



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Joni Ojala

Lasериin perustuvan puhdistuslaitteen käyttö teräsputkien teollisessa esikäsittelyssä

Opinnäytetyö

Kevät 2023

Insinööri (AMK), Konetekniikka



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

Tutkinto-ohjelma: Insinööri (AMK), Konetekniikka

Suuntautumisvaihtoehto: Kone- ja tuotantotekniikka

Tekijä: Joni Ojala

Työn nimi: Laseriin perustuvan puhdistuslaitteen käyttö teräsputkien teollisessa esikäsittelyssä

Ohjaaja: Juho Yli-Suomu

Vuosi: 2023

Sivumäärä: 43

Liitteiden lukumäärä: 1

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia laserpuhdistuslaitteiston soveltuvuutta teräsputkien mekaanisessa esikäsittelyprosessissa. Työn toimeksiantajana toimi Trailander Oy, joka on toteuttanut mekaanisen esikäsittelyprosessin suljetulla hiekkapuhallusmenetelmällä. Koska uudet puhdistustekniikat kehittyvät nykyisin nopeasti, nähtiin tarpeelliseksi tutkia, voiko laserpuhdistustekniikalla korvata nykyisen hiekkapuhallusprosessin.

Työssä käydään läpi laserpuhdistuksen teoriaa ja laservalon syntyyn liittyviä tekniikoita. Tietoa kerättiin myös muista mekaaniseen esikäsittelyyn liittyvistä tekniikoista, joita pystyttiin vertaamaan pintaprofiilin muokkausasteeseen kohdistetuilla tutkimuksilla. Työssä tuotettiin suuri määrä erilaisilla mekaanisilla esikäsittelymenetelmillä ja laitteistoilla käsiteltyjä koekappaleita. Eri menetelmin käsiteltyjä koekappaleita tutkittiin pinnan karheusmittauksilla, ja siten saatiin taulukoitua materiaalin pintaprofiiliin syntynyt karhentuma. Tutkimuksia jatkettiin koekappaleiden mikroskooppitutkimuksilla, ja näin saatiin tarkasteltua mekaanisten esikäsittelymenetelmien pinnanlaadun eroja visuaalisesti. Koekappaleille suoritettiin jauhemaalauksen jälkeen tartuntavetokokeita, joiden tuloksilla pystyttiin vertailemaan erilaisten mekaanisten esikäsittelymenetelmien tuottamaa maalin tartuntakykyä materiaalin pinnassa.

Tuloksista saatiin selville laserpuhdistustekniikan pystyvän muokkaamaan materiaalin pintaprofiilia yhtä paljon verrattuna hiekkapuhallustekniikkaan. Mikroskooppitutkimusten perusteella oli kuitenkin todettavissa laserpuhdistustekniikan muokkaaman pintaprofiilin olevan kuviotaan harvempi verrattuna hiekkapuhallustekniikkaan. Tämä asia tuli esille myös tartuntavetokokeissa, jossa hiekkapuhalletuille koekappaleille saatiin tulokseksi parhain jauhemaalain tartunta. Laserpuhdistustekniikka oli pintaprofiilia muokkaavassa menetelmässä hiekkapuhallustekniikkaa hitaampi prosessi. Laserpuhdistustekniikka on vielä varsin uusi menetelmä, josta löytyy paljon tunnistamatonta potentiaalia. Laitteistotestien yhteydessä oli huomattavissa laserpuhdistustekniikan tehokkuus ruosteen poistamisessa pintamateriaalia muokkaamattomana menetelmänä.

¹ Asiasanat: lasertekniikka, puhdistus, esikäsittely, hiekkapuhallus

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Degree programme: Mechanical Engineering

Specialisation: Mechanical and Production Engineering

Author: Joni Ojala

Title of thesis: Laser cleaning in the pretreatment of steel pipes

Supervisor: Juho Yli-Suomu

Year: 2023

Number of pages: 43

Number of appendices: 1

The purpose of the thesis was to collect information on the applicability of laser cleaning in the pretreatment of steel pipes. The client of the work was Trailander Oy. Trailander has completed the pretreatment with closed sandblasting. As cleaning techniques developed, there was a need to study if sandblasting could be replaced.

The thesis gathered information about the theory of laser cleaning and laser light. Information was also collected on preprocessing techniques, which were analyzed using surface roughness tests. The thesis produced many test pieces with different pretreatment methods. Test pieces were examined with surface roughness measurements and the results were tabulated. Microscopic examinations were performed on the test pieces. The test compared the quality of the surface visually. Tensile strength tests were performed on the test pieces after powder coating. The results of the study compared the adhesion of the paint on the surface of the piece.

The results suggest that laser cleaning can modify the surface profile of the material as much as sandblasting. A microscopic study found that the surface profile of laser cleaning was smaller than that of sandblasting. Adhesion tensile tests of sandblasted test pieces produced the best powder coating adhesion. Laser cleaning was a slower process than sandblasting. Laser cleaning is a new method with much potential. Tests showed the effectiveness of laser cleaning in rust removal.

¹ Keywords: laser technology, cleaning, preliminary treatment, sandblasting

SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä	2
Thesis abstract	3
SISÄLTÖ	4
Kuva- ja taulukkoluetelo.....	6
Käytetyt termit ja lyhenteet.....	7
1 JOHDANTO	8
1.1 Työn tausta	8
1.2 Työn tavoite.....	8
1.3 Työn rakenne	9
1.4 Yritysesittely	9
2 METALLIMATERIAALIEN PINNAN KÄSITTELEMINEN	11
2.1 Mekaanisena esikäsittelynä suihkpuhdistus.....	11
2.2 Pintakäsittelynä jauhemaalaus.....	12
3 LASERTYÖSTÖTEKNOLOGIA.....	14
3.1 Lasertyöstön historia	14
3.2 Laservalo.....	14
3.3 Laserin käyttö teollisuudessa	15
3.3.1 Laserleikkaus	15
3.3.2 Lasermerkkaus	16
3.3.3 Laserhitsaus.....	16
3.3.4 Laserpintakäsittely	16
3.3.5 Laserpuhdistus.....	16
4 LASERPUHDISTUSTEKNIIKAT.....	18
4.1 DLC-tekniikka	18
4.1.1 CW-laser	18
4.1.2 CL-laser	18
4.1.3 Q-kytkin.....	19
4.1.4 MOPA	19
4.2 WLC-tekniikka	19
4.3 LIP-tekniikka.....	20

5	NYKYTILAN KARTOITUS	21
5.1	Toiminta nyt.....	21
5.2	Ongelmakohdat.....	21
6	LASERPUHDISTUSLAITTEISTOJEN TESTAUKSET	22
6.1	Pyöreän putken pyörityslaitteisto.....	22
6.2	Testien tulokset pyörityslaitteistolla	22
7	PINNANKARHEUSMITTAUKSET	25
7.1	Pinnankarheuden valinta tutkimuskohteeksi	25
7.2	Pinnankarheuden mittauslaitteisto ja R_a -arvo.....	25
7.3	Pinnankarheusmittausten tulokset.....	26
8	PINNANLAADUN MIKROSKOOPPITUTKIMUS.....	28
8.1	Tutkimuslaitteisto.....	28
8.2	Tutkimuksen suorittaminen	28
8.3	Tulokset.....	29
8.3.1	Kylmävalssattu.....	29
8.3.2	Suljettu hiekkapuhallus	30
8.3.3	W2MCW-2000-laserpuhdistuslaitteisto	30
8.3.4	W2MCF-120X MOPA 120W -laserpuhdistuslaitteisto	31
8.3.5	W2MCL-200-laserpuhdistuslaitteisto	32
8.3.6	W2MCF-200X MOPA -laserpuhdistuslaitteisto	32
9	TARTUNTATESTAUKSET	34
9.1	Tartunnan arviointi vetokokeella.....	34
9.2	Vetosauva	35
9.3	Liima.....	36
9.4	Koekappale	37
9.5	Tulokset.....	38
10	YHTEENVETO JA POHDINTA.....	40
10.1	Yhteenveto	40
10.2	Pohdinta	41
	LÄHTEET	42
	LIITTEET	44

Kuva- ja taulukkoluetelo

Kuva 1. Jauhemaalain ruiskutustapahtuma maalausammiossa.....	13
Kuva 2. Gaussian type ja Top-Hat erot.....	15
Kuva 3. Laserpuhdistusmenetelmä.....	17
Kuva 4. Pyöreän putken pyöritys- ja syöttölaitteisto.....	22
Kuva 5. Laserpuhdistuksen tuottaman mekaanisen esikäsitteilyn jälki.....	23
Kuva 6. Mitutoyo SJ-201 pinnankarheuden mittauslaitteisto.....	26
Kuva 7. Teräsputken pinnan tarkastelu Hayve 7” LCD-digitaalimikroskoopilla.....	28
Kuva 8. Kylmävalssatun tehdaspinnan mikroskooppikuva.....	29
Kuva 9. Hiekkapuhalletunputken pinnan mikroskooppikuva.....	30
Kuva 10. W2MCW-2000 pinnan mikroskooppikuva.....	31
Kuva 11. W2MCF-120X MOPA 120W -pinnan mikroskooppikuva.....	31
Kuva 12. W2MCL-200 pinnan mikroskooppikuva.....	32
Kuva 13. W2MCF-200X MOPA -pinnan mikroskooppikuva.....	33
Kuva 14. Tartuntavetokokeen periaate.....	34
Kuva 15. Koekappale kiinnitettynä vetokoneeseen.....	35
Kuva 16. Vetosauvan valmistuskuva.....	36
Kuva 17. Koekappaleen jauhemaalauksen kalvonpaksuusmittaus.....	37
Kuva 18. Tartuntavetokokeessa irronnutta maalipintaa.....	38
Taulukko 1.Pinnankarheusmittausten tulokset.....	27
Taulukko 2. Tartuntavetokokeiden tulokset.....	39

Käytetyt termit ja lyhenteet

CO₂-laser	Hiilidioksidilaser, jonka laservalo muodostetaan helium, typpi ja hiilidioksidi kaasuseoksessa.
CW-laser	Jatkuvatehoinen laserjärjestelmä eli Continuous Wave.
DLC	Laserpuhdistustekniikka, jossa lasersäde suunnataan puhdistettavalle materiaalin pinnalle ilman väliaineita eli Dry Laser Cleaning.
Kuitulaser	Lasersäde muodostetaan erikoisvalmisteisessa optisessa kuidussa, jonka ydin on seostettu laseroivalla väliaineella.
LCD	Nestekidenäyttö eli Liquid-Crystal Display.
LIP	Laser-indusoitu plasmapuuhdistus eli Laser Induced Plasma.
MOPA	Oskillaattorista ja useista vahvistimista rakennettu laserjärjestelmä eli Master Oscillator Power Amplifier.
Nd:YAG-laser	Lasertekniikka, jonka laservalo synnytetään yttrium-aluminium-garnet-kiteessä, jonka laseroivana väliaineena toimiva kiteeseen seostettu alkuaine on nimeltään neodyymi.
Leikkausoksidi	Termisessä leikkaustapahtumassa teräkselle tapahtuva hapettuminen, joka muodostaa irtoavan ohuen kerroksen leikkauspintaan.
Oskillaattori	Sähkötekniikan komponentti, joka tuottaa sähköistä signaalia tietyllä taajuudella.
Skannerioptiikka	Laitteisto, joka ohjaa pistemäistä lasersädettä optiikalle ohjelmoidun kuvion mukaisesti.
WLC	Nestepohjainen laserpuhdistustekniikka eli Wet Laser Cleaning.

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Trailander Oy:n yhtenä valmistusta tukevana tuotantoprosessina on ollut ohutseinämäisen putken pinnan mekaaninen esikäsittely. Mekaanisella esikäsittelyllä pyritään poistamaan materiaalin pinnalta mahdolliset epäpuhtaudet sekä pintaprofilia muokkaamalla luoda parempaa tartuntaa jauhemaalausprosessia varten.

