



Satakunnan ammattikorkeakoulu  
Satakunta University of Applied Sciences

JONI ROSSI

# **Moottorin sylinterinkansien laser- pinnoitus**

MERENKULKUALAN INSINÖÖRIN TUTKINTO-OHJELMA  
2024

## TIIVISTELMÄ

Rossi, Joni: Moottorin sylinterinkansien laserpinnoitus  
Opinnäytetyö, AMK  
Merenkulun insinööri  
Maaliskuu 2024  
Sivumäärä: 29

Opinnäytetyön tarkoituksena on tarkastella moottorin sylinterinkansien korjausta ja kunnostusta keskittyen erityisesti laserpinnoitukseen ja vaihtoehtoihin korjausmenetelmiin.

Päätarkoituksena oli selvittää laserpinnoituksen tarjoamia etuja ja mahdollisuuksia, sekä tarkastella itse laserpinnoitusprosessia. Opinnäytetyössä tarkasteltiin myös vaihtoehtoisia korjausmenetelmiä, käytiin läpi niiden toimintaperiaatteita, käyttökohteita, sekä hyötyjä ja haittoja. Työssä avataan MTU-moottorin rakennetta keskittyen erityisesti sylinterinkansiin, sekä venttiili-istukoihin.

Opinnäytetyö perustui laitevalmistajan ja alan yritysten tietoihin ja tutkimuksiin, sekä omaan tutkimustyöhön.

Opinnäytetyössä käytetyt tutkimustulokset osoittavat, että laserpinnoitus tarjoaa huomattavia etuja verrattuna perinteisiin korjausmenetelmiin. Tutkimus tarjoaa vakuuttavaa näyttöä näistä eduista, mistä voi olla suuresti hyötyä eri teollisuuden aloilla.

Avainsanat: Laserpinnoitus, moottori, hitsaus.

## Abstract

Rossi, Joni: Laser cladding of engine cylinder heads

Bachelor's thesis

Maritime engineer

March 2024

Number of pages: 29

The purpose of the thesis is to examine the repair and restoration of engine cylinder heads, focusing especially on laser cladding and alternative repair methods.

The main purpose was to find out the advantages and possibilities offered by laser cladding, and to examine the laser cladding process itself. Alternative repair methods were also examined in the thesis, their operating principles, uses, advantages and disadvantages were also reviewed. The thesis opens the structure of the MTU engine, focusing especially on the cylinder heads and valve seats.

The thesis was based on the information and research of the equipment manufacturer and companies in the field, as well as my own research work.

The research results used in the thesis show that laser coating offers considerable advantages compared to traditional repair methods. The research provides compelling evidence of these benefits, which can be of great benefit to various industries.

Keywords: Laser cladding, engine, welding.

# SISÄLLYS

1 JOHDANTO .....	6
2 TUTKIMUSKYSYMYKSET- JA MENTELMÄ .....	7
2.1 Tutkimuskysymykset .....	7
2.2 Tutkimusmenetelmä .....	7
3 VAIHTOEHTOISET KORJAUSMENTELMÄT .....	8
3.1 Kylmäkorjaus (tapitus) .....	8
3.1.1 Suorat kierretapit .....	9
3.1.2 Kartiot kierretapit .....	10
3.2 Kuumakorjaus (hitsaus) .....	12
3.2.1 Uunihitsaus (juottaminen) .....	12
3.2.2 Metalliruisutus .....	12
3.2.3 TIG-hitsaus .....	12
3.3 Mahdolliset riskit .....	13
4 LASER PINNOITUS .....	14
4.1 Laserpinnoitusprosessi .....	16
4.2 Perusmateriaalit ja pinnoitteet .....	17
4.3 Laserpinnoituksen etuja .....	17
5 MOOTTORI .....	19
5.1 MTU 538 16 V TB 93 .....	19
5.2 Sylinterinkannet .....	20
5.3 Venttiilikotelo .....	22
6 TERÄSVALUSYLINTERINKANNEN VENTTIILI-ISTUKKA ALUEIDEN PINNOITUS .....	24
6.1 Koe-erät .....	24
6.1.1 Ensimmäinen koe-erä .....	24
6.1.2 Toinen koe-erä .....	25
6.1.3 Kolmas koe-erä .....	25
6.2 Testierät .....	25
6.2.1 Ensimmäinen testierä .....	25
6.2.2 Toinen testierä .....	26
7 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET .....	27
8 LÄHTEET .....	29

## TERMISTÖ- JA LYHENNELUETTELO

**TIG-hitsaus** (Tungsten Inert Gas welding) Kaasukaarihitsausmenetelmä, jossa valokaari palaa sulamattoman volframielektrodin ja työkappaleen välissä suojakaasun ympäröimänä.

**NC-ohjattu** (Numerical Control) Työstö- tai muun koneen ohjaaminen tapahtuu yksiselitteisillä symboleilla, jotka koneen ohjauselektroniikka muuntaa tarvittaviksi servo-ohjattujen moottorien liikkeiksi.

**NDT-tarkastus** (Non-Destructive testing) Rikkomaton aineenkoetus on tarkastusmenetelmä, jota käytetään hitsien, valujen ja muiden metallirakenteiden tarkastamiseen ilman, että materiaalia vaurioitetaan.

**Venttiili-istukka** (Seeti) On teräksinen rengas, joka sijaitsee sylinterinkannessa. Venttiili painautuu tätä istukkaa vasten sulkeutuessaan. Istukan päätehtävä on toimia tiivistyspintana, johon venttiilin tiivistyspinta painautuu. Lisäksi istukan tehtävänä on johtaa lämpöä pois venttiilistä.

**MTU Friedrichshafen** (Motoren- und Turbinen-Union) MTU on saksalainen kaupallisten polttomoottoreiden valmistaja, jonka perustivat Wilhelm Maybach ja hänen poikansa Karl Maybach vuonna 1909.

## 1 JOHDANTO

Moottorin sylinterinkansien korjaus ja kunnostus ovat olennaisia toimenpiteitä moottorin optimaalisen suorituskyvyn ja kestävyysvarmistamiseksi. Erityisesti nelitahtimoottoreissa sylinterinkansien on oltava luotettavia ja kestäviä, sillä ne ovat monimutkaisia komponentteja, jotka kokevat jatkuvaa lämpö- ja painealtistusta moottorin toiminnan aikana.

Tässä opinnäytetyössä keskitytään erityisesti MTU-moottorin sylinterinkansien venttiili-istukoiden laserpinnoitukseen ja vaihtoehtoisiin korjausmenetelmiin. Näitä vaurioita voidaan korjata erilaisilla menetelmillä, kuten kylmäkorjauksella tai kuumakorjauksella hitsauksen avulla.

Laserpinnointus on edistynyt pinnoitustekniikka, joka tarjoaa monia etuja sylinterinkansien korjauksessa. Se mahdollistaa tarkan ja hallitun pinnoitteen levityksen sekä metallurgisen sitoutumisen pohjamateriaaliin, mikä johtaa kestävään ja luotettavaan lopputulokseen. Lisäksi laserpinnointus vähentää lämpökuormitusta komponentissa ja tarjoaa mahdollisuuden monimutkaisten muotojen pinnoittamiseen.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tutkia ja vertailla erilaisia korjausmenetelmiä sylinterinkansien vaurioiden korjaamiseksi, erityisesti keskittyen laserpinnoitukseen. Lisäksi pyritään selvittämään laserpinnoituksen soveltuvuutta ja etuja moottorin sylinterinkansien korjauksessa verrattuna perinteisiin korjausmenetelmiin.

