettavissakin mutta suurimmat leikkauslujuuden arvot, joita alumiinin ja hartsin liitoksesta määritettiin olivat jopa parempia kuin mitä ennen testausta odotettiin. Tulosten vertailu osoitti myös, että pinnankarheuden kasvattaminen lisää liitoksen lujuutta vain tiettyyn pisteeseen asti. Tässä työssä suoritettujen mittausten perusteella näyttää siltä, että pinnan Ra-arvon noustua noin 1,5 μm :iin on karhennuksesta saatava hyöty paljolti käytetty. Pinnan karheuden lisääminen tämän jälkeenkin vaikuttaa liitoslujuuteen, mutta vain hyvin vähän suhteessa Ra-arvon nousuun.

Anodisoidun pinnan huono menestyminen testauksessa oli jossain määrin yllättävää, sillä kyseinen pinta on sulkemattomana hyvin huokoinen ja sen pinnankarheuskin todettiin mittauksissa selvästi käsittelemätöntä pintaa karheammaksi. Anodisointi on myös esikäsitteilymenetelmänä käytössä esim. lentokoneteollisuudessa kun alumiinipintoja liitetään liimaamalla. Tämän työn sovellus ei poikennut periaatteiltaan paljon edellämäisestä mutta mittausten perusteella on ilmeistä, että ainakaan tutkimuksessa käytetyillä menetelmillä alumiinipinnan anodisointi ei tuo merkittävää lisäystä alumiinin ja polyesterihartsin välisen liitoksen lujuuteen.

Kahden työssä tutkitun silaanin toisistaan täysin poikkeavat mittaustulokset olivat ehkä suurin yllätys koko työssä. Jostain syystä toinen käytetyistä aineista ei toiminut anodisointia paremmin kun taas toinen silaani lisäsi liitoslujuutta merkittävästi. Erot johtuvat todennäköisimmin silaanien välisistä kemiallisista eroista, joita ei tarkemmin tutkittu, sillä ne jäivät työn rajauksen ulkopuolelle. Silaanien tarkempi vertailu voisi olla mahdollinen jatkotutkimusaihe.

Toimeksiantajan prosessin kannalta voidaan katsoa tämän työn tavoitteiden täyttyneen osittain. Tutkimuksilla pystyttiin selvittämään tällä hetkellä käytössä olevalla alumiinin esikäsitteilymenetelmällä saatava pinnanlaadun arvo, sekä tällä saavutettava alumiinin ja hartsin välinen liitoslujuus. Nykyisellä menetelmällä saavutettava liitoslujuus todettiin myös varsin hyväksi. Näiltä osin tavoitteisiin päästiin varsin hyvin.

Työssä myös etsittiin mahdollisia vaihtoehtoja käytettävälle esikäsitteilymenetelmälle. Tarkoituksena oli selvittää olisiko mahdollista päästä samoihin liitoslujuuksiin vähemmän työvaltaisella ja siten taloudellisemmalla menetelmällä. Tältä osin tavoitteet täyttyivät vain osittain. Kevyempi hionta todettiin lujuuden puolesta lähes vastaavaksi kuin nykyinen menetelmä mutta työmäärää se tuskin vähentää merkittävästi. Toisaalta toisella testatuista silaaneista päästiin todella hyviin lujuusarvoihin mutta kyseisen aineen hinta voi muodostua käytön esteeksi. On myös huomattava, että silaanilla käsitellyt kappalleet saivat kevyen hiontakäsittelyn. Ilman kyseisen silaanin tarkkoja hintatietoja on vaikea arvioida saavutettaisiinko sillä säästöjä. Voidaankin todeta, että toimeksiantajan prosesissa käytettävälle alumiinin esikäsitteilylle löytyi vaihtoehtoja, mutta niillä mahdollisesti saatavat hyödyt ovat todennäköisesti melko pieniä.