Trailander Oy:ssä ohutseinämäisten putkien mekaaninen esikäsittely on toteutettu suljetulla hiekkapuhallusprosessilla ensimmäisenä työvaiheena. Hiekkapuhallus luo yrityksen tuotannossa haasteita sitä seuraaviin työvaiheisiin, kun käytetty puhallushiekka iskeytyy tiukasti kiinni esikäsitellyn putken pintaan. Yrityksessä on tiedostettu, että hiekkapuhalletun putken pinnalle kiinnittynyt hiekka kuluttaa pitkällä aikavälillä putkentaivutuksessa käytettäviä taivutustyökaluja. Toisena asiana on tiedostettu, että hitsaustyövaiheessa sauman sisään jäänyt hiekka muodostaa suurentuneen riskin huokosille, jotka luetaan hitsausvirheiksi.

Laserpuhdistuslaitteistojen nopeasti kasvavien markkinoiden ja laitteistojen kehityksen vuoksi Trailander Oy:n johdolle syntyi tarve kartoittaa, voiko laserpuhdistustekniikalla korvata nykyisen suljetun hiekkapuhallusprosessin ohutseinämäisten putkien pinnan mekaanisena esikäsittelymenetelmänä. Tarkastelun kohteena arvioitiin laserpuhdistustekniikan soveltuvuutta teollisessa tuotannossa haastamaan nykyistä suljettua hiekkapuhallusprosessia.

1.2 Työn tavoite

Tämän työn tavoitteena on selvittää lasertekniikalla toimivan puhdistuslaitteen soveltuvuutta korvata suljettu hiekkapuhallusprosessi ohutseinämäisten putkien mekaanisena esikäsittelymenetelmänä. Tällä hetkellä laserpuhdistuslaitteistojen markkinoimat käyttökohteet rajoittuvat yleensä ruosteen sekä pinnoitteiden poistamiseen materiaalin pinnalta. Tutkimuksen tarkoituksena on kartoittaa jatkuvasti kehittyvän laserpuhdistustekniikan soveltamista materiaalien esikäsittelymenetelmänä teollisessa tuotannossa.

1.3 Työn rakenne

Teoriaosuuden alussa käsitellään metallimateriaalien pintojen käsittelyä, ja siinä perehdytään pintaa muokkaaviin ja suojaaviin menetelmiin. Pintojen käsittelystä siirrytään tarkastelemaan yleisesti laserteknologiaa sekä laseria käytäviä sovelluksia metalliteollisuudessa. Teoriaosuus päättyy yleisimpien laserpuhdistustekniikoiden esittelyyn.

Varsinainen tutkimusosa alkaa kohdeyrityksen nykytilan kartoituksella, jonka jälkeen siirrytään käsittelemään laserpuhdistuslaitteistoilla suoritettuja kokeita. Seuraavaksi laitteistotesteistä saatuja mekaanisesti esikäsitellyjä koekappaleita vertaillaan pinnankarheusmittauksilla. Mittaustuloksien rinnalle suoritetaan seuraavassa osiossa pinnanlaadun mikroskooppitutkimuksia, joiden perusteella saadaan tehtyä visuaalista kuvavertailua. Tutkimusosan lopussa koekappaleille suoritetaan jauhemaaloin tartuntavetokokeita, joiden perusteella saadaan tuloksia jauhemaaloin tartuntakyvystä materiaalin pintaan.

Työn lopussa esitetään tutkimustulosten perusteella saavutetut lopputulokset. Tuloksia on analysoitu ja niistä on esitetty päätelmiä tutkimuksista tulleiden tulosten pohjalta. Työ päättyy pohdintaan ja ajatuksiin mahdollisten lisätutkimusten painopisteen kohdistamisesta.

1.4 Yritysesittely

Trailander Oy on Seinäjoen Kapernaumin teollisuusalueella toimiva metallialan yritys (Trailander, i.a.-c). Yritys on keskittynyt ohutlevy- ja putkirakenteiden sopimusvalmistukseen sekä strategian mukaisten omien tuotteiden valmistukseen. Toimitusjohtaja E. Viertolan (henkilökohtainen tiedonanto, 19.1.2023) mukaan jatkuvasti laajentuva talousalue luo yritykselle hyvät kasvumahdollisuudet. Hänen mielestään kehittyvä infra parantaa logistisia yhteyksiä sekä houkuttelee uutta potentiaalista työvoimaa alueelle. Tällä hetkellä Trailander Oy työllistää 17 henkilöä.

Yrityksen vahvuus on tarjota asiakkaille kokoonpanovalmiita ohutlevy- ja putkirakenteita aina suunnittelusta alkaen (Trailander, i.a.-a). Trailander Oy:n laaja konekanta mahdollistaa sopimusvalmistuksena tarjottavat ohutlevytoiminnot, laserleikkauksen, särmäyksen, hitsauksen ja jauhemaalauksen. Putkien työstöön yritykseltä löytyy putkilaser sekä CNC-putkentaivutin. E. Viertolan (henkilökohtainen tiedonanto, 19.1.2023) mielestä laaja konekanta luo edellytyksen

joustavalle toiminnalle ja antaa mahdollisuuden tarjota asiakkaalle kokonaisvaltaisen palvelun sekä täsmällisen toimitusajan.

Trailander Oy:llä on pitkä kokemus moottorikelkan- sekä mönkijän perään kytkettävien reki- tuotteiden ja työvälineiden suunnittelusta ja valmistuksesta (Trailander, i.a.-b). Yritys toimittaa henkilönkuljetusrekiä pelastuspalveluiden sekä yritysten ja yksityisten toimijoiden tarpeisiin. Yrityksen oma tuotekehitys kehittää jatkuvasti omia tuotteitaan asiakaskokemuksia kuuntelemalla sekä omaa tuotetestausta hyödyntämällä.

TrailanderShop on yrityksen oma verkkokauppa, jossa on tarjolla laaja tuotevalikoima (TrailanderShop, i.a.). Verkkokaupassa myydään pääasiassa varaosia ja lisävarusteita moottoripyöriin, autoihin ja autourheiluun. Verkkokaupasta on tilattavissa yrityksen valmistamat reki- ja lumituotteet sekä niiden varaosat.

2 METALLIMATERIAALIEN PINNAN KÄSITTELEMINE

2.1 Mekaanisena esikäsitteilynä suihkupuhdistus

Esikäsitteilyllä pyritään käsittelemään materiaalin pinta siten, että pintakäsittely pystytään suorittamaan ongelmitta (Jokinen ym., 2001, s. 30). Materiaalin pinnalla olevat epäpuhtaudet liittyvät yleensä suojaöljyihin, valssihilseeseen sekä ruosteeseen (mts. 31). Tyypillisesti metallituotteiden esikäsitteilyksi riittää kemialliset pesumenetelmät, jotka sisältävät maalin tartuntaa ja materiaalin konversiosuojaa parantavan pinnoitteen (mts. 30).

Mikäli materiaalin pinnalla on sellaista epäpuhtautta, jota pesumenetelmillä ei saada poistettua, vaaditaan mekaanista esikäsitteilyä (Jokinen ym., 2001, s. 60). Mekaanisella esikäsitteilyllä pystytään muokkaamaan materiaalin pintaprofiilia, jonka ansioista muodostetaan suurempi tartuntapinta-ala pintakäsittelyssä käytettävälle pinnoitteelle (mts. 61). Pintakäsittelyn luoma tartunta perustuu esikäsitellyn pinnan puhtauteen, kemiallisiin tartuntapinnoitteisiin sekä materiaalin pintaprofiiliin tartuntapinta-alaan (mts. 30).

Perinteinen ja paljon käytetty mekaaninen esikäsitteilymenetelmä on suihkupuhdistus. Suihkupuhdistuksessa puhdistusrae kohdistetaan paineilman avulla suurella nopeudella puhdistettavan materiaalin pintaan (Jokinen ym., 2001, s. 62). Puhdistusrakeisiin sitoutuu voimaa, jotka irrottavat hiukkasia osuessaan puhdistettavan materiaalin pintaan. Suihkupuhdistus on tehokas ruosteen- ja valssihilseen poistomenetelmä. Suihkupuhdistus muokkaa puhdistettavan kappaleen pintaprofiilia, jolloin pintakäsittelyn tartuntaa saadaan paremmaksi.

Ohuiden materiaalipaksuuksien kohdalla suihkupuhdistusta ei voida käyttää kappaleeseen syntyvien muodonmuutosten vuoksi (Jokinen ym., 2001, s. 60). Ohuiden materiaalipaksuuksien kohdalla suihkupuhdistuksen vaikutuksesta materiaali menettää jäykkyyttään, vaikka vääntymää ei puhdistusprosessissa tapahtuisikaan. Suihkupuhdistusraetta ja puhallusvoimaa muuttamalla pystytään vaikuttamaan materiaaliin kohdistettuun puhdistustehoon. Kuitenkin tasapainottelu muodonmuutoksien estämisen ja tarvittavan pintaprofiilin muokkaamisen kanssa on haastavaa.

Suihkupuhdistuksessa käytettäviä puhdistusraemateriaaleja ovat (Jokinen ym., 2001, s. 62–63):

- luonnonhiekkä
- teräslankakatko
- valurautarakeet
- lasikuulat
- muovirouheet
- hiilidioksidijää
- vesi.

2.2 Pintakäsittelynä jauhemaalauk

Pintakäsittelyllä pyritään luomaan materiaalin pinnalle lisää haluttuja ominaisuuksia (Jokinen ym., 2001, s. 8). Yleensä pintakäsittelyllä parannetaan tuotteen kestävyysominaisuuksia sekä visuaalista ulkonäköä. Pintakäsittelyt nostavat tuotteen valmistuskustannuksia, joten hyödyt tulevat esille vasta pitemmällä aikavälillä. Pintakäsittelyllä pystytään pidentämään tuotteen elinikää, ja materiaalin pinnan puhtaana pitäminen helpottuu oleellisesti.

Jauhemaalauksessa käytettävä maalausjauhe sähkövarataan ruiskutuksen yhteydessä, jolloin jauhe pyrkii tarttumaan sähköisesti maadoitettuun maalattavaan pintaan (Jokinen ym., 2001, s. 120). Maalausjauheella pinnoitettu kappale kuumennetaan noin 200 °C polttouunissa, jolloin maalausjauhe sulaa kappaleen pintaan ja verkottuu yhtenäiseksi kerrokseksi (mts. 120). Noin 15 minuutin uunituksen jälkeen maalattu kappale poistetaan polttouunista, jolloin jäähtymisen aikana maalikalvo kovettuu ja kappaleesta tulee käyttövalmis. Kuvassa 1 on nähtävissä jauhemaalauksen ruiskutustapahtuma maalausammiossa.



Kuva 1. Jauhemaalain ruiskutustapahtuma maalausammiossa (Trailander, 2022).

Jauhemaalauksessa käytetään yleensä metallisten kappaleiden maalausmenetelmänä (Vantaan teollisuusmaalaamo, i.a.). Jauhemaalauksessa on hankittavana materiaalina edullista ja maalausprosessi kokonaisuudessaan varsinkin levytuotteiden kohdalla helppo. Valmis jauhemaalattu pinta kestää erittäin hyvin mekaanista rasitusta sekä voimakkaita ja teräviä iskuja. Jauhemaalauksessa on saatavilla erilaisilla sideaineilla, jotka sisältävät keskenään erilaisia ominaisuuksia kemiallista, mekaanista ja UV-säteilyn rasitusta vastaan.

Yleisimmät jauhetyyppien sideaineet ovat (Jokinen ym., 2001, s. 123–124; Vantaan teollisuusmaalaamo, i.a.):

- epoksi
- polyesteri
- epoksipolyesteri
- sinkkipöly
- polyuretaani
- silikoni.