## 2 TUTKIMUSKYSYMYKSET- JA MENTELMÄ

### 2.1 Tutkimuskysymykset

Työssä pyritään vastamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

1. Mihin laserpinnoitusta voidaan käyttää?
2. Mitä on laserpinnoitus ja mitä vaihtoehtoisia korjausmenetelmiä on?
3. Laserpinnoituksen kestävyys kyseissä komponentissa?

### 2.2 Tutkimusmenetelmä

Opinnäytetyöni tarkoituksena on kartoittaa laserpinnoituksen toiminta menetelmää, sen käyttökohteita ja kestävyyttä. Tarkoituksena on myös tutkia sen toimivuutta komponenteissa, seurata mahdollista kulutusta ja vertailla sitä alkuuperäisiin komponentteihin, keskittyen erityisesti sylinterinkansiin.

Työssä käytiin myös läpi vaihtoehtoisia perinteisimpiä korjaus menetelmiä, niiden ominaisuuksia, hyötyjä ja haittoja. Opinnäytetyössä on tarkoitus soveltaa konstruktivista tutkimusmenetelmää, jota usein insinööritieteissä sovelletaan. Työssä tullaan käyttämään erilaisia raportteja, alan kirjallisuutta, manuaaleja ja hyödyntämään laserpinnoitukseen erikoistuneiden yritysten tietoja. Työssä pyrittiin jättämään siihen liittyvien henkilöiden nimet mainitsematta. Myös osa tutkimusmateriaalista päätettiin jättää pois yritysten ja alan salassa pidettävien tietojen suojelemiseksi.

Työssä käytetty tutkimus on suoritettu aiheeseen perehtyneiden henkilöiden toimesta ja sitä on työstetty vuosia. Testejä on suoritettu koekäyttölaitoksissa ja laboratorioissa parhaan mahdollisen lopputuloksen saavuttamiseksi, jonka avulla on päädytty lopullisiin kenttätesteihin, sekä komponentin normaaliin käyttöön ja toimivuuteen.

### 3 VAIHTOEHTOISET KORJAUSMENETELMÄT

Nelitahtimoottorien sylinterinkansien suunnittelu on luonteeltaan monimutkaista. Imuilman, pakokaasun ja polttoaineen ruiskutuksen kanavat on integroitu kuten myös jäähdytysvesikanavat. Nämä valmistetaan yleensä pallografiittivaluraudasta. Vaikka ne eivät ole yhtä vahvoja kuin valuteräs, niitä on helppo valaa ja ne säilyttävät kohtuullisen lujuuden kuormituksen alla. Yleisistä metalleista valurauta on todennäköisesti kaikkein vaikein korjata sen murtuessa. Se on kuitenkin erittäin käytetty materiaali moottorin sylinterilohkoihin ja kansiin sen vakauden ja edullisuuden takia.

Sylinterinkansien vauriot voivat syntyä huonon jäähdytyksen seurauksena, mikä voi aiheuttaa lämpöväsymistä sylinterinkansissa. Riittämätön jäähdytys voi johtua jäähdytystiloissa esiintyvistä kalkin kerääntymisestä, joka johtuu riittämättömästä vedenkäsittelystä. Halkeamia voi muodostua esimerkiksi venttiilitaskujen ja jäähdytystilojen väliin. Tällä tavalla vaurioituneille sylinterinkansille tarjotaan hitsausta korjausvaihtoehtona. Tämän korjausvaihtoehdon käyttö edellyttää hyväksyntää asianmukaiselta luokitusyhteisöltä sekä hitsauksen ja itse sylinterinkannen osalta. Halkeamakorjauksia voidaan tehdä kylmänä tai kuumana ja käytetty menetelmä riippuu komponentin koosta sekä halkeaman pituudesta ja sijainnista. (Caterpillar Motoren GmbH & Co.KG, 2022)

#### 3.1 Kylmäkorjaus (tapitus)

Korjausmenetelmän valinta riippuu pitkälti metallityypistä, halkeaman sijainnista ja sen koosta. Kylmäkorjauksissa käytetään tappeja tai tulppia halkeaman korjaamiseksi valuraudasta, valuteräksestä tai alumiini komponenteista. Suurimpana etuna kylmäkorjauksissa on, ettei niihin tarvita lämpöä. Lämmön puuttuminen tarkoittaa sitä, ettei tarvita lisää aikaa esilämmittämiseen ja jälkilämmittämiseen, eikä se aiheuta vaaraa mahdolliselle valun vääntymiselle tai muodonmuutokselle. Sylinterinkannen tai lohkon lämmittäminen aiheuttaa laajenemista, mikä taas aiheuttaa lämpöstressiä metallissa ja saattaa



johtaa myöhempiin halkeamiin metallin jäätyessä. Erityisesti vaaraa aiheuttaa metallin liian nopea jäähtyminen.

Tapitusta tehdessä ei tarvitse myöskään olla huolissaan halkeaman ympärillä olevan metallin puhtaudesta. Minkä tahansa tyyppinen hitsaus edellyttää täysin puhdasta pintaa, joka on vapaa epäpuhtauksista kuten rasvasta, öljystä tai liasta. Tämä tarkoittaa siis valun huolellista esipuhdistusta ennen hitsausta. Lisäksi hitsaus vaatii halkeaman jyrsimistä/hiomista, jotta uusi metalli voit täyttää halkeaman ja sulautua molemmiin puoliin olevaan metalliin. (Carley, 2015)

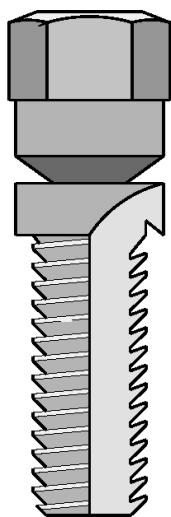


Kuva 1. Tapitettu sylinterinkansi. (Carley, 2015)

### 3.1.1 Suorat kierretapit

Suorat kierretapit asennetaan poraamalla, kierteittämällä ja ruuvaamalla tappeja limittäin. Reiät pyritään poraamaan hieman limittyväksi, niiden lukittumisen varmistamiseksi. Parhaat tulokset saavutetaan usein aloittamalla halkeaman keskeltä, edeten kohti halkeaman päätä. Keskeltä aloittaminen auttaa lievittämään jännityksiä ulospäin työskenneltäessä kohti kumpaakin halkeaman päätä. Suorat kierretapit eivät sulje halkeamaa täysin ilman kierrelukitetta. Lukitetta levitään kierteisiin, sekä tappien päälle tiiveyden varmistamiseksi.