LÄHTEET

1. Adhesive joining of aluminium AA6082: The effects of resin and surface treatment
C. Borsellino, G. Di Bellab and V.F. Ruisi
International Journal of Adhesion and Adhesives
Volume 29, Issue 1, January 2009, Pages 36-44
2. Adhesion science and engineering. 1, The mechanics of adhesion [series editor: A. V. Pocius] ; edited by D.A. Dillard, A. V. Pocius.2002 ISBN 0-444-51140-7
3. Ihalainen, Aaltonen, Aromäki, Sihvonen. Valmistustekniikka, Otatieto, 11.painos, 2005, ISBN 951-672-333-0, sivut 197-209, 281-335
4. Adhesion science and engineering. 2, Surfaces, chemistry, and applications / edited by M. Chaudhury, A.V. Pocius [series editor: A. V. Pocius], 2002, ISBN 0-444-51140-7.
5. Silanes as Primers and Adhesion Promoters for Metal Substrates
Edward M. Petrie
Metal Finishing
Volume 105, Issues 7-8, July-August 2007, Pages 85-93

LIITE 1.**Kontaktikulmat ja pintaenergiat****Kontaktikulmat**

| | | | | | |
|------------------------------|---------------|------------------|-------------------|------------------|------------------------|
| Vesi | 77.1±0.00 | 77.3±0.00 | 94.4±0.00 | 84.9±0.00 | 97.3±0.00 |
| Etyleeni glykoli | 17.6±0.00 | 71.6±0.00 | 9.8±0.56 | 63.6±0.00 | 34.4±0.00 |
| Glyseroli | 79.6±0.00 | 80.4±0.00 | 90.3±0.00 | 81.0±0.00 | 89.6±0.00 |
| | Sileä | Laikattu | P40 | P120 | Anodisoitu |
| Kokonaispintaenergiat | 37.42 (±8.06) | 29.92 (±5.76) | 32.29 (±12.85) | 29.54 (±2.54) | 29.58 (±9.26)[mN/m] |

Leikkauslujuus

Date : 2011-04-15

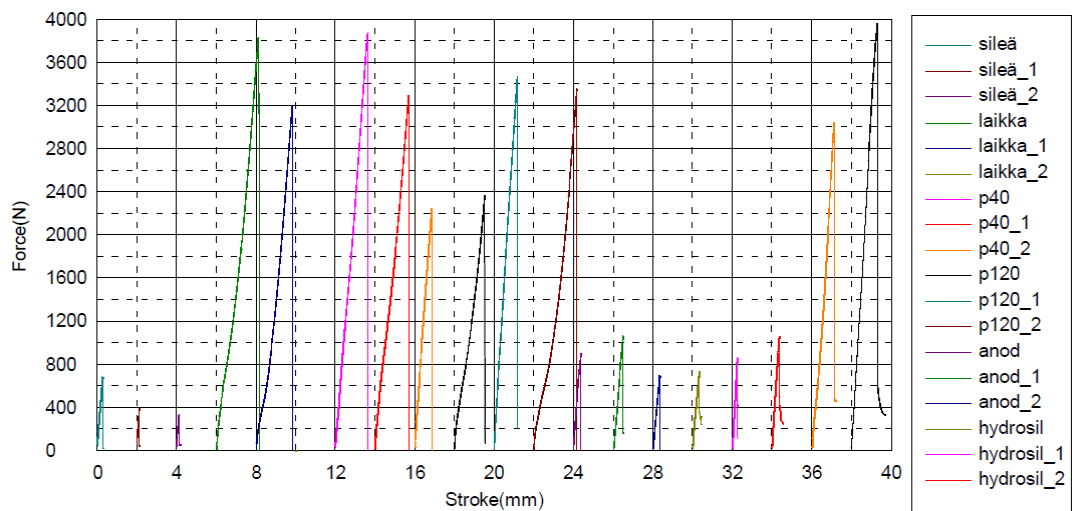
Test Mode :

Single

V1 : 1 mm/min

Shape: Area

| | Area | Gauge Length |
|------------|-----------------|--------------|
| Units | mm ² | mm |
| sileä | 538.2000 | 100.0000 |
| sileä_1 | 520.0000 | 100.0000 |
| sileä_2 | 527.8000 | 100.0000 |
| laikka | 566.8000 | 100.0000 |
| laikka_1 | 1.0000 | 100.0000 |
| laikka_2 | 533.0000 | 100.0000 |
| p40 | 564.2000 | 100.0000 |
| p40_1 | 564.2000 | 100.0000 |
| p40_2 | 522.6000 | 100.0000 |
| p120 | 535.6000 | 100.0000 |
| p120_1 | 556.4000 | 100.0000 |
| p120_2 | 561.6000 | 100.0000 |
| anod | 569.4000 | 100.0000 |
| anod_1 | 538.2000 | 100.0000 |
| anod_2 | 569.4000 | 100.0000 |
| hydrosil | 540.8000 | 100.0000 |
| hydrosil_1 | 494.0000 | 100.0000 |
| hydrosil_2 | 540.8000 | 100.0000 |
| memo | 535.6000 | 100.0000 |
| memo_1 | 491.4000 | 100.0000 |