3 LASERTYÖSTÖTEKNOLOGIA

3.1 Lasertyöstön historia

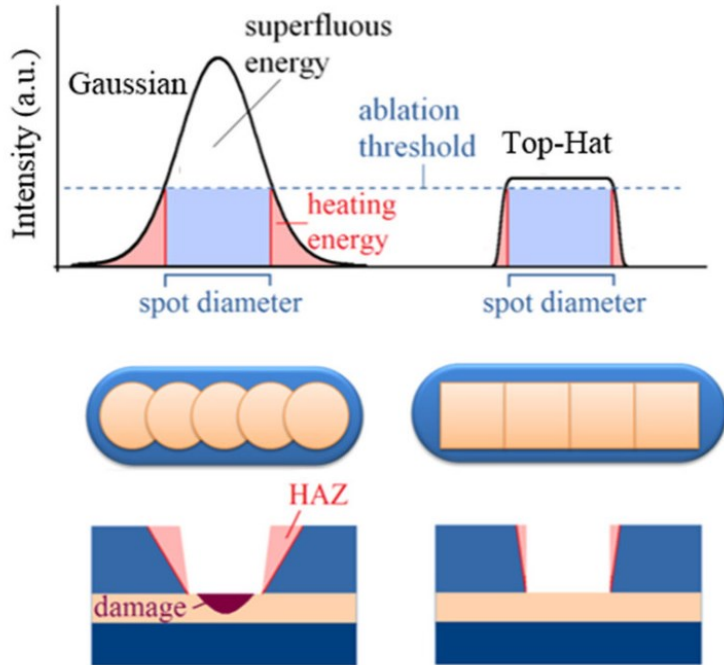
Teollisuuden historiaa tarkasteltaessa lasertyöstö on ollut yksi nopeimmin kasvaneista ja kehittyneistä tekniikan aloista (Kujanpää ym., 2005, s. 12). Lasertekniikan ensimmäiset sovellukset konepajoihin tulivat 1970-luvulla. Lasertekniikan hiljalleen kehittyessä alkoi markkinoille tulla 1990-luvulla uusia monipuolisia lasertyyppisiä, jotka laajensivat huomattavasti tekniikan käyttösovelluksia. Tästä alkoi nopea lasertekniikan yleistyminen yhdistettynä samanaikaiseen tietotekniikan ja automaation kehitykseen, joka auttoi lasertekniikan käyttöönottoa erilaisiin sovelluksiin. Suosituimmat konepajalaserit käyttivät aluksi lasersäteen muodostuksessa CO₂- ja Nd:YAG -tekniikkaa. Nykyisin suosituin ja yleistyvin lasertyyppi on kuitulaser, jonka nopea kehitys ja suosio on johtanut laitetoimittajien väliseen kilpailuun jatkuvasti tehokkaampien laitteistojen julkaisemiseksi (mts. 54). Kuitulaserin kehitystä ovat tukeneet tietoliikennetekniikan innovaatiot, kun optisen kuidun keksiminen toi myös lasertekniikkaan mainion apuvälineen tehon siirtämiseksi (mts. 16).

3.2 Laservalo

Laservalo luokitellaan lähes täysin yhdensuuntaiseksi optiseksi säteilyksi (Pastila, 2009, s. 42). Samansuuntaisuuden vuoksi laservalo etenee hyvin kapeana säteenä, jolloin pieneksi keskitettyyn pisteeseen saadaan luotua suuri energia. Laservalo on yksiväristä eli sillä on yksi aallonpituus (Kujanpää ym., 2005, s. 35). Aallonpituus on säteenmuodostuksessa laseroivasta väliaineesta johtuva ominaisuus. Laservalo on tyypiltään samanvaiheista, ja se eroaa tämän vuoksi ominaisuuksiltaan normaalista valosta (mts. 36). Samanvaiheisuuden ansiosta laservalon lähettämät aallot vahvistavat toisiaan, ja se saa aikaan keskitetylle laser-säteelle suuren energian.

Lasersäteen profiiliin tyyppiä on mahdollista muuttaa muotoiluoptyikan avulla (Rung ym., 2014). Gaussian type -säteen vaikutusalue materiaaliin on ympyrän muotoinen piste, jonka keskipisteessä on suurin energia. Tämä aiheuttaa säteen tehon hallittavuudessa haasteita, mikäli kyseessä ei ole leikkaustoimenpide. Muotoiluoptyikalla tuotettu Top-Hat-säde on suorakaiteen muotoinen, jolloin säteen vaikutukset kohdistettuun materiaaliin on helpommin hallittavissa. Top-Hat-säteen tasainen energia-alue tuo mahdollisuuden hallita materiaaliin

kohdistuvaa lämpökuormaa tarkemmin. Kuvassa 2 on vertailtu normaalia laserlähteen tuottamaa Gaussian type -sädettä sekä muotoiluoptiikalla luotua Top-Hat-sädettä.



Kuva 2. Gaussian type ja Top-Hat erot (Rung ym., 2014).

3.3 Laserin käyttö teollisuudessa

Lasersädettä käytetään hyväksi teollisuudessa materiaalien työstämisessä, jossa vaaditaan menetelmältä suuria tehoja ja laadukasta tarkkuutta (Kujanpää ym., 2005, s. 15). Lasersäde on erittäin monipuolinen ja hyvin hallittava lämmönlähde, ja sille kehitetään jatkuvasti uusia käyttökohteita ja sovellustapoja (mts. 21). Lasertyöstön tarkan lämmöntuonnin takia on mahdollista valmistaa kappaleita, joista on pystytty rajaamaan lopputuotteen materiaalitekniisten ominaisuuksien muuttuminen.

3.3.1 Laserleikkaus

Suomalaisessa metalliteollisuudessa laserleikkaus on vakiinnuttanut oman paikkansa ja sitä käytetään hyvin yleisesti materiaalien leikkaamiseen (Kujanpää ym., 2005, s. 15). Laserleikkaus on terminen prosessi, jossa lasersäde sulattaa leikattavan materiaalin, ja voimakkaalla leikkauskaasuvirtauksella sula materiaali puhalletaan pois leikkausrailosta (mts. 21). Laserleikkaus on korvannut aiemmin yleisesti käytetyn lävistämisen metallimateriaalien leikkaamisessa laserleikkauksen laajojen käyttömahdollisuuksien takia (mts. 22).

3.3.2 Lasermerkkkaus

Lasermerkkkaus on teollisuudessa laajasti käytetty lasertyöstöprosessi (Trumpf, i.a.-a). Lasermerkkauksella merkitään tyypillisesti päivämääriä, tuotekoodoja tai myöhempää jäljitettävyyteen tarvittavia merkintöjä tuotteisiin. Lasermerkkausta pystytään toteuttamaan useille materiaaleille eri väri vaihtoehtoilla. Lasermerkkauksen etuna on merkinnän pysyvyys kappaleessa sekä joustavuus valitun paikan ja mallin suhteen. Myös laserleikkauksen yhteydessä pystytään tekemään kaiveruksia kappaleisiin rajoittamalla säteen tuottamaa tehoa, jolloin erillistä lasermerkkaustyövaihetta ei tarvita.

3.3.3 Laserhitsaus

Laserhitsauksessa lasersäde kohdistetaan hitsattavan kappaleen pintaan, jolloin polttopiste sulattaa liitoksen ympäröivää materiaalia (Kujanpää ym., 2005, s. 24). Laserhitsauksen onnistumisen haasteena on vaatimukset tarkasta hitsausrailon geometriasta, joka saavutetaan yleensä vain koneistamalla (mts. 23). Laserhitsauksessa voidaan tarpeen vaatiessa käyttää lisäainetta, jolla pystytään täyttämään mahdolliset ilmaraot hitsausrailossa (mts. 24). Laserhitsauksen käytön lisääntymisen haasteena on se, että Suomen konepajateollisuus on pääosin keskittynyt piensarjavalmistamiseen (mts. 15). Laserhitsaus vaatii pitkälle vietyä sarjatuotantoa, jolloin sen tuomat edut saadaan kunnolla tuotua esille.

3.3.4 Laserpintakäsittely

Laserilla suoritetaan pintakäsittelyjä, jonka tarkoituksena on parantaa materiaalin pinnan ominaisuuksia (Trumpf, i.a.-b). Laserilla suoritettavat pintakäsittelyt perustuvat lasersäteellä tapahtuvaan nopeaan kuumennukseen ja sitä seuraavaan nopeaan jäähdytykseen, jolloin materiaalin pinnassa tapahtuu metallurgisia reaktioita. Reaktion takia käsitellylle materiaalin pinnalle pystytään saavuttamaan kovuutta sekä kulutuksen- ja korroosionkeston ominaisuuksia.

3.3.5 Laserpuhdistus

Laserpuhdistusta käytetään tyypillisimmin materiaalipintojen epäpuhtauksien, pinnoitteiden ja leikkausoksidien poistoon (Ionix, i.a.). Laserpuhdistusmenetelmässä ei käytetä mitään puhdistusaineita tai muita kemikaaleja, vaan tekniikka perustuu pelkästään lasersäteen tuottamaan puhdistustehoon. Laserpuhdistusmenetelmä on hyvin hellävarainen ja soveltuu sen

vuoksi ohuiden ja hauraiden materiaalien puhdistukseen, joille suihkupuhalluksessa tapahtuisi muodonmuutosta. Laserpuhdistus on vielä hyvin uusi menetelmä Suomessa, jolloin sen kaikkia mahdollisia käyttökohteita ei ole vielä osattu kunnolla tunnistaa (KP Laser, i.a.-a).

Laserpuhdistuksessa skannerioptiikalla ohjattu lasersäde kohdistetaan työkappaleeseen, jolloin pintamateriaalia poistuu lasersäteen höyrystämänä sekä lämpöjännityksen aiheuttaman paineaallon vaikutuksesta (Ionix, i.a.). Kuvassa 3 on nähtävissä, kuinka nopeasti toimiva skannerioptiikka levittää pistemäisen lasersäteen leveälle alueelle ohjauslaitteelle ohjelmoidun kuvion mukaisesti. Laserpuhdistuslaitteistolla pystytään hallitsemaan lasersäteen tehoa, jolloin puhdistusvaikutus materiaalinpintaan saadaan rajattua tarkasti (Ionix, i.a.). Tämän takia laserpuhdistuksella pystytään poistamaan esimerkiksi pintamaali käsiteltävästä tuotteesta vahingoittamatta pohjamaalia lainkaan (KP Laser, i.a.-a). Säteen tehoa rajoittamalla puhdistettavan materiaalin pintaan ei kohdistu merkittävää lämpörasitusta, jolloin materiaalin muodonmuutoksilta vältytään.



Kuva 3. Laserpuhdistusmenetelmä.

Laserpuhdistusta pystytään käyttämään erilaisten pintojen esikäsitteilymenetelmänä pintakäsittelyä varten (KP Laser, i.a.-b). Laserpuhdistuslaitteistolla pystytään muokkaamaan materiaalin pintaprofiilia karheammaksi, jolloin tartuntapinta-alan lisääntyessä pintakäsittelyssä maali saadaan tarttumaan mekaanisesti esikäsiteltyyn pintaan lujemmin.