Toinen mahdollisuus on käyttää suorakierteisessä tapissa erityistä suunnattua kierrettä. Tämä tarkoittaa tapin kierteen olevan hieman ylöspäin suuntautunut normaaliin tasaiseen kierteeseen verrattuna (Kuva 2). Kierteiden nousu ylöspäin saa aikaan puristusvaikutuksen tappia kiristäessä. Näin tappi tarttuu vie-reiseen metalliin tiukemmin, mikä toimii hyvin esimerkiksi ohuissa valu seinä-  
missä. Kuitenkin tämän tyypisen tapin käyttämiseen tarvitaan erityistyökaluja kierteiden muodostamiseen. Työ on kaksivaiheinen prosessi, joka alkaa kar-  
kealla työstökierteellä, jonka jälkeen tehdään vielä viimeistelykierre. (Carley, 2015)



Kuva 2. Ylöspäin suunnattu kierre. (Carley, 2015)

### 3.1.2 Kartiot kierretapit

Kartiot tapit asennetaan pääpiirteisesti samalla tavalla, paitsi että tapin syvyy-  
dellä on suurempi merkitys oikean istuvuuden kannalta. Kartiot kierretapit ovat  
kapeampia alapäästä kuin yläpäästä, jolloin se kiilautuu sitä kiristäessä (Kuva  
3). Kartiot tapit vaativat myös erityistyökalun niiden asentamiseen ja niistä on  
leikattava ja hiottava ylijäävä yläosa pois. Kuitenkin osassa kartiotapeissa on  
ominaisuutena kiristäessä poikki napshtava yläosa, joka säästää hieman työ-  
kuormaa poistamalla katkaisuvaiheen. Käytettäessä kyseistä tulppaa on huo-  
mioitava kuitenkin tulpan vääntömomentin mahdollinen vaihtelu, joka riippuu  
pääosin tulpan halkaisijasta ja metallivalun paksuudesta.

Viimeisenä vaiheena tapituksessa naputellaan tappien yläosat esimerkiksi painilmavasaralla. Naputtelu muotoilee tappien yläosia, sulauttaa ne ympäröivään metalliin ja puristaa yläkierteitä, jolloin ne muodostavat vuotovapaan sauman. Tarvittaessa tapit voidaan hioa tasaiseksi, jonka jälkeen lisä naputtelulla saadaan lähes näkymätön korjaus. (Carley, 2015)



Kuva 3. Erikokoisia kartio kierretappeja. (Carley, 2015)

### 3.2 Kuumakorjaus (hitsaus)

Mikäli haljennutta sylinterinkantta tai lohkoa ei pystytä korjaamaan tapittamalla on vaihtoehtona myös hitsaus. Valun tyypistä ja halkeaman vakavuudesta riippuen voidaan valita joko uunihitsaus, metalliruiskutus tai TIG-hitsaus. (Borchert, 2023)

#### 3.2.1 Uunihitsaus (juottaminen)

Uunihitsaus on erittäin vaativa menetelmä, joka vaatii erityistä ammattitaitoa. Hitsaus vaatii sylinterinkannen huolellista puhdistamista, sekä esilämmittämistä uunissa noin 540–760 Celsiusasteen lämpötilaan. Sylinterinkannen saatuttaessa oikean lämpötilan on halkeama hiottava huolellisesti, jonka jälkeen halkeaman täyttö voidaan aloittaa. On kuitenkin varmistuttava siitä, että käytetty täyttötanko on samaa metalliseosta kuin täytettävä kappale. Hitsauksen jälkeen kansi kääritään eristettyihin peitteisiin, joilla varmistetaan kannen riittävän hidas jäähtyminen, kovettumien ja lisä halkeamien välttämiseksi. (Borchert, 2023)

#### 3.2.2 Metalliruiskutus

Metalliruiskutuksessa nikkelijauhetta syötetään liekkiin kartio suuttimen avulla. Jauheen altistuessa liekille se sulaa ja alkaa hitsautumaan halkeaman reunoille täyttäen korjattavan halkeaman. Prosessi on hieman samantapainen kuin uunihitsaus, mutta huomattavasti nopeampi ja helpompi toteuttaa. Metalliruiskutus vaatii kuitenkin myös sylinterinkannen esilämmittämisen ja hitaan jäähdyttämisen. (Virtasen koneistamo, 2024)

#### 3.2.3 TIG-hitsaus

Alumiinisten sylinterinkansien korjaukseen käytetään yleisimmin TIG-hitsausta. TIG:in etuna on inerttikaasusuoja, joka estää oksidipinnoitteen muodostumista alumiinin pinnalle sen altistuessa ilmalle. Yleisimpinä kaasuina

käytetään argonia tai heliumia. Kuten muissakin kuuma korjaus menetelmissä on sylinterinkansi esilämmitettävä. Kuitenkin huomattavasti vähemmän sillä vain noin 170–230 Celsiusasteen esilämmitys riittää. TIG-hitsauksessa tekniikat vaihtelevat, mutta kuitenkin peruseriaatteena on sulattaa halkeaman ympäröivää metallia ja täyttää se yhdistämällä sula metalli ja täytetanko. Parhaan tuloksen saavuttamiseksi on tärkeää muistaa valita sylinterinkannen metalliseosta vastaava täytetanko. TIG:in suurimpina etuina ovat tarkempi hitsin hallinta, matalampi esilämmitys, sekä sulautuminen ympäröivään metalliin. (Borchert, 2023)

### 3.3 Mahdolliset riskit

Sylinterinkannen lämpökäsittely voi aiheuttaa metalliin lämpöstressiä, mikä voi johtaa myöhempiin mikrohalkeamiin sekä vakaviin jännös- tai paikallisiin jännityksiin, jos metalli pääsee jäähtymään liian nopeasti. Huokoisuus ja muut virheet hitsi korjauksessa voivat johtua pinnan saastumisesta. Joillakin valun osilla saattaa olla liiallista hapettumista pinnalla, mikä voi jäädä ansaan hitsauksessa, jos sitä ei käsitellä asianmukaisesti. Eri materiaalien käyttö hitsausprosessin aikana voi johtaa merkittävästi alentuneeseen lujuuteen koko hitsatulla alueella. Esimerkiksi, alueella, joka altistuu lämmölle voi esiintyä kovettumista, joka johtuu martensiitin muodostumisesta. Kovettuminen vähentää merkittävästi sylinterinkannen sitkeyttä ja saattaa mahdollisesti johtaa lisääntyneisiin halkeamiin. Lisäksi eri materiaalien käyttö hitsausprosessin aikana voi johtaa epätasaiseen sitoutumiseen, mikä heikentää merkittävästi lujuutta koko hitsatulla alueella. Siksi venttiilin istukka-alueiden hitsausta ei suositella lujuuden heikkenemisriskin vuoksi. (Caterpillar Motoren GmbH & Co.KG, 2022)