Vetokokeen mittau tulokset

| | | | |
|--------------------------|---------|---------|---------|
| Minimum | 2371.25 | 1.14900 | 4.42728 |
| anod | 902.500 | .37550 | 1.58500 |
| anod_1 | 1062.50 | .50000 | 1.97417 |
| anod_2 | 692.500 | .33000 | 1.21619 |
| Mean | 885.833 | .40183 | 1.59179 |
| Standard Deviation | 185.562 | .08801 | .37904 |
| Maximum | 1062.50 | .50000 | 1.97417 |
| Minimum | 692.500 | .33000 | 1.21619 |
| hydrosil | 735.000 | .34550 | 1.35910 |
| hydrosil_1 | 861.250 | .24650 | 1.74342 |
| hydrosil_2 | 1055.00 | .36300 | 1.95081 |
| Mean | 883.750 | .31833 | 1.68444 |
| Standard Deviation | 161.182 | .06282 | .30023 |
| Maximum | 1055.00 | .36300 | 1.95081 |
| Minimum | 735.000 | .24650 | 1.35910 |
| memo | 3048.75 | 1.12950 | 5.69221 |
| memo_1 | 3962.50 | 1.30150 | 8.06370 |
| Mean | 3505.63 | 1.21550 | 6.87795 |
| Standard Deviation | 646.119 | .12162 | 1.67690 |
| Maximum | 3962.50 | 1.30150 | 8.06370 |
| Minimum | 3048.75 | 1.12950 | 5.69221 |
| Total Mean | 1969.38 | .90365 | 163.521 |
| Total Standard Deviation | 1410.30 | .72197 | 715.600 |
| Total Maximum | 3962.50 | 2.16500 | 3203.75 |
| Total Minimum | .00000 | .00000 | .00000 |

Vetokokeen mittaustulokset

| Name | Max_Force | Max_Disp | Max_Stress |
|--------------------|-----------|----------|------------|
| Units | N | mm | N/mm2 |
| sileä | 683.750 | .26900 | 1.27044 |
| sileä_1 | 400.000 | .13300 | .76923 |
| sileä_2 | 331.250 | .12500 | .62761 |
| Mean | 471.667 | .17567 | .88909 |
| Standard Deviation | 186.859 | .08093 | .33776 |
| Maximum | 683.750 | .26900 | 1.27044 |
| Minimum | 331.250 | .12500 | .62761 |
| laikka | 3833.75 | 2.10150 | 6.76385 |
| laikka_1 | 3203.75 | 1.81750 | 3203.75 |
| laikka_2 | .00000 | .00000 | .00000 |
| Mean | 2345.83 | 1.30633 | 1070.17 |
| Standard Deviation | 2055.83 | 1.14019 | 1847.74 |
| Maximum | 3833.75 | 2.10150 | 3203.75 |
| Minimum | .00000 | .00000 | .00000 |
| p40 | 3880.00 | 1.63050 | 6.87699 |
| p40_1 | 3291.25 | 1.69100 | 5.83348 |
| p40_2 | 2252.50 | .86600 | 4.31018 |
| Mean | 3141.25 | 1.39583 | 5.67355 |
| Standard Deviation | 824.053 | .45985 | 1.29086 |
| Maximum | 3880.00 | 1.69100 | 6.87699 |
| Minimum | 2252.50 | .86600 | 4.31018 |
| p120 | 2371.25 | 1.53400 | 4.42728 |
| p120_1 | 3466.25 | 1.14900 | 6.22978 |
| p120_2 | 3353.75 | 2.16500 | 5.97178 |
| Mean | 3063.75 | 1.61600 | 5.54295 |
| Standard Deviation | 602.355 | .51294 | .97477 |
| Maximum | 3466.25 | 2.16500 | 6.22978 |