4 LASERPUHDISTUSTEKNIIKAT

4.1 DLC-tekniikka

Kuivalaserpuhdistuksessa (eng. *Dry Laser Cleaning, DLC*) lasersäde suunnataan puhdistettavalle materiaalin pinnalle ilman väliaineita (Kohli & Mittal, 2011, s. 68). DLC-tekniikka on ollut historian ensimmäinen laseria hyväksi käytävä puhdistusmenetelmä. DLC-tekniikassa jatkuvatehoista tai lyhyt pulssista lasersädettä kohdistetaan puhdistettavalle pinnalle ilman väliaineita. Korkeataajuinen pulssitus synnyttää kappaleen pinnalla nopeaa lämpölaajenemista, joka aiheuttaa sen, että hiukkaset irtoavat puhdistettavalta pinnalta. DLC-tekniikkaa käytetään laajalti teollisuudessa, ja se on käytössä tämän työn kaikissa laserpuhdistussovelluksissa. Yleinen tässä tekniikassa kohdattava ongelma on puhdistustehon asteittainen menetytys, kun irronneet hiukkaset peittävät puhdistettavan pinnan kesken puhdistusprosessin (mts. 68).

4.1.1 CW-laser

W2M Industries Oy:n yrittäjän J. Tammisen (henkilökohtainen tiedonanto, 13.2.2023) mukaan laserjärjestelmää, jonka ulostuleva säde on jatkuva ja tasatehoinen, kutsutaan *jatkuvan säteen laseriksi* (eng. *Continuous Wave, CW*). Hänen mielestään CW-lasertekniikan edut puhdistuslasereissa tulevat esiin parhaiten raskaassa maalin poistossa. Tammisen mukaan CW-lasertekniikan ominaisuutena on voimakkaasti kohdistuva lämmöntuotto materiaalin pintaan, jolloin syntynyt lämpö kaasuunuttaa maalimaisia pinnoitteita tehokkaasti.

4.1.2 CL-laser

J. Tammisen (henkilökohtainen tiedonanto, 13.2.2023) mukaan aito ja alkuperäinen pulssilaser W2M Industries Oy:n omalla tuotenimellä on CL-laser. Tammisen mukaan CL-laserin tuottama jälki on hyvin sileää, joten se soveltuu esimerkiksi ruostumattomien teräsmateriaalien puhdistamiseen. Tamminen kertoo CL-laserin tuottaman Gaussian type -säteen takia sen fokusikkunan olevan kapea, jolloin säteen käsitteleminen on tarkkaa mahdollisimman hyvän puhdistustehon saavuttamiseksi.

4.1.3 Q-kytkin

Jatkuvatehoista lasersädettä on mahdollista pulssittaa *Q-kytkimellä* (eng. *Q-switching*), jolloin saadaan nostettua säteen tuomaa energian määrää lyhyen aikajakson ajan (Kujanpää ym., 2005, s. 40). Q-kytkin toimii laserjärjestelmässä erittäin nopeana sulkimena, joka tuottaa säteelle jatkuvia ja äkillisiä tehopiikkejä. Q-kytkimen suljin on optinen kide, joka on yleensä materiaaliltaan kvartsia. Laserin Q-kytkinlaitteistolla pystytään nostamaan jatkuväsäteisen laserlähteen tehoa merkittävästi pulssituksen ansiosta.

4.1.4 MOPA

Kun laserjärjestelmä rakennetaan oskillaattorista ja useista vahvistimista kutsutaan kokonaisuutta *MOPA*-tekniikaksi (eng. Master Oscillator Power Amplifier, MOPA) (Faccini ym., 2012, s. 71). MOPA-tekniikalla luotuja hyvin suuritehoisia ultralyhyitä pulsseja pystytään tuottamaan suurella toistonopeudella, jolloin lasersäteestä saadaan hyvin laadukasta ilman ylimääräisiä suodatustekniikoita. J. Tammisen (henkilökohtainen tiedonanto, 13.2.2023) mukaan esimerkiksi teholähteeltään 200W MOPA-laitteistolla pystytään tuottamaan materiaalin pintaan 2.8kW tehoisia pulsseja 120kHz taajuudella. Tällöin yhden pulssin kesto on äärimmäisen lyhyt, vaikka pulssin tuottama teho on verrattain suuri. Tämän takia materiaalin pintaan kohdistuva lämpövaikutus pysyy varsin pienenä. Tammisen mukaan MOPA-tekniikalla luotu säde on hyvin tyypillisesti profiililtaan Top-Hat-mallinen, jolloin sen käsiteltävyys puhdistustoimpiteessä on helpompaa. Tästä syystä säteen tuoma täysi potentiaali saadaan käyttöön, jolloin puhdistusteho saadaan maksimoitua.

4.2 WLC-tekniikka

Nestepohjaisessa laserpuhdistuksessa (eng. *Wet Laser Cleaning, WLC*) nestemäistä väliainetta käytetään lisäämään materiaalin hiukkasiin kohdistettuja voimia, jolla saadaan parannettua laserin puhdistustehokkuutta (Kohli & Mittal, 2011, s. 69). WLC-tekniikan hiukkasten poistoteho puhdistettavalta pinnalta perustuu ohuen nestekalvon räjähtävään höyrystymiseen lasersäteilytyksen vaikutuksesta. Nestekalvon räjähtävä höyrystyminen muodostaa kuplien kasvua nesteen ja kiinteän aineen rajapinnassa, jolloin reaktiosta muodostuva voima irrottaa puhdistettavalta pinnalta hiukkasia. WLC-tekniikka vaatii yleensä hiukkasten poistamiseen pienempää tehoa laserilta, mutta nesteiden levittäminen puhdistettavalle alustalle ei välttämättä aina ole käytännöllistä.

4.3 LIP-tekniikka

Laser-indusoidussa plasmapuhdistuksessa (eng. *Laser Induced Plasma, LIP*) ilmassa tarkennettu lyhytpulssinen suurienerginen infrapunalaserasäde kohdistetaan puhdistettavan materiaalin pintaan käyttämällä kuperaa linssiä (Kohli & Mittal, 2011, s. 69). LIP-tekniikassa infrapunalaserasäde muodostaa puhdistettavalle pinnalle nopeasti laajenevan plasmaytimen. Plasmaytimen koko laajenee niin pitkään, kunnes se saavuttaa kylläisen pisteensä, jolloin plasmaydintä ympäröivä paineilma synnyttää voimakkaan iskuaallon. Iskuaallon seurauksena puhdistettavalta pinnalta irtoaa hiukkasia, johon LIP-tekniikan puhdistusteho perustuu.

5 NYKYTILAN KARTOITUS

5.1 Toiminta nyt

Trailander Oy on pitkän kokemukseräisen tutkimuksen kautta todennut ohutseinämäisten teräsputkien pinnan esikäsittelyn tarpeelliseksi toimenpiteeksi omassa tuotannossaan. Tarve esikäsittelylle on syntynyt yrityksen strategianmukaisten omien lumituotteiden kautta, joiden jauhemaalattu teräspinnat altistuvat käytössä vaativille olosuhteille. Tällöin tärkeään rooliin nousee jauhemaalain tartunta, jolla varmistetaan pitkään kestävä materiaalien korroosionsuojaus sekä visuaalinen ulkonäkö. Jauhemaalain hyvä tartunta on toteutettu materiaalin pintaprofiilin karhentamisella sekä pintojen epäpuhtauksien poistamisella. Yritys on täyttänyt syntyneen mekaanisen esikäsittelyn tarpeen käyttämällä suljettua hiekkapuhallusprosessia.

5.2 Ongelmakohtat

Trailander Oy:n tuotannossa suljetun hiekkapuhalluksen ongelmana on, että hiekkapuhallusprosessi jättää putken pinnalle puhallushiekkaa, joka luo ongelmia seuraavien työvaiheiden suorittamiseen. Suljetun hiekkapuhalluksen jälkeen putkea yleensä taivutetaan, jolloin pinnalla oleva puhallushiekka aiheuttaa putken taivutustapahtumassa ylimääräistä kulumaa taivutustyökaluille.

Putken pinnalla oleva puhallushiekka on hitsausprosessissa epäpuhtautta, joka aiheuttaa suurentuneen vaaran hitsauksessa huokosen muodostumiselle (Uusitalo, 2012, s. 3). Huokokset aiheutuvat hitsin sisään jääneistä kaasusta, jotka ilmenevät hitsisaumassa kuplamaisina reikinä (Lepola & Makkonen, 1998, s. 116). Hitsauksen täydelliselle onnistumiselle on tärkeää saada hitsattavalta alueelta ja sen ympäristöstä kaikki hitsausprosessia häiritsevät epäpuhtaudet poistettua.

6 LASERPUHDISTUSLAITTEISTOJEN TESTAUKSET

6.1 Pyöreän putken pyöritys- ja syöttölaitteisto

Testeissä on käytetty hyväksi suljettuun hiekkapuhallukseen kehiteltyä putken pyöritys- ja syöttölaitteistoa, joka on esitetty kuvassa 4. Pyöreän putken pyöritys- ja syöttölaitteistolla on pystytty testauksissa jäljittelemään tilannetta, jossa laserpuhdistuslaitteiston puhdistuspää on paikallaan ja putki kulkee tasaisella pyörivällä syötöllä läpi koko mittansa. Tällä tavoin tekniikka toimisi myös automatisoidussa sovelluksessa, jota laserpuhdistuslaitteistolta putkien esikäsittelymenetelmänä vaadittaisiin väistämättä teollisessa tuotannossa. Laserpuhdistuslaitteiston puhdistuspää pystyttäisiin automatisoidussa tapauksessa sijoittamaan suljettuun kaappiin, jolloin savunpoisto saataisiin järjestettyä tehokkaasti.



Kuva 4. Pyöreän putken pyöritys- ja syöttölaitteisto.

6.2 Testien tulokset pyörityslaitteistolla

Laserpuhdistuslaitteistojen testauksissa vertailtiin neljää erilaista W2M Industries Oy:n markkinoimaa laitetta, joiden toiminta perustui CW-, CL- ja MOPA-tekniikkaan.

W2M Industries Oy:n markkinoimat testauksessa käytetyt laitteistot olivat:

- W2MCW-2000 Kuitulaser puhdistuslaite (2 KW)
- W2MCF-120X Kuitulaser puhdistuslaite (MOPA 120W)
- W2MCL-200 Kuitulaser puhdistuslaite (200W)

- W2MCF-200X Kuitulaser puhdistuslaite (MOPA 200W).

Laserpuhdistuslaitteistoilla ajettiin testejä useilla eri asetuksilla, joilla päästiin vertailemaan saatuja tuloksia. Suljetun hiekkapuhalluslaitteiston pyöritys- ja syöttönopeus pyrittiin säätämään siten, että lasersäteen tuottaman puhdistusalueen hyöty olisi putken pyörähdyksellä mahdollisimman suuri. Kuvassa 5 on nähtävissä, että sopivalla pyöritys- ja syöttönopeudella ajettaessa laserpuhdistuksen tuottama mekaaninen esikäsittely putken pintaan on tasalaatuista.



Kuva 5. Laserpuhdistuksen tuottaman mekaanisen esikäsittelyn jälki.

Testien perusteella oli todettavissa, että pyörityslaitteistoa apuna käyttämällä laserpuhdistuslaitteisto pystyy korvaamaan menetelmätasolla suljetun hiekkapuhalluksen. Tarkastelussa ilman apuvälineitä on todettavissa laserpuhdistuksen tuottaman jäljen olevan tasalaatuista, ja materiaalin pinta on selkeästi karhentunut.

Seuraavat muokattavat asetukset vaikuttavat laserpuhdistuslaitteistojen mekaanisen esikäsittelyn tuottamaan jälkeen:

- laitteen syöttämä lasersäteen teho
- lasersäteen kuvio
- pulssitaajuus
- kuvion nopeus.