## 4 LASER PINNOITUS

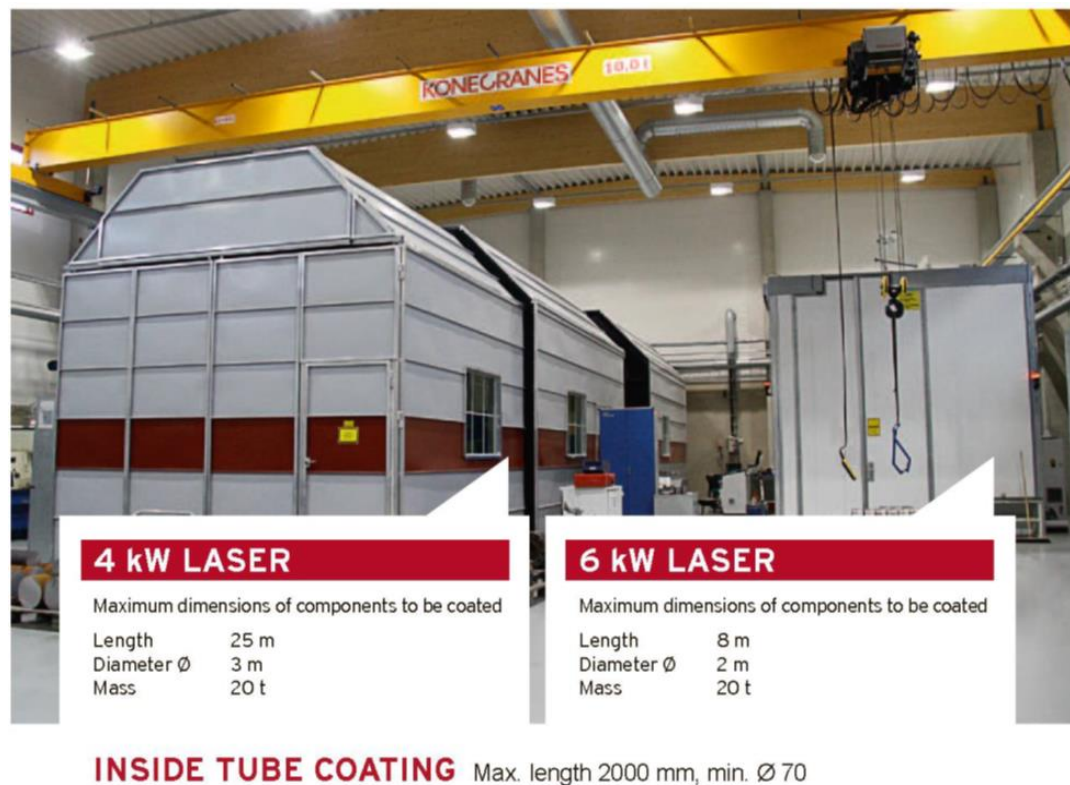
Laserpinnoitus on edistynyt pinnoitustekniikka, joka tarjoaa monia etuja erilaisen komponenttien ja laitteiden pintaominaisuuksien parantamiseen. Tässä tekniikassa käytetään laseria sulattamaan ja sekoittamaan pinnoitusmateriaali pohjamateriaalin kanssa, luoden erittäin tiheän, halkeilemattoman ja ei-huokoisen rakenteen. Tämä pinnoitusmenetelmä takaa erinomaisen metallurgisen sitoutumisen pohjamateriaaliin, mikä johtaa tasaiseen koostumukseen ja optimaaliseen pinnoitteen paksuuteen.

Yksi laserpinnoituksen merkittävistä eduista on sen vähäinen laimentava vaikutus, mikä tarkoittaa, että se ei aiheuta suurta lämpövaikutusta komponenttiin. Tämä on erityisen tärkeää herkille tai lämpöalttiille materiaaleille, joita käytetään monissa teollisuuden sovelluksissa. Lisäksi laserpinnoitus tarjoaa tarkan ja hallitun pinnoitteen levityksen, mikä mahdollistaa monimutkaisten muotojen pinnoittamisen ja vähentää jälkikäsittelyn tarvetta.

Vaikka laserpinnoitus on erittäin tehokas ja lupaava tekniikka, se ei vielä ole laajalti tunnettu insinöörien ja suunnittelijoiden keskuudessa. Euroopassa vain harvat yritykset tarjoavat laserpinnoitusta kaupallisesti teollisuuden käyttöön. Tämä saattaa johtua siitä, että tekniikka on verrattain uusi ja vaatii erityistä osaamista ja laitteistoa sen toteuttamiseen. Kuitenkin sen tarjoamat edut voivat tehdä siitä houkuttelevan vaihtoehdon monille sovelluksille, ja siksi sen odotetaan kasvattavan suosiotaan tulevinä vuosina. Lisääntyvä tietoisuus ja koulutus tässä tekniikassa voivat auttaa sen laajempaa hyödyntämistä teollisuudessa tulevaisuudessa.

Kokkola LCC Oy on kehittänyt laserpinnoitusprosessia kaupalliseen käyttöön yli vuosikymmenen ajan. Tällä hetkellä heillä on kaksi NC-ohjattua laserpinnoitusasemaa, jotka kykenevät käsittelemään jopa 20 tonnin painoisia, 25 metriä pitkiä ja 2,5 metriä leveitä komponentteja (Kuva 4).

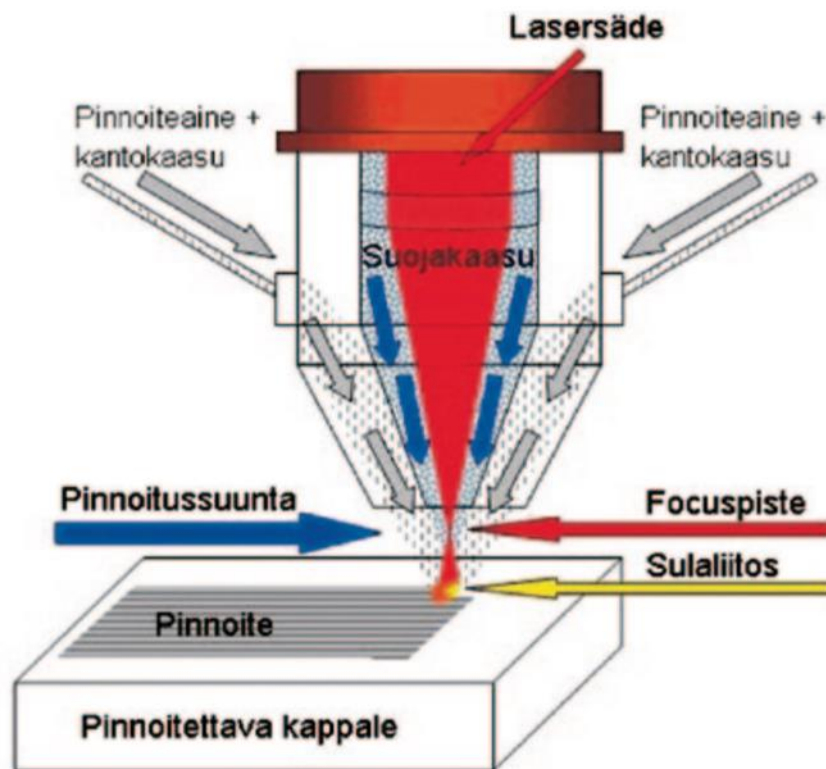
Heidän kykynsä käsitellä suuria ja monimutkaisia komponentteja tarjoaa mahdollisuuksia monenlaisille teollisuuden aloille. (LCC Kokkola, 2018)



Kuva 4. Laserpinnoitus asemat. (LCC Kokkola, 2018)

#### 4.1 Laserpinnoitusprosessi

Pinnoitusprosessissa pinnoitemateriaali, jauhe tai lanka levitetään perusmateriaalille sulatusprosessin kautta (Kuva 5).



Kuva 5. Laserpinnoitusprosessi. (LCC Kokkola, 2018)

Pinnoituksessa kantokaasun mukana ruiskutetaan pinnoiteainetta komponenttiin. Lasersäteen vaikutuksesta pieni määrä pinnoitettavan kappaleen pinnasta sulaa ja yhdistyy pinnoiteaineen kanssa muodostaen tiheän metallurgisen sidoksen. (LCC Kokkola, 2018)



## 4.2 Perusmateriaalit ja pinnoitteet

Laserpinnoitus on sovellettavissa useille eri perusmateriaaleille. Yleisimpiä näistä ovat teräkset, seostetut teräkset, valuteräkset, superseokset sekä kupari ja kupariseokset.

Teräkset ovat yleisimpiä ja käyttökelpoisimpia perusmateriaaleja laserpinnoituksessa, erityisesti seosteräkset. Valurauta puolestaan voi olla haasteellisempi pinnoitettava sen huokoisen rakenteen, korkean hiilipitoisuuden ja mahdollisten epäpuhtauksien vuoksi. Parhaat tulokset valuraudan pinnoituksessa on saatu käyttämällä kobolttipohjaisia pinnoitteita.

Laserpinnoitus mahdollistaa monipuolisen valikoiman pinnoitusmateriaaleja, kuten kobolttipohjaiset ja nikkelpohjaiset seokset, ruostumattomat teräkset, työkaluteräkset sekä kupariseokset.

Kulutuskestävyyden parantamiseksi pinnoitejauheeseen voidaan sekoittaa kovakarbidihiukkasia, kuten volframikarbideja, kromikarbideja ja titaanikarbideja. Tämä lisää pinnoitteen kovuutta ja kestävyyttä erityisesti kulutusta vastaan. (LCC Kokkola, 2018)

## 4.3 Laserpinnoituksen etuja

Laserpinnoitus tarjoaa monia etuja komponenttien laadun parantamiseen ja niiden eliniän pidentämiseen. Tärkeimpiä etuja ovat:

- Korkea sidosluku: Laserpinnoituksessa saavutetaan metallurginen sidos, mikä varmistaa vahvan ja kestävä yhteyden pinnoitteen ja pohjamateriaalin välillä.
- Tiheä, ei-huokoinen rakenne: Pinnoite on tiivis ja ei-huokoinen, mikä parantaa sen korroosionkestävyyttä.

- Alhainen laimennus: Pinnoituksen laimennusaste on matala, yleensä 2–10 % välillä yhdessä kerroksessa, mikä tarkoittaa, että pinnoite säilyttää alkuperäisen koostumuksensa ja ominaisuutensa.
- Alhainen lämpökuorma: Laserpinnoitus aiheuttaa minimaalisen lämpövaikutuksen komponenttiin, mikä vähentää muodonmuutoksia.
- Tarkka pinnoitteen paksuus: Laserpinnoituksessa voidaan saavuttaa tarkka ja tasainen pinnoitteen paksuus, mikä varmistaa halutut ominaisuudet ja suorituskyvyn.
- Hyvä toistettavuus: Laserpinnoitusprosessi on NC-ohjattu, mikä takaa hyvän toistettavuuden ja mahdollistaa samojen spesifikaatioiden noudattamisen jokaisella pinnoituskerralla.

Esimerkkejä hyvistä sovelluskohteista laserpinnoitetuille komponenteille ovat ydinvoimalaitosten pääpiirin venttiilit ja merivesipumput, voimalaitosten turbiinit ja venttiilit, pumppujen komponentit, akselit, hydrauliset männänvarret öljy- ja vesihydraulijärjestelmiin, tiivistyspinnat, propulsiojärjestelmän komponentit ja raskaiden dieselmoottorien komponentit. (LCC Kokkola, 2018)

## 5 MOOTTORI

### 5.1 MTU 538 16 V TB 93

Työssä on tarkasteltu MTU 538 16 V TB 93 moottoria. Moottorin nimessä 16 kuvaa sylinterien määrää ja V sen rakennetta. 538 taas kertoo yhden sylinterin satakertaisen iskutilavuuden litroissa. Moottori on pakokaasuahdettu (T) ja varustettu ulkoisella ahtoilman välijäähdytyksellä sekä männän jäähdytyksellä (B).

Moottorin huipputeho on 3300 kilowattia, kun se käy 1900 kierrosta minuutissa, saavuttaen samalla noin 2,3 baarin ahtopaineen. Moottorin tärkeimmät tekniset tiedot löytyvät kuvattuna alla (Taulukko 1). (MTU Friedrichshafen, 1994)

Taulukko 1. MTU 538 16 V TB 93 tekniset tiedot.

<b>MTU 538 16 V TB 93</b>	
Työtapa	Nelitahtinen, yksitoiminen
Sytytystapa	Etukammioruiskutus
Ahtaminen	Pakokaasuahtaus
Jäähdytysneste	Vesi
Rakenne	60 asteen V-moottori
Sylinterin halkaisija	185 mm
Iskunpituus	200 mm
Iskutilavuus	5,38 litraa
Sylinteriluku	16
Kokonaistilavuus	86 litraa
Puristussuhde	13, 7
Polttoaine	MDO (Marine Diesel Oil)

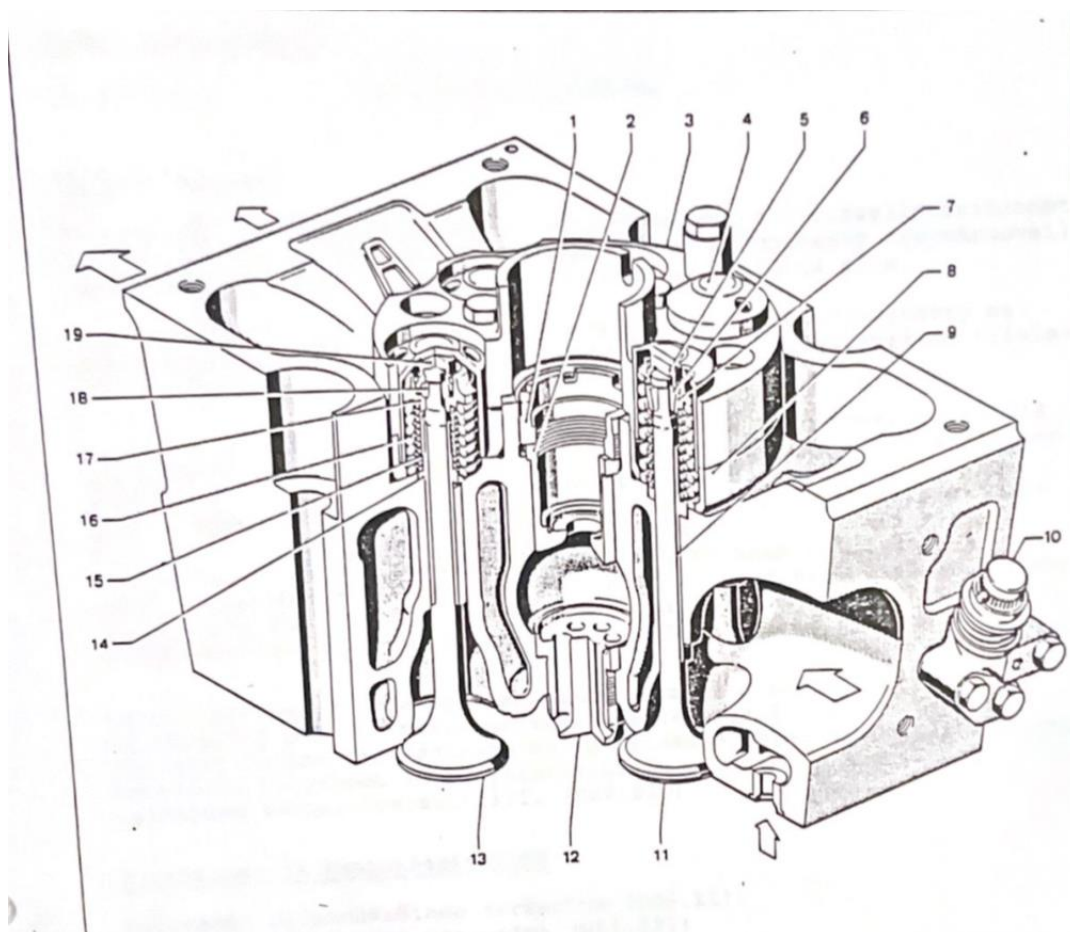
## 5.2 Sylinterinkannet

Moottorissa on vesijäähdytetyt, valuteräksiset erillissylinterikannet, joihin on valettu keskelle etukammio. Sylinterin kannet on kiinnitetty venymäruuveilla kampikammioon, ja ne sulkevat sylinteritilat ylhäältä päin.