J. Tammisen (henkilökohtainen tiedonanto, 13.2.2023) mukaan laserpuhdistuslaitteiston tehoa säätämällä pystytään vaikuttamaan puhdistusnopeuteen ja mekaanisen esikäsittelyn

tuottamaan pinnankarheuteen. Lasersäteelle luotu kuvio toteutetaan skannerioptiikalla laserlähteen sisällä, jolloin saavutettavan työalueen kokoa hallitaan peilien avulla. Pulssitaajuuden merkityksen ymmärtämistä voidaan verrata hiekkapaperin karheutta ilmaisevaan P-lukuun: mitä suurempaa pulssitaajuuden arvoa käytetään, sitä tasaisempi jälki saadaan mekaanisella esikäsitteilyllä toteutettua, selventää Tamminen vertaustaan. Tammisen mukaan säteen tuottama kuvio luodaan yhdellä laserpisteellä, joka liikkuu skannerioptiikalle säädetyllä nopeudella. Liikkumisnopeutta voidaan säätää maksimiarvon ollessa W2M Industries Oy:n laitteissa tällä hetkellä 13 000 mm/s. Laserpisteen liikkumisnopeus vaikuttaa pinnan karheuteen, työsaavutukseen sekä mekaanisesti esikäsitellyn pinnan homogeenisuuteen. Laserpisteen hitaampi liikkumisnopeus kairaa materiaalin pintaa tekemällä syvemmän mekaanisen esikäsitteilyn. Tammisen mielestä laserpisteen liikkumisnopeus olisi optimaalisinta säätää polttimen kuljetusnopeuden kanssa, joka ei ole kuitenkaan vakioitavissa liikutettaessa poltinpäätä käsivaralta.

7 PINNANKARHEUSMITTAUKSET

7.1 Pinnankarheuden valinta tutkimuskohteeksi

Laserpuhdistuslaitteen soveltuvuutta ohutseinämäisten putkien esikäsitteilymenetelmäksi päätettiin selvittää vertailemalla materiaalien pinnankarheuksia. Vertailukohdiksi valittiin Trailander Oy:ssä päivittäin käytettäviä materiaaleja, joista on kertynyt kokemusperäistä tietoa pitkältä aikaväliltä jauhemaalien pinyvyuden näkökulmasta. Trailander Oy:n päivittäisessä tuotannossa käsitellään suurimmaksi osaksi teräsmateriaaleja, jotka saapuvat tukkureilta kylmä- tai kuumavalssatulla tehdaspinnalla. Materiaaleja jalostetaan lopputuotteeksi asiakkaalle läpi Trailander Oy:n tuotannon aina pintakäsittelynä suoritettavaan jauhemaalaukseen asti.

Käyttökokemusten perusteella kylmä- tai kuumavalssattu pinta ei luo riittävää tartuntapintaa jauhemaalille vaativissa olosuhteissa, jolloin laserpuhdistuslaitteen tekemää pinnankarheutta pystytään luotettavasti vertaamaan näihin tukkureilta toimitettaviin tehdaspintoihin. Paremman tartunnan saamiseksi vaaditaan materiaalin pinnalle mekaanista esikäsitteilyä (Jokinen ym., 2001, s. 60). Materiaalin pintaprofiilia karhentamalla saadaan muodostettua suurempi tartuntapinta-ala jauhemaalaukselle, jolloin maalin suojaava ominaisuus vaativissa olosuhteissa parantuu (mts. 61).

7.2 Pinnankarheuden mittauslaitteisto ja R_a -arvo

Pinnankarheusmittaukset suoritettiin Seinäjoen ammattikorkeakoulun konelaboratoriossa käyttämällä Mitutoyo SJ-201 pinnankarheusmittauslaitteistoa, joka on esitetty kuvassa 6. Pintaprofiilia mittaavaa laitetta kutsutaan osoittavaksi indikaattoriksi, jonka toiminta perustuu materiaalin pintaa pitkin laahaavan timanttikärjen luomaan profiilikäyrään (Keinänen & Järvinen, 2014, s. 108). Mitattu profiilikäyrä tallentuu indikaattoriin liitettyyn ohjainlaitteeseen, jonka laskeintaohjelma tuottaa pinnankarheuden mitta-arvot (mts. 109).



Kuva 6. Mitutoyo SJ-201 pinnankarheuden mittauslaitteisto.

Mittauksissa käytettiin R_a -arvoa, joka soveltuu hyvin pintaprofiilien keskinäiseen vertailuun (Keinänen & Järvinen, 2014, s. 107). R_a -arvo ilmaisee pinnan profiilipoikkeamien keskiarvon, jonka tulos ilmoitetaan mikrometreissä. Metalliteollisuudessa R_a -arvo on standardisoitu karheuden perussuure, joka on vakiinnuttanut paikkansa yleisimpänä esitystapana pinnankarheuden merkitsemiseen. Pelkästä R_a -arvosta ei pystytä kuitenkaan tulkitsemaan, ovatko pinnan suurimmat profiilipoikkeamat pykäliä vai naarmuja.

7.3 Pinnankarheusmittausten tulokset

Pinnankarheusmittausten tuloksissa vertaillaan mekaanisten esikäsittelyjen vaikutusta materiaalin pintaprofiiliin. Mittauksissa on painotettu tässä työssä tutkittavana olevalla laserpuhdistuslaitteistolla tehtyjä mekaanisia esikäsittelytestejä. Taulukkoon 1 on kerätty eri mekaanisista esikäsittelymenetelmistä saatuja pinnankarheusmittauksia, joita pystytään käyttämään vertailukohtana laserpuhdistuslaitteistolle.

Taulukko 1.Pinnankarheusmittausten tulokset.

Materiaali	Vahvuus / koko (mm)	Esikäsitteily	R_a-keskiarvo (µm)	Mittaustulosten lukumäärä
S235 teräslevy	1.5	kylmävalssaus	1.2	3
S355 teräslevy	5	kuumavalssaus	1.5	3
S780 teräsputki	40x1.25	kylmävalssaus	0.8	3
S780 teräsputki	40x1.25	suljettu hiekkapuhallus	1.6	3
S780 teräsputki	40x1.25	laserpuhdistus W2MCW-2000	0.9	15
S780 teräsputki	40x1.25	laserpuhdistus W2MCF-120X MOPA	1.0	18
S780 teräsputki	40x1.25	laserpuhdistus WCL200W	1.5	6
S780 teräsputki	40x1.25	laserpuhdistus W2MCF-200X MOPA	1.6	33

Mittaustulosten lukumäärä laserpuhdistuslaitteistojen kohdalla johtuu suuresta määrästä ajettuja testejä, joista on haluttu taltioida kyseisellä menetelmällä saatu pinnankarheus. Testejä on suoritettu neljällä laserpuhdistuslaitteistolla erilaisilla tehoilla ja poltinkulmilla. Tehon- ja poltinkulmien muutokset on pyritty suorittamaan testaustilanteessa mahdollisimman identtisesti laitteiden välillä. Tällöin laitteistojen soveltuvuutta mekaanisena esikäsitteilymenetelmänä pystytään vertaamaan keskenään.

8 PINNANLAADUN MIKROSKOOPPITUTKIMUS

8.1 Tutkimuslaitteisto

Tutkimuslaitteistona mikroskooppikuvauksissa käytettiin Hayve 7” LCD-digitaalimikroskooppia. Hayven digitaalimikroskooppi kykenee tuottamaan 10-kertaisen suurennoksen, jonka linseillä tarkennettu kuva on tarkasteltavissa 7 tuuman LCD-näytöltä (Hayve, i.a.). Hayven digitaalimikroskooppi mahdollistaa ottamaan tutkittavasta kohteesta 12MP valokuvia tai 1080P -laatutasoista videota. Hayven digitaalimikroskooppi on kytkettävissä Windows- ja Mac-käyttöjärjestelmään, jolloin mikroskoopin käyttäminen onnistuu myös tietokoneen kautta.

8.2 Tutkimuksen suorittaminen

Mikroskooppitutkimuksessa tarkasteltiin mekaanisten esikäsittelymenetelmien tuottamaa jälkeä materiaalin pinnalle. Kuvassa 7 suoritetaan mikroskooppitutkimusta laserpuhdistuslaitteistolla esikäsiteltyyn 40x1.25 mm S780 teräsputkeen. Mikroskooppitutkimuksessa kuvaukset suoritettiin samoihin tutkimuskohteisiin, joista taulukoitiin pinnankarheusmittaukset.



Kuva 7. Teräsputken pinnan tarkastelu Hayve 7” LCD-digitaalimikroskoopilla.

8.3 Tulokset

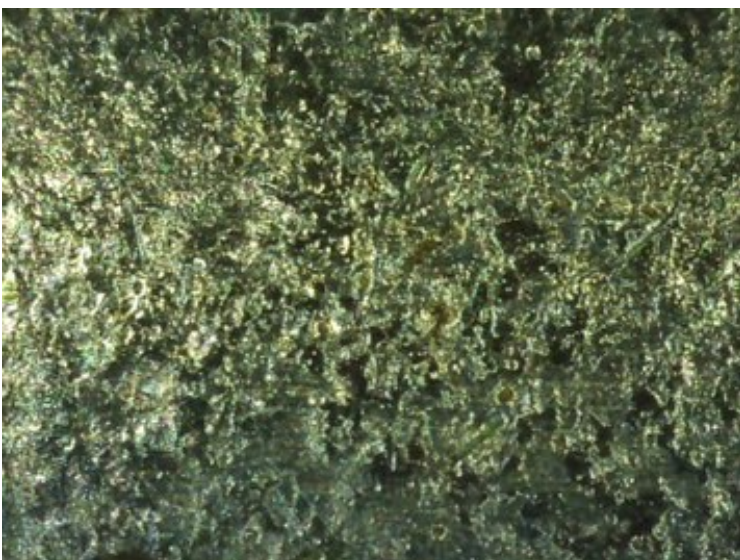
Mikroskooppitutkimuksessa otettuja kuvia on järkevää vertailla pinnankarheusmittauksiin, jolloin pystytään paremmin tulkitsemaan R_a -arvoa. Kaikissa mikroskooppitutkimuksissa käytettiin 40x1.25 mm S780 teräsputkea, jonka kuvattavaan pintaan oli suoritettu eri esikäsittelymenetelmä.

Mikroskooppitutkimuksessa kuvamateriaalia kerättiin seuraavista esikäsitellyistä teräspinoista:

- kylmävalssattu
- suljettu hiekkapuhallus
- laserpuhdistus W2MCW-2000
- laserpuhdistus W2MCF-120X MOPA
- laserpuhdistus W2MCL200W
- laserpuhdistus W2MCF-200X MOPA.

8.3.1 Kylmävalssattu

Kuvassa 8 on mikroskooppikuvattuna kylmävalssattu tehdaspinta, jonka R_a -keskiarvo pinnankarheusmittauksissa on ollut 0.8 μm . Matala R_a -keskiarvo kertoo, että materiaalin pintaprofiili on tasainen, ja se on nähtävissä myös materiaalille suoritettun mikroskooppikuvan perusteella.



Kuva 8. Kylmävalssatun tehdaspinnan mikroskooppikuva.

8.3.2 Suljettu hiekkapuhallus

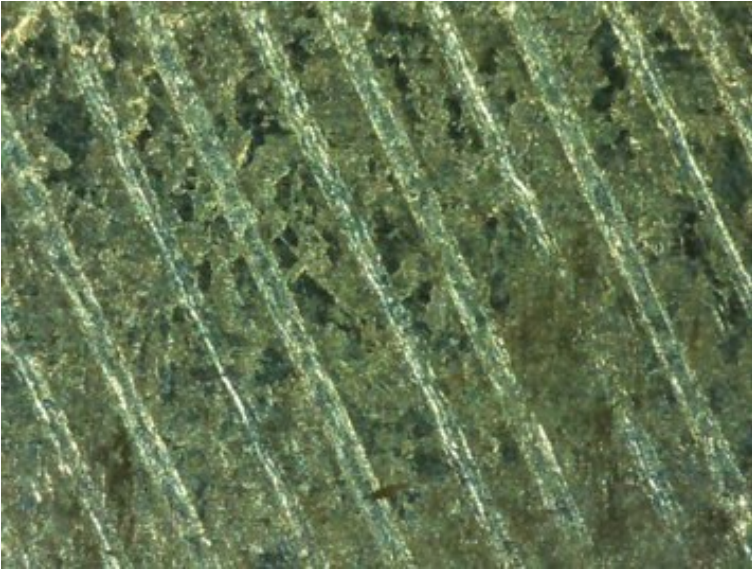
Suljettu hiekkapuhallus esikäsitteilymenetelmänä muodostaa teräsputken pintaan tasaisen karhennuksen, joka on nähtävissä kuvassa 9. Hiekkapuhalletun putken R_a -keskiarvo oli pinnankarheusmittauksissa $1.6 \mu\text{m}$. On huomattava, että putken pinta muuttuu hiekkapuhalluksessa väriään verrattuna kylmävalssattuun pintaan. Tästä on mahdollista tehdä johtopäätös, että värimuutoksen aiheuttaa pinnalle tarttuva hiekkapuhalluspöly. Putken pinnalle jäävä puhallushiekka tuottaa ongelmia seuraavissa tuotannon työvaiheissa.