Sylinteritilojen ja sylinterin kannen välinen erotuspinta on tiivistetty ns. pehmeärautatiivisteellä. Öljy- ja vesikanavien läpiviennit on tiivistetty hylsillä ja kumiitiivisterenkailla.

Kuvassa 6. on esitetty sylinterinkantta tarkemmin läpileikkauksen avulla. Jokaisessa sylinterin kannessa on kolme imu- (11) ja kolme pakoventtiiliä (13), jotka ovat järjestetty samankeskeisesti keskelle kierretyn polttimeen (12) ympärille. Venttiilit liikkuvat venttiilin ohjaimissa (9) (14) ja kutakin painaa kaksi venttiilin jouta (15) (16) venttiilin istukkaa vasten. Imuventtiilit on liitetty kartiokappaleen puolikkailla (6) tiukasti jousilautasiin (7) (17). Pakoventtiilit on taas kiinnitetty renkaan puolikkailla (18) löysästi jousilautasiin. Löysä liitos mahdollistaa sen, että pakoventtiilit pyörivät moottorin käydessä.

Venttiilin hatut (5) (19) on lukittu pidätysrenkaalla, venttiilin paininta (4) ohjaa laipan yläosa (3). Laipan yläosassa olevaan keskiporaukseen ja olakeholkkiin (2) on kiinnitetty polttoaineen ruiskutusyksikkö. Jokaisessa sylinterin kannessa on puristuksen poistoveniili (10). Moottorin oikeanpuolisen sylinteririvin kansiin on asennettu käynnistysventtiili. (MTU Friedricshafen, 1994)



Kuva 6. Lämpöleikkaus sylinterinkannesta. (MTU Friedrichshafen, 1994)

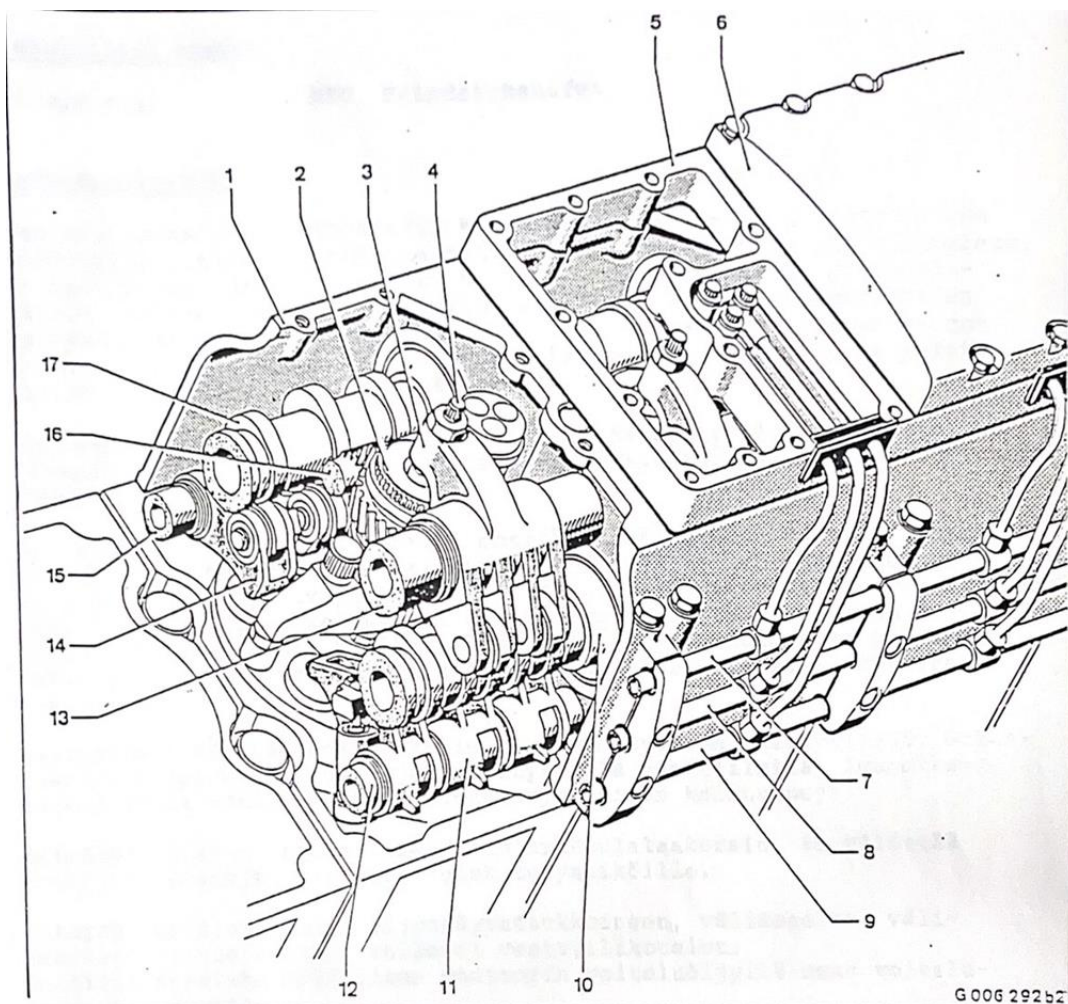
### 5.3 Venttiilikotelo

Kuvassa 7. on esitetty venttiilikotelo paremmin läpileikkauksen avulla. Sylinterin kansien päällä lepää venttiilikotelo (1). Kotelo on valmistettu kevytmetallista ja se peittää moottoripuoliskon sylinterinkannet, jakopyöräkotelon ja päätykappaleen. Venttiilikoteloon on asennettu pakonokka-akseli (17), imunokka-akseli (10), keinuvipujen akselit (12) (15), ruiskutusyksiköiden keinuvipujen akseli (13), kannatusholkit, imu- ja pakoventtiilien keinuvivut (11) (14), ruiskutusyksiköiden keinuvivut (3) ja polttoaineen ruiskutusyksiköiden säätöakseli (16). Imunokka-akseli ja pakonokka-akseli on laakeroitu liukulaakereihin. Jakopäästä katsoen ensimmäinen laakeri on sovitelaakeri, joka lukitsee nokka-akselin aksiaalissuunnassa.