Kuva 9. Hiekkapuhalletunputken pinnan mikroskooppikuva.

8.3.3 W2MCW-2000-laserpuhdistuslaitteisto

Jatkuvaa tasatehoista lasersädettä käyttävän W2MCW-2000-laserpuhdistuslaitteiston tekemä jälki materiaalin pintaan on nähtävissä kuvassa 10. Mikroskooppitutkimuksessa otetussa kuvassa on huomattavissa hyvin säännöllinen ja viivamainen kuvio, joka on kuitenkin edellisiin menetelmiin verrattuna harva. R_a -keskiarvon ollessa $0.9 \mu\text{m}$ ei viivamaiset jäljet tuo suurta eroa verrattuna alkuperäiseen kylmävalssattuun pintaan, jonka R_a -keskiarvo $0.8 \mu\text{m}$. Tämä kertoo W2MCW-2000-laserpuhdistuslaitteiston jättävän pintaprofilin muutokset hyvin pieneksi ja mikroskooppikuvassa näkyvien viivojen syvyydet vain mataliksi naarmuiksi.



Kuva 10. W2MCW-2000 pinnan mikroskooppikuva.

8.3.4 W2MCF-120X MOPA 120W -laserpuhdistuslaitteisto

Kuvassa 11 on nähtävissä W2MCF-120X MOPA 120W -laserpuhdistuslaitteistolla esikäsitellyn teräsputken pinta. Laitteisto käyttää pulssiteknologiaa, joka on huomattavissa tarkasteltaessa menetelmän mikroskooppikuvaa. Materiaalin pinnassa oleva kuvio koostuu pisteistä, joka kertoo laitteiston pulssituksen aiheuttamasta nopeista energiapiikeistä. W2MCF-120X MOPA 120W -laserpuhdistuslaitteistolla esikäsitellyn pinnan R_a -keskiarvoksi saatiin $1.0 \mu\text{m}$. R_a -keskiarvo ei yllä suljetun hiekkapuhalluksen $1.6 R_a$ -keskiarvoksi, mutta mikroskooppitutkimuksen perusteella kuvion kohtuullinen tiheys ja peittävyys luovat pinnalle pintakäsittelyn tarunnan kannalta kohtuullisen pohjan.



Kuva 11. W2MCF-120X MOPA 120W -pinnan mikroskooppikuva.

8.3.5 W2MCL-200-laserpuhdistuslaitteisto

W2MCL-200-laserpuhdistuslaitteisto käyttää hyväksi pulssitustekniikkaa. Kuvassa 12 on nähtävissä W2MCL-200:n jatkuva aaltomainen kuvio, joka on hyvin pitkälle saman näköinen profiiltaan kuvan 11 kanssa. Erona W2MCL-200:n muodostamaan jälkeen on CL-menetelmän tuottama hyvin tasainen ja tiheä pulssitus, jolloin pistemäistä kuviota ei ole havaittavissa verrattuna MOPA-tekniikkaan. W2MCL-200-kuvion muodostamaan jälkeen jää paljon alueita, johon mekaanista esikäsitelyä ei kohdistu. W2MCL-200-laserpuhdistuslaitteistolla esikäsitellyn pinnan R_a -keskiarvoksi saatiin $1.7 \mu\text{m}$, joka on hyvin pitkälle samaa tasoa suljetun hiekkapuhalluksen kanssa. R_a -keskiarvoa vertaamalla voitaisiin suljettu hiekkapuhallusmenetelmä korvata W2MCL200W-laserpuhdistuslaitteistolla suoritettulla esikäsitelymenetelmällä, mutta käsittelemättömien alueiden takia ei tartuntapinta-alaa välttämättä saavuteta riittävästi.

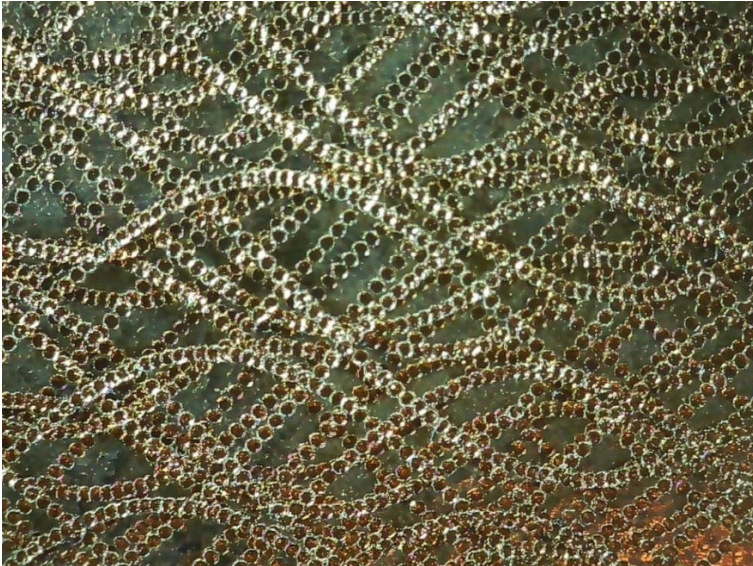


Kuva 12. W2MCL-200 pinnan mikroskooppikuva.

8.3.6 W2MCF-200X MOPA -laserpuhdistuslaitteisto

W2MCF-200X MOPA -laserpuhdistuslaitteistolla esikäsitellyn putken pinta on nähtävissä kuvassa 13. Esikäsitelty pinta muistuttaa paljon kuvaa 11, ja se johtuu kummassakin tapauksessa käytetystä MOPA-tekniikasta. Pulssituksen tuomat tiheät energiapiikit tekevät luodusta kuviosta pistemäisen. Mikroskooppitutkimuksen perusteella pisteet ovat syvempiä ja terävämpiä suuremman tehon ansiosta verrattuna kuvaan 11. W2MCF-200X MOPA:lla luodun kuvion tiheys ja tasalaatuisuus kertoo pyörityslaitteiston syöttö- ja pyörimisnopeuden olleen testauksessa optimaalinen. W2MCF-200X MOPA -pinnankarheusmittauksissa R_a -keskiarvoksi saatiin $1.6 \mu\text{m}$, joka on yhtä suuri, kuin hiekkapuhalluksessa. W2MCF-200X MOPA:n

kuvion tasaisuus ja tiheys on laserpuhdistuslaitteistojen testeistä laadukkain, joten tulosten perusteella tällä laitteistolla pystytään parhaiten haastamaan hiekkapuhallusta mekaanisena esikäsittelymenetelmänä.

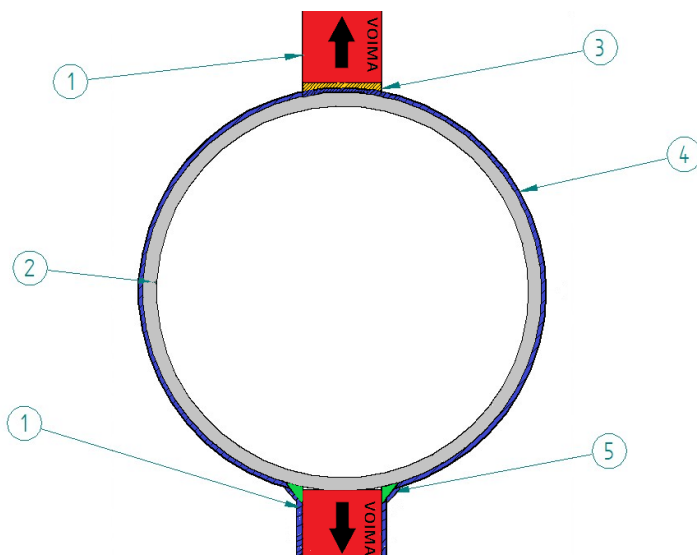


Kuva 13. W2MCF-200X MOPA -pinnan mikroskooppikuva.

9 TARTUNTATESTAUKSET

9.1 Tartunnan arviointi vetokokeella

Standardissa SFS-EN ISO 4624:2016 (Suomen Standardisoimisliitto (SFS), 2016, s. 6) esitetään koemenetelmänä tartuntavetokoe, jolla pystytään määrittämään tarvittava vetojännitys pinnoitteen murtumiselle. Tartuntavetokokeen on todettu olevan erittäin käyttökelpoinen, kun vertaillaan pinnoitteiden tartuntaominaisuuksia. Tässä työssä standardiin SFS-EN ISO 4624:2016 kirjattua testausmenettelyä on sovellettu koekappaleiden osalta. Koekappaleina käytetään testilevyjen sijasta 40x1.25 mm S780 teräsputkea, johon tässä työssä tutkittavana olevat mekaaniset esikäsitteilymenetelmät on suoritettu. Tässä työssä käytetyn tartuntavetokokeen periaate 40x1.25 mm S780 putkelle esitetään kuvassa 14.



Kuva 14. Tartuntavetokokeen periaate.

Kuvassa 14 numeroitujen merkintöjen selitykset ovat:

1. Vetosauva.
2. Koekappale.
3. Liimaliitos.
4. Jauhemaalikerros.
5. Hitsausliitos.

Koekappaleeseen on ennen pintakäsittelyn suorittamista hitsattu toinen vetosauvoista. Hitsatulla liitoksella on haluttu varmistaa, että toinen vetosauvojen liitoksista tulee varmuudella pysymään putkessa kiinni vetokokeen ajan. Pintakäsittelynä koekappaleelle sekä siihen

hitsattuun vetosauvaan on suoritettu jauhemaalaus. Jauhemaalattuun pintaan hitsatun vetosauvan vastapuolelle on liimaliitoksella liitetty toinen vetosauva, jolloin aikaansaatu kokonaisuus voidaan liittää vetosauvoista vetokoneen kiilaistukkaan. Vetosauvojen sama-akselinen suuntaus on pyritty toteuttamaan mahdollisimman tarkasti, että testituloksista saadaan luotettavia (SFS, 2016, s. 8). Liimatun vetosauvan kehää myöten on leikattu terävällä veitsellä ura maalipinnan läpi alustaan saakka, ja näin varmistetaan koekappaleiden yhtä suuri tartuntapinta-ala (mts. 9). Koekappale kiinnitettynä vetokoneeseen on esitettyinä kuvassa 15.