Keinuvipujen akselit on porattu ontoiksi, laakeroitu venttiilikoteloon ja lukittu kukin ohjauslastallaan pyörimistä vastaan. Kannatusholkit, kutakin kolmea keinuvipuakselia varten, on työnnetty keinuvivun akselien päälle. Venttiilien keinuvivut on laakeroitu kannatusholkkeihin ja lukittu aksiaalisesti välilevyillä. Ruiskutusyksiköiden keinuvivut on laakeroitu keinuvivun akseliin ja lukittu aksiaalisesti lukitusrenkailla.

Kampiakseli käyttää nokka-akseleita hammaspyörien välityksellä. Nokka-akselit ohjaavat keinuvipujen välityksellä venttiileitä. Imunokka-akseli ohjaa tämän lisäksi ruiskutusyksiköiden keinuvipuja. Säätöakseli on päistään laakeroitu urakuulalaakereihin. Se välittää moottorin säätäjään liikkeen ruiskutusyksiköille (2).

Jakopään kotelon kannet öljyntäyttöaukkoineen, välikotelot, välikehykset (5) ja suojakannet (6) sulkevat venttiilikotelot. Venttiilikoneisto voidellaan moottorin voiteluöljyllä oman voiteluöljykiertonsa kautta. (MTU Friedrichshafen, 1994)



Kuva 7. Venttiilikotelon läpileikkaus. (MTU Friedrichshafen, 1994)

## 6 TERÄSVALUSYLINTERINKANNEN VENTTIILI-ISTUKKA ALUEIDEN PINNOITUS

Moottorissa olevat sylinterinkannet poikkeavat normaalista rakenteesta, sillä venttiili-istukat on koneistettu suoraan sylinterinkannen perusmateriaaliin, eikä kansissa ole vaihdettavia istukkarenkaita kuten yleensä. Vaihdettavien istukkarenkaiden käyttö ei ole tässä sylinterikansiversiossa mahdollista istukka-alueen vähäisen materiaali vahvuuden vuoksi. Tämä tarkoittaa sitä, että moottorin huollon yhteydessä kuluneita istukkarenkaita ei voida vain vaihtaa uusiin vaan ne on koneistettava. Koneistusvaraa on toki useampaankin huoltoon, mutta lopulta ne kuluvat liian syviksi, jolloin keinuvipuhydrauliikan säätövara loppuu ja venttiilien tiiveys ei enää riitä moottorin normaaliin toimintaan.

Eri vaihtoehtoja on tutkittu istukka-alueiden korjaamisen, jonka jälkeen päädyttiin kokeilemaan laserpinnoitusta. Pinnoitusmateriaalien valinta perustui pitkälti tärkeimpien ominaisuuksien rajaamiseen. Pinnoitteen kovuuden tulisi vastata mahdollisimman hyvin alkuperäistä induktiokarkaistun istukan kovuutta, kulumis- kestävyyttä imu- ja pakoventtiili-istukoissa, sekä lämmön kestävyyttä pakoventtiili-istukoissa. (Martikainen, 2024)

### 6.1 Koe-erät

#### 6.1.1 Ensimmäinen koe-erä

Ensimmäisessä koe-erässä pyrittiin löytämään paras yksittäinen pinnoitusmateriaalivaihtoehto sekä imu- että pakoistukoille. Ennen koe-erää valittiin kaksi lähes samanlaista pinnoitusmateriaalia. Koe-erän aikana havaittiin, että toinen pinnoite ei toiminut odotetusti, sillä useampia kerroksia tarvittiin riittävän materiaalivahvuuden saavuttamiseksi. Monikerrospinnoituksessa siihen ilmaantui säröjä, mikä johti pinnoitteen hylkäämiseen. Toinen materiaaleista osoittautui sen sijaan toimivaksi riippumatta siitä, montako kerrosta siihen lisättiin. Näin ollen päätettiin jatkaa kokeita tällä pinnoitteella. (Martikainen, 2024)



### 6.1.2 Toinen koe-erä

Toisessa koe-erässä jatkettiin pinnoituskokeiluja ensimmäisen koe-erän tulosten perusteella. Tässä vaiheessa alettiin tarkastelemaan aiheuttaako pinnoitus kansiin muodonmuutoksia, onko mahdollisesti esilämmitykselle tarvetta ennen pinnoituksen aloittamista, sekä kartoittamaan sopivaa laitteistoa jännityksenpoistohehkutukseen. Kokeissa todettiin esilämmityksen olevan tarpeetonta ja että jännityksenpoistohehkutus pinnoittamisen jälkeen tulee suorittaa alipaineuunissa, jotta metallin hilseily voitaisiin estää. Jännityksenpoistohehkutus on metallin lämpökäsittelymenetelmä, jonka avulla vähennetään metallirakenteisiin syntyviä jännitteitä hitsauksen aikana. (Martikainen, 2024)

### 6.1.3 Kolmas koe-erä

Kolmannessa koe-erässä pyrittiin löytämään optimaalinen pinnoitteen määrä koneistusvarojen huomioimiseksi sekä optimoimaan pinnoituksen jälkeinen esikoneistus istukan lopullista koneistusta ajatellen. Tässä vaiheessa valmistettiin myös suojaustyökaluja imu- ja pakokanaviin sekä polttimeen reikään pinnoitusprosessin aiheuttamien roiskeiden estämiseksi. (Martikainen, 2024)

## 6.2 Testierät

### 6.2.1 Ensimmäinen testierä

Koe-erien jälkeen siirryttiin testieriin, jossa sylinterinkannet asennettiin moottoriin. Testierät aloitettiin asentamalla puolet kansista pinnoitettuna ja puolet pinnoittamattomina. Koeajot suoritettiin moottorin koekäyttölaitoksessa.

Ennen koeajojen aloittamista sylinterinkannet valmisteltiin pinnoitusta varten. Kannet esikoneistettiin ja tarkastettiin käyttäen NDT-menetelmää. NDT eli rikkomaton aineenkoetus on tarkastusmenetelmä, jota käytetään hitsien, valujen ja muiden metallirakenteiden tarkastamiseen ilman, että materiaalia vaurioitetaan.

Istukat pinnoitettiin laserilla, jonka jälkeen ne puhdistettiin ja valmisteltiin lämpökäsittelyä varten, joka suoritettiin alipaineuunissa. Lopuksi Istukat koneistettiin, NDT-tarkastettiin uudelleen, sylinterinkansien palopinta hiottiin ja kansien vesitilat koeponnistettiin, jonka jälkeen sylinterinkannet kasattiin lopulliseen muotoonsa. Pinnoitteen ja kannen perusmateriaalien liitospinnassa huomattiin lieviä epäjatkuvuuksia, jotka todettiin vaarattomaksi moottoritestauksia varten. Tämä ongelma korjattiin seuraavassa testierässä muuttamalla pinnoitusta varten esikoneistettujen poterojen suuaukkojen profiilia.

Moottoria ajettiin vaihtelevilla kuormituksilla, jotka pyrittiin suunnittelemaan vastaamaan moottorin normaalia käyttöä. Tämän jälkeen tehtiin sylinterien tähtystykset ja venttiilien toimintavälyksien tarkastus. Hyväksytyjen tarkastustulosten jälkeen koeajoja jatkettiin. Koeajon jälkeen testikannet irrotettiin tarkastelua varten. Imu- ja pakopuolen tiiveystestissä havaittiin imupuolella tiiveyden heikentyneen, ja imupuolen istukoissa havaittiin selvää kulumaa. Pakopuolen tiiveys ja istukoiden kunto olivat kuitenkin normaaleja.

Imuventtiili-istukoiden kuntoa tarkasteltiin tarkemmin tutkimuksen yhteydessä. Tarkastelun kohteena oli yksi käytetty sylinterikansi, johon kuuluivat imu- ja pakoventtiilit, sekä vertailuna uudet imu- ja pakoventtiilit sekä käyttämätön, myös pinnoitettu ja koneistettu sylinterikansi. Ensimmäisen testierän sylinterikannet poistettiin käytöstä tämän jälkeen. (Martikainen, 2024)

#### 6.2.2 Toinen testierä

Koeajotulosten ja tutkimuksen perusteella päätettiin ryhtyä selvittämään vaihtoehtoisia pinnoitemateriaaleja imuventtiili-istukoille. Koekappaleita valmistettiin vaihtoehtoisilla pinnoitusmateriaaleilla, joille suoritettiin kovuuskoetestejä sekä lämpökäsittelimättöminä että eri lämpötiloissa lämpökäsiteltynä.

Toisen testierän kansista muodostettiin erilaisia kombinaatioita valituilla pinnoitusmateriaaleilla tulevia testejä varten. Kansille suoritettiin samat

työvaiheet kuin kappaleessa 5.2.1. Testikannet asennettiin moottoriin, ja niillä suoritettiin koeajoja tarkastuksineen, joissa ei havaittu poikkeavuuksia.

Toisen testierän sylinterikannet irrotettiin jatkotarkastuksia varten. Näissä tarkastuksissa ei havaittu normaalista poikkeavaa, ja ne asennettiin takaisin moottoriin. Yksi testisylinterikansi korvattiin alkuperäisellä tehdastekoisella ja kunnostetulla sylinterinkannella tulevia seurantatutkimuksia varten.

Sylinterikansien testausta jatkettiin koekäyttölaitoksessa vastaavalla vaihtelevaa kuormitusta sisältävällä koeajo-ohjelmalla. Koeajon jälkeen testikansien venttiilien toimintavälykset tarkastettiin, ja ne todettiin normaaleiksi. Moottori todettiin valmiiksi kenttätesteille, jolloin se asennettiin alukseen. Moottori testikansineen on tälläkin hetkellä vielä kenttätesteissä ja pidemmän aikavälin vaikutusta seurataan säännöllisesti huoltojen yhteydessä. (Martikainen, 2024)

## 7 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Opinnäytetyössä käytetyn tutkimuksen tulokset tarjoavat vakuuttavia näyttöjä laserpinnoituksen merkittävistä eduista perinteisiin korjausmenetelmiin verrattuna. Laserpinnoitus on osoittautunut erityisen hyödylliseksi tarjoten tarkan ja kestävän pinnoituksen, mikä vähentää lämpökuormitusta ja vaurioiden riskiä moottoreissa. Sen kyky pinnoittaa monimutkaisia muotoja laajentaa sen sovelsuhmahdollisuuksia monipuolisesti moottoreiden korjauksessa.

Vaikka perinteiset korjausmenetelmät, kuten kylmä- ja kuumakorjaus, ovat edelleen käyttökelpoisia tietyissä tilanteissa, laserpinnoitus tarjoaa yleisesti ottaen tehokkaamman ja kestävämmän vaihtoehdon. Sen tarkkuus, luotettavuus ja kestävyys tekevät siitä houkuttelevan vaihtoehdon moottorinhuollon ammattilaisille. Työssä käsitelty sylinterinkansien venttiili-istukoiden pinnoitus olisi ollut käytännössä mahdotonta perinteisillä korjausmenetelmillä.

Vaikka tutkimus keskittyi pääasiassa sylinterinkansien korjaukseen, sen tulokset voivat olla hyödyllisiä myös muiden moottorikomponenttien korjauksessa. Tehokkaammat ja kestävämmät korjausmenetelmät voivat johtaa vähentyneisiin huoltokustannuksiin ja pidempään käyttöikään, mikä on olennainen seikka teollisuuden moottoreiden ja komponenttien ylläpidossa.

Jatkotutkimuksessa olisi hyödyllistä syventyä tarkemmin laserpinnoituksen soveltamiseen erilaisissa moottorikomponenteissa, vertailla sitä laajemmin muihin korjausmenetelmiin ja miten sitä voitaisiin hyödyntää esimerkiksi halkeama korjauksissa, joita korjataan vielä perinteisesti. Lisäksi voitaisiin tutkia laserpinnoituksen vaikutuksia polttoainetalouteen ja päästöihin sekä sen taloudellista kannattavuutta pitkällä aikavälillä. Lisätutkimus voisi myös sisältää käytännön kokeita ja vertailevia analyyseja eri korjausmenetelmien suorituskyvystä erilaisissa moottoriolosuhteissa.

Tämä opinnäytetyö oli lähinnä vain pintaraapaisu johtuen yritysten ja alan salassa pidettävissä tiedoista, mutta itselleni se avasi hyvin aihetta ja sen mahdollisuuksia. Laserpinnoitus alan kasvaessa ja kehittyessä voisi se tarjota hyviä mahdollisuuksia ja ratkaisuja teollisuudelle, mahdollisesti jopa tavalliselle kuluttajalle. Vaikka laserpinnoitus voi vielä olla insinöörien ja suunnittelijoiden keskuudessa vähän käytetty menetelmä kannattaisi sen tarjoamia vaihtoehtoja ja mahdollisuuksia hyödyntää.

## 8 LÄHTEET

Borchert, L. (31. 8 2023). irontite. *Crack Repair: Restoring Cracked Blocks and Heads*. Cedar Rapids, Iowa, Yhdysvallat. Noudettu osoitteesta <https://irontite.com/a/40-crack-repair-restoring-cracked-blocks-and-heads>

Carley, L. (2015). Engine Block and Head Repair. *ENGINEBUILDER*. Noudettu osoitteesta <https://www.enginebuildermag.com/2015/04/engine-block-and-head-repair/>

Caterpillar Motoren GmbH & Co.KG. (2022). Cylinder head welding. Kiel, Saksa. Noudettu osoitteesta [https://www.cat.com/en\\_US/by-industry/marine/marine-product-support/mak-parts-repair-options/cylinder-head-welding.html](https://www.cat.com/en_US/by-industry/marine/marine-product-support/mak-parts-repair-options/cylinder-head-welding.html)

GSD Nordic. (2019). Pinnoittamalla uutta ehommaksi. Rovaniemi, Suomi. Noudettu osoitteesta <https://read.epaper.fi/5274/Gd6ZA8gp>

LCC Kokkola. (2018). Business letter. Kokkola, Suomi.

Martikainen, E. (2024). *Teräsvalusylinterikannen venttiili-istukka-alueiden korjauskehtiys*. Linnavuori: Patria Aviation Oy.

MTU Friedrichshafen. (1994). *Dieselmoottori 16 V538 TB 93 rakenneselostus ja käyttöohje*. MTU Friedrichshafen.

Virtasen koneistamo. (2024). *Mitä metalliruiskutus on?* Noudettu osoitteesta Metalliruiskutus.fi: <https://www.metalliruiskutus.fi/>

Vuoristo, P.;Tuominen, J.;& Nurminen, J. (2005). Laser coating and thermal spraying - process basics and coating properies. *International Thermal Spray Conference & Exposition ITSC 2005*. Tampere: Tampere University of Technology, Institute of Materials Science.