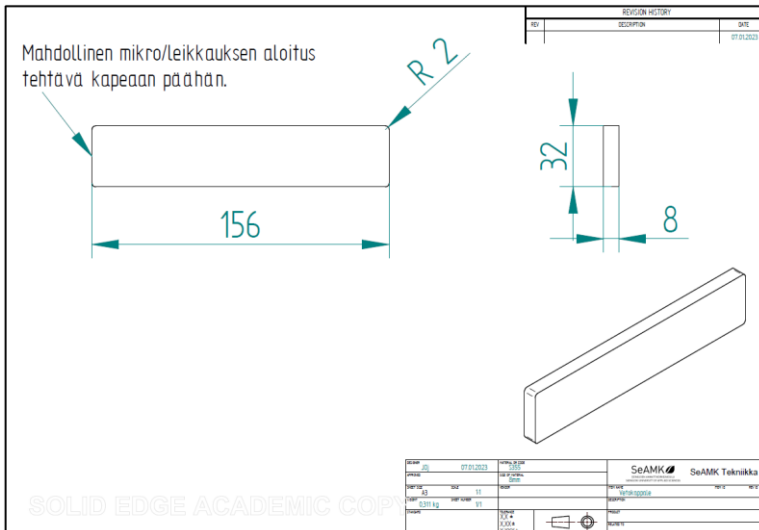


Kuva 15. Koekappale kiinnitettynä vetokoneeseen.

9.2 Vetosauva

Vetosauvassa on oltava jäykkä tasainen pää, joka pystytään liimaamaan tukevasti kiinni testattavaan pinnoitteeseen ja toisen pään on oltava yhteensopiva käytettävän tartuntavetolaitteen kanssa (SFS, 2016, s. 8). Vetosauvan mitat on suunniteltava siten, että testin aikana vetosauvojen osalta ei tapahdu muodonmuutoksia.

Vetosauvojen mallinnuksessa käytettiin hyväksi standardissa SFS 3475 (Suomen standardisoimisliitto (SFS), 1986, s. 2) esitettyjä mittoja litteälle kiilaistukkasauvalle, jonka perusteella vetosauvat mallinnettiin. Kuvassa 16 on esitetty Solid Edge -mallinnusohjelmalla luotu valmistuskuva vetosauvasta.



Kuva 16. Vetosauvan valmistuskuva

9.3 Liima

Pinnoitteen kuivumisen tai kovettumisen jälkeen vetokoneeseen sopivat vetosauvat liimataan suoraan pinnoitetun koekappaleen pintaan (SFS, 2016, s. 6). Vetokokeen onnistumiseksi on käytettävän liiman tartuntaominaisuudet oltava suuremmat kuin testattavalla pinnoitteella, jotta saavutetaan pinnoitteen murtuminen testikappaleen pinnasta (mts. 9). On huomioitava, että liiman sisältävät komponentit eivät saa aiheuttaa näkyviä muutoksia testattavaan pinnoitteeseen. Useimmissa tapauksissa tarpeeksi suuri liiman tartunta on saavutettu käyttämällä syanoakrylaatti-, kaksikomponenttisia epoksi- tai peroksidikatalysoituja polyesteripohjaisia liimoja.

Etra Oy:n teknisen asiantuntijan P. Timosen (henkilökohtainen tiedonanto, 13.1.2023) mukaan jauhemaalipintaan on haastavaa saada luja tartunta liimaa käyttämällä. Hänen kokemuksensa mukaan parhain lujuus saavutetaan käyttämällä jauhemaalipinnan ja teräslevyn välisessä liitoksessa kaksikomponenttista syanoakrylaatti-/ akryylihybridigeeliliimaa. Timonen täsmentää suosittelmansa liiman soveltuvan hyvin erilaisille materiaaleille, kuten muoveille, kumeille ja metalleille.

Tartuntavetokokeessa vetosauvan ja maalatun koekappaleen liitoksessa käytettiin Loctite HY 4070 -ultranopeaa rakenneliimaa, joka kovettui nopeasti huoneenlämpötilassa. Liimaus suoritettiin sopivien korokepalojen päällä, jolla varmistettiin vetosauvojen linjaus koekappaleen keskilinjaan sekä niiden samansuuntaisuus. Liima sai kuivua jatkuvassa noin 20°C huoneenlämpötilassa kahdeksan vuorokautta ennen tartuntavetokokeiden suorittamista.

9.4 Koekappale

Tartuntavetokokeessa käytetään koekappaleita, jotka halutun mekaanisen esikäsitteilyn jälkeen pinnoitetaan saman paksuisena kerroksena kauttaaltaan (SFS, 2016, s. 6). Koekappaleina tässä työssä käytettiin 40x1.25 mm S780 teräsputkea.

Koekappaleisiin suoritettavat mekaaniset esikäsitteilyt olivat:

- kylmävalssaus, eli tehdaspinta
- hiekkapuhallus
- laserpuhdistus.

Mekaanisen esikäsitteilyn jälkeen koekappaleet pintakäsiteltiin jauhemaalaukselinjastossa, jonka yhteydessä suoritettiin rasvanpoistopesu sekä konversioesikäsitteily. Jauhetyyppinä koekappaleille käytettiin polyesteripohjaista jauhemaalaa. Koekappaleille suoritettiin jauheenlevityksen jälkeen 12 minuutin polttoaika 195°C polttouunissa. Jauhemaalauksen jälkeen maalipinnalle suoritettiin kalvonpaksuusmittaukset, jonka tulosten keskiarvoksi arvioitiin 100 µm. Kuvassa 17 suoritetaan jauhemaalain kalvonpaksuusmittausta koekappaleelle.



Kuva 17. Koekappaleen jauhemaalauksen kalvonpaksuusmittaus.

9.5 Tulokset

Tartuntavetokokeessa vetokoneelta saatiin taltioitua murtovoima, joka vaadittiin pinnoitteen murtumiseen esikäsitellyn testikappaleen pinnasta (SFS, 2016, s. 13). Tuloksissa murtovoimaa kuvaavampana suurena käytettiin murtolujuutta, joka lasketaan kaavasta (1).

Murtolujuuden arvo σ määritetään kaavalla (SFS, 2016, s. 13)

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

missä

- σ on murtolujuus, yksikkönä megapascal
- F on murtovoima, yksikkönä newton
- A on vetokappaleen tartunta pinta-ala neliömillimetreinä

Tartuntavetokokeessa huomattiin, että jauhemaalain irtoaminen koekappaleen pinnasta kohtisuorassa vedossa vaatii todella suuren voiman. Tartuntavetokokeesta saadun maalin irtoamiseen vaadittavan murtovoiman yksiselitteisen vertailun esteeksi tuli käytetyn liiman tartunnan periksi antaminen ennen jauhemaalipinnan murtumista. Kuvassa 18 on nähtävissä ennen tartuntavetokoetta terävällä veitsellä tehty ura maalipintaan vetosauvan ulkomuodon mukaan sekä jauhemaalain osittainen irtoaminen koekappaleen pinnasta.



Kuva 18. Tartuntavetokokeessa irronnutta maalipintaa.

Tartuntavetokokeessa yhdeksi vertailuarvoksi valittiin irronneen jauhemaalain pinta-alan osuus verrattuna vetosauvan muodostamaan tartunta pinta-alaan, joka lasketaan kaavasta (2).

Maalin irtoamisen % -osuus määritetään kaavalla

$$\% = \frac{M_A}{V_A} \times 100 \quad (2)$$

missä

% on irronneen maalin pinta-alan osuus, yksikkönä prosentti

M_A on irronneen maalin pinta-ala, yksikkönä neliömillimetri

V_A on vetosauvan tartuntapinta-ala, yksikkönä neliömillimetri

Taulukossa 2 on esitetty tartuntavetokokeista saadut tulokset. Tuloksia tulkittaessa voidaan päätellä, että pienellä R_a -keskiarvolla eli mekaanisen esikäsittelyn pinnankarheudella on merkitystä jauhemaalain muodostamaan tartuntaan koekappaleen pintaan. Mekaanisista esikäsittelyistä laserpuhdistuksen ja hiekkapuhalluksen koekappaleissa pinnankarheusmittaus-tuloksissa oli vain pientä eroa. Kuitenkin hiekkapuhallus saavutti tartuntavetokokeissa noin 10 % suuremman murtolujuuden verrattuna laserpuhdistettuun pintaan. Hiekkapuhalluksen murtolujuus kuvaa kuitenkin taulukon 2 tuloksissa käytetyn liiman muodostamaa suurinta murtolujuusarvoa, koska jauhemaalain pintaa ei saatu irrotettua hiekkapuhalletuista koekappaleista lainkaan.

Taulukko 2. Tartuntavetokokeiden tulokset.

Mekaaninen esikäsittely	R_a-keskiarvo (μm)	Murtovoima F (N)	Murtolujuus σ (MPa)	Maalin irtoaminen (%)
Kylmävalssaus	0.8	1454	5.7	11.4
Laserpuhdistus	1.8	1627	6.4	5.4
Hiekkapuhallus	1.6	1785	7.0	0

Ero laserpuhdistuksen ja hiekkapuhalluksen mekaanisen esikäsittelyjen tasalaatuisuuden välillä huomattiin mikroskooppitutkimuksissa, joita pystytään tarkastelemaan vertaamalla kuvaa 9 ja kuvaa 13. Tästä voidaan päätellä, että jauhemaalipinnan muodostamaan tartuntaan vaikuttaa pinnankarheuden lisäksi mekaanisen esikäsittelyn muodostama käsittelyn tiheys, joka on hiekkapuhalluksella parempi verrattuna laserpuhdistukseen.

10 YHTEENVETO JA POHDINTA

10.1 Yhteenveto

Työn tavoitteena on ollut tutkia, voiko suljetun hiekkapuhallusprosessin korvata laseriin perustuvalla puhdistustekniikalla. Tutkimuksissa huomattiin, että laserpuhdistustekniikkaa on mahdollista käyttää materiaalin pintaprofilia muokkaavana menetelmänä. Laserpuhdistustekniikalla päästiin testeissä yhtä suureen pinnankarheuteen hiekkapuhallustekniikan kanssa. Tutkimuksessa kävi kuitenkin ilmi, että pinnan karhentaminen laserpuhdistustekniikalla on selvästi hitaampi prosessi verrattuna suljettuun hiekkapuhallustekniikkaan. Tutkimuksen tuloksena tämän hetken laserpuhdistustekniikalla ei Trailander Oy:n tapauksessa pystytä korvaamaan suljettua hiekkapuhallusta putkien esikäsitteilymenetelmänä tuotantotehokkuutta arvioitaessa. Hiekkapuhallushiekan aiheuttamat mahdolliset ongelmat putken taivuttamisessa ja hitsauksessa ovat tässä kohtaa helpommin hallittavissa tuotantoprosessissa. Suljettu hiekkapuhallus on yrityksen tuotantoprosessissa pullonkaula, joten menetelmää pyritään ensisijaisesti nopeuttamaan. Kuitenkin hiekkapuhalluksesta syntyvä pöly ja ympäristöhaitat on syytä menetelmää arvioitaessa jatkossakin huomioida.

Laserpuhdistustekniikan edut tulevat esille arvioitaessa ympäristökysymyksiä, koska menetelmä ei vaadi mitään väliainetta puhdistuksen suorittamiseen. Vaikka laserpuhdistuksesta vapautuu runsaasti savukaasuja, voidaan teollisessa tuotannossa menetelmä toteuttaa suljettussa kaapissa. Tällöin savukaasujen kohdepoisto pystytään hoitamaan tehokkaasti. Tehtyjen testien perusteella laserpuhdistustekniikan soveltuvimmat käyttökohteet keskittyvät ruosteen ja epäpuhtauksien poistamiseen silloin, kun alkuperäisen materiaalin pinta on tärkeää saada pysymään koskemattomana.

Tartuntavetokokeiden tuloksissa on huomattava, että pinnankarheus vaikuttaa ainakin joiltain osin jauhemaalaton pinnan irtoamiseen vaadittavan murtovoiman suuruuteen. Tuloksien valossa kylmävalssatun eli tehdaspinnan pinnankarheus oli tutkimuksen pienin, kuten myös jauhemaalipinnan irtoamiseen vaadittu murtovoima. Pinnan mekaanisista esikäsitteilymenetelmistä hiekkapuhallus oli parhain tartuntavetokokeiden tuloksien valossa, vaikka hiekkapuhallusmenetelmän pinnankarheus oli samaa tasoa laserpuhdistusmenetelmän kanssa. Tämän vuoksi voidaan tehdä johtopäätös, että jauhemaalaton tartuntaan vaikuttaa pinnankarheuden lisäksi myös mekaanisen esikäsitteilyn tasalaatuisuus. Pinnanlaadun mikroskooppitutkimuksia

vertailtaessa hiekkapuhallustekniikka antoi tasalaatuisimman ja tiheimmän lopputuloksen mekaanisista esikäsittelymenetelmistä, jolloin jauhemaalain tartuntapinta-ala oli suurin.

10.2 Pohdinta

Lasertekniikan soveltamisessa löytyy paljon tunnistamatonta potentiaalia tulevaisuuden mekaanisena esikäsittelymenetelmänä. Kirjallisuudessa on verrattain vähän tietoa laserpuhdistustekniikasta, ja kirjoitettu tieto käsittelee poikkeuksetta tekniikkaa materiaalia vahingoittamattomana menetelmänä. Tästä tutkimuksesta käy kuitenkin ilmi, että puhdistuslaserlaitteistolla pystytään karhentamaan kappaleiden pintaa, jolloin menetelmä saa tältä osin uuden tarkastelukohteen. Hiekka- ja sinkopuhallus ovat teollisuudessa tuttuja sekä tehokkaita mekaanisia esikäsittelymenetelmiä. Kuitenkin ympäristövaatimusten tiukentuessa tulevaisuudessa saattaa tulla eteen käännepeiste, jolloin perinteisistä puhallusmenetelmistä luovutaan. Tulevaisuudessa lasertekniikalla on vahva jalansija teollisuuden tarpeisiin. Kasvava lasertekniikan kiinnostus ja kysyntä voi mahdollistaa, että laitteistojen ja menetelmien kehittyminen pystyy ottamaan vielä suuren harppauksen eteenpäin, jolloin käyttösovelluksia syntyy tekniikan alalle vielä lisää.

Ensimmäisen tartuntavetokokeen kohdalla vetokoneelle määritetty vetovoiman nostamisnopeus oli 10 N/s. Tällöin vetokoe kesti reilusti standardissa SFS-EN ISO 4624 (2016 s. 13) määritellyn enimmäisajan yli, jolloin tulosta ei otettu vertailussa huomioon. Mielenkiintoista kuitenkin on, että kun vetovoiman nostamisnopeus kasvatettiin 50 N/s, putosi samalla murtumaan vaadittava voima oleellisesti. Tästä voidaan päätellä liiman ja jauhemaalikalvon liitoksessa tapahtuneen jonkinasteita muokkauslujittumista, johon voiman nostamisnopeus on ollut vaikuttava tekijä. Vetokoneen tuottama raportti tuloksista on tarkasteltavissa liitteessä 1.

Tartuntavetokokeiden tuloksista käy ilmi, että jauhemaalain tartunta kappaleen pinnassa on todella suuri riippumatta suoritetusta esikäsittelystä. Esimerkiksi 1500 N muuttaminen kiloiksi vastaa 153 kg:n kohtisuoraa kuormaa 8 mm x 32 mm alueelle, jolloin liiman tartunta tuli rajoitettavaksi tekijäksi. Tulevaisuudessa olisi mielenkiintoista tarkastella pidemmän aikavälin vaikutuksia jauhemaalain tartuntaan liittyen. Tutkimuksessa olisi syytä selvittää, vaikuttaako lämpötilan vaihtelut tai maalipintaan kohdistuvat naarmut ja iskut heikentävästi jauhemaalain tartuntaan. Tällöin voitaisiin saada suurempia eroja tuloksiin mekaanisten esikäsittelymenetelmien välille.

LÄHTEET

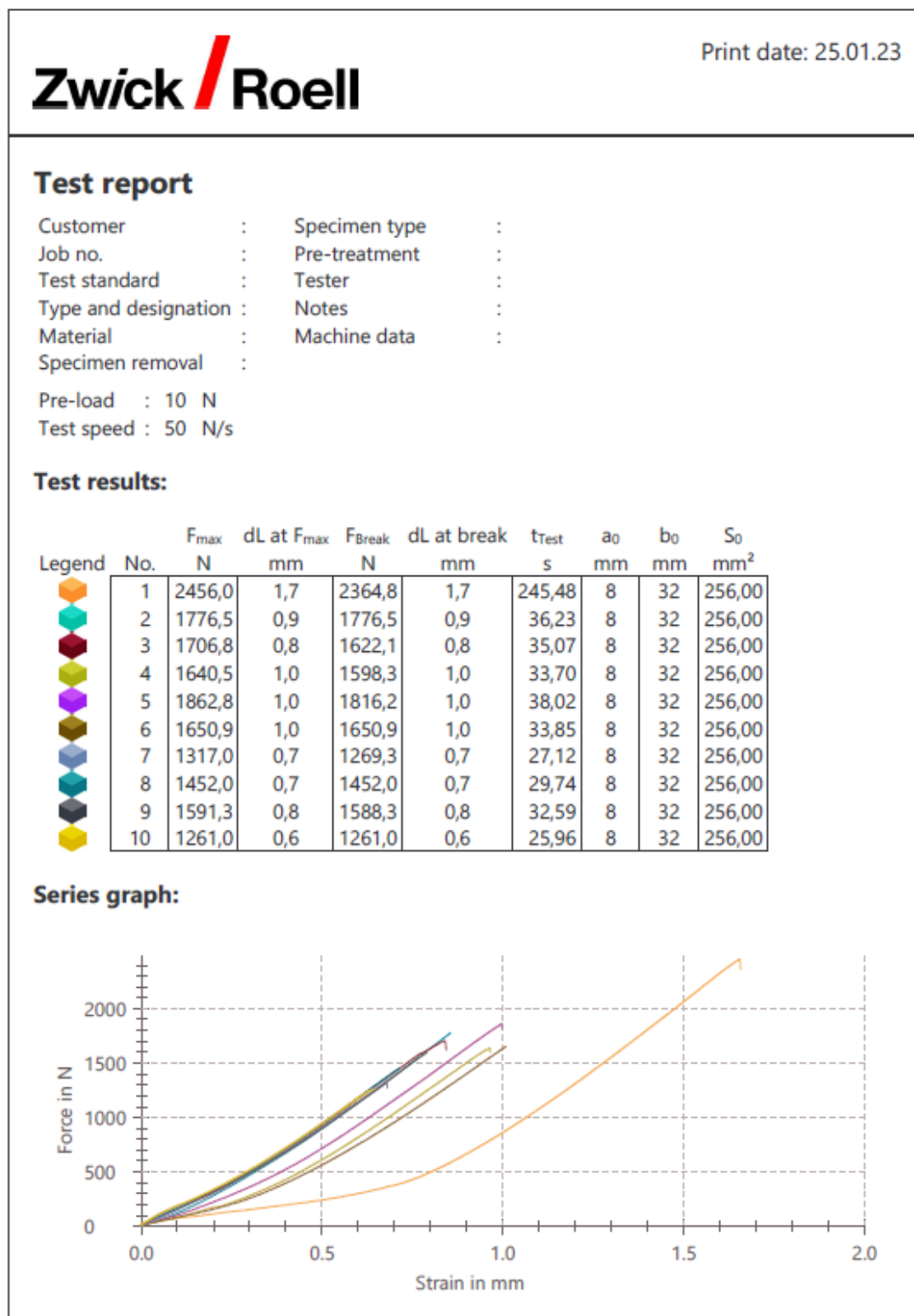
- Faccini, R., Gizzi, L. A., & Ferroni, F. (2012). *Laser-plasma Acceleration: Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi" Course CLXXIX, Varenna on Lake Como, Villa Monastero, 20-25 June 2011*. IOS Press.
- Hayve. (i.a.). *Digital Microscope 9: Portable microscope instruction manual*. <https://manuals.plus/supereyes/dm9-digital-microscope-9-manual#axzz7yU6psdSs>
- Ionix. (i.a.). *Laserpuhdistus*. <https://www.ionix.fi/teknologiat/lasertyosto/laserpuhdistus/>
- Jokinen, I., Kuusela, A., & Nikkari, T. (2001). *Metallituotteiden maalaus*. Opetushallitus.
- Keinänen, T., & Järvinen, M. (2014). *Mittaustekniikka*. Sanoma Pro.
- Kohli, R., & Mittal, K. (2011). *Developments in Surface Contamination and Cleaning: Methods for Removal of Particle Contaminants*. Elsevier.
- KP Laser. (i.a.-a). *Etusivu*. <https://www.kplaser.fi/>
- KP Laser. (i.a.-b). *Palvelut*. <https://www.kplaser.fi/palvelut>
- Kujanpää, V., Salminen, A., & Vihinen, J. (2005). *Lasertyöstö*. Teknologiainfo Teknova.
- Lepola, P., & Makkonen, M. (1998). *Hitsaus ja teräsrakenteet*. WSOY.
- Uusitalo, J. (2012). *KoneDigi: Hitsausvirheet ja niiden estäminen*. [PowerPoint-esitys]. Länsirannikon Koulutus. <https://aoe.fi/#/materiaali/249/2020-03-30T07:51:11.149Z>
- Pastila, R. (2009). *Ionisoimaton säteily: Ultravioletti- ja lasersäteily*. Säteilyturvakeskus.
- Rung, S., Barth, J., & Hellmann, R. (2014). Characterization of Laser Beam Shaping Optics Based on Their Ablation Geometry of Thin Films. *Micromachines*. <https://doi.org/10.3390/mi5040943>
- Suomen Standardisoimisliitto (SFS). (2016). *Maalit ja lakat: Tarttuvuuden arviointi vetokoneella (2. p.); Paints and varnishes: Pull-off test for adhesion (SFS-EN ISO 4624:2016)*.
- Suomen Standardisoimisliitto (SFS). (1986). *Vetokoneen litteä kiilaistukkasauva (2.p.) (SFS 3475)*.
- Trailander. (1.6.2022). *Pulverimaalaus on yksi halutuin ja kysytyin osa valmistusprosessissamme [Valokuva] [Tilapäivitys]*. Facebook. <https://www.facebook.com/trailander/photos/a.515305653670246/515327877001357/>

- Trailander. (i.a.-a). *Sopimusvalmistus*. <http://trailander.com/pages/fi/sopimusvalmistus.php>
- Trailander. (i.a.-b). *Tuotteet lumiolosuhteisiin*. <http://trailander.com/pages/fi/lumituotteet.php>
- Trailander. (i.a.-c). *Yritys*. <http://trailander.com/pages/fi/yritys.php>
- TrailanderShop. (i.a.). *Tuotteet*. <https://webshop.trailander.com/Tuotteet>
- Trumpf. (i.a.-a). *Laser marking*. https://www.trumpf.com/en_US/solutions/applications/laser-marking/
- Trumpf. (i.a.-b). *Surface processing with the laser*. https://www.trumpf.com/en_US/solutions/applications/surface-processing-with-the-laser/
- Vantaan teollisuusmaalaamo. (i.a.). *Jauhemaalau*s. <https://vtm.fi/pintakasittely/jauhemaalau-pulverimaalaus/>

LIITTEET

Liite 1. Raportti tartuntavetokokeesta

Liite 1. Raportti tartuntavetokokeesta



Statistics:

Series	F _{max}	dL at F _{max}	F _{Break}	dL at break	t _{Test}	a ₀	b ₀	S ₀
n = 10	N	mm	N	mm	s	mm	mm	mm ²
\bar{x}	1671,5	0,9	1639,9	0,9	53,78	8	32	256,00
s	335,73	0,3	315,57	0,3	67,47	0,000	0,000	0,00
V [%]	20,09	31,82	19,24	31,81	125,46	0,00	0,00	0,00