

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Konetekniikan osasto

**Alumiinirakenteiden kulumiskestävyyden parantaminen
laserpintakäsittelyillä**

Diplomityön aihe on hyväksytty konetekniikan osaston osastoneuvostossa 7.5.2003

Työn 1. tarkastaja	Professori, TkT Veli Kujanpää
Työn 2. tarkastaja	Professori, TkT Jukka Martikainen
Työn ohjaajat:	Erikoistutkija, TkT Petteri Jernström
	Tutkija, DI Anssi Jansson

Lappeenrannassa 15.10.2003

Teemu Mäkinen
Korpraalinkuja 3 as 303
53810 Lappeenranta
050-5164967

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Konetekniikan osasto

Teemu Mäkinen

Alumiinirakenteiden kulumiskestävyyden parantaminen laserpintakäsittelyillä

Diplomityö

2003

122 sivua, 60 kuvaa ja 16 taulukkoa

Tarkastajat: Professori Veli Kujanpää

 Professori Jukka Martikainen

Hakusanat: alumiini, kulumiskestävyys, laserpintakäsittely

Keywords: aluminium, wear resistance, laser surface treatment

Alumiini on pienen ominaispainonsa, hyvän korroosiokestävyytensä ja muotoiltavuutensa ansiosta runsaasti käytetty materiaali niin koneenosissa, kuin monissa muissakin rakenteissa. Alumiinin pehmeys ja huono kulumiskestävyys ovat rajoittaneet sen käyttöä.

Alumiinin kovuuden ja kulumiskestävyyden parantaminen laajentaisi sen käyttömahdollisuuksia. Laserpintakäsittelymenetelmien käyttö on potentiaalinen, mutta vielä vähän tutkittu keino alumiinin kulumiskestävyyden parantamiseksi.

Diplomityön teoriaosassa käsitellään materiaalin eri kulumismekanismeja, kohdemateriaali alumiinin ominaisuuksia ja tarkastellaan keinoja parantaa kulumiskestävyyttä sekä perinteisillä tekniikoilla että erityisesti lasertekniikoiden avulla.

Diplomityön kokeellisessa osassa tehtiin laserpintakäsittelykokeita Nd:YAG-laserilla tavoitteena kovuuden ja kulumiskestävyyden parantaminen. Parhaat tulokset saavutettiin laserpinnanseostustekniikalla nikkelpohjaisella Inconel 625-seosaineella.

Diplomityössä tehdyissä kokeissa saavutettiin yli 10-kertainen alumiinin pinnankovuus verrattuna käsittelemättömään perusaineeseen. Abrasiivinen kulumiskestävyys parantui parhaimmillaan yli kolminkertaiseksi verrattuna käsittelemättömään alumiiniin ja anodisoituihin vertailukappaleisiin. Tutkimuksessa määriteltiin myös parametrialue kokeissa käytetyille perus- ja lisäaineelle. Diplomityössä tehdyt kokeet toimivat hyvänä pohjana jatkokokeille.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Department of Mechanical Engineering
Teemu Mäkinen

Improving wear resistance of aluminium structures with laser surface treatment processes

Master's thesis
2003

122 pages, 60 figures and 16 tables

Supervisors: Professor Veli Kujanpää
 Professor Jukka Martikainen

Keywords: aluminium, wear resistance, laser surface treatment

Aluminium is a widely used material in mechanical parts and many other structures, because of its low specific weight, good corrosion resistance and good shaping properties. Softness and poor wear resistance have limited the use of aluminium.

Improving hardness and wear resistance of aluminium will extend its potential usage. Laser surface treatment is a potential method, however its use in improving the wear resistance of aluminium has not been extensively studied.

The theoretical part of this master's thesis concentrates on the wear mechanisms of materials and the properties of aluminium. Methods to improve wear resistance by conventional processes and especially by laser techniques have been studied.

In the experimental part of the master's thesis Nd:YAG laser surface treatments tests were carried out in order to enhance hardness and wear resistance. The best results were reached with a laser surface alloying technique by using Inconel 625 powder.

The experiments show that the hardness of aluminium can be increased tenfold by using laser surface alloying method. The abrasive wear resistance was over 3-times higher than the wear resistance of untreated base material or anodised base material. A parameter window was defined for base and additional material used in tests. Performed experiments act as good groundwork for future additional tests.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

KÄYTETYT SYMBOLIT JA LYHENTEET

1	JOHDANTO	6
<i>1.1</i>	<i>Diplomityön tausta ja aiheen valinta</i>	<i>6</i>
<i>1.2</i>	<i>Diplomityön määrittely, tavoitteet ja rajaus</i>	<i>6</i>
<i>1.3</i>	<i>Yritysesittelyt</i>	<i>8</i>
1.3.1	Metso Paper Turku Works Oy	8
1.3.2	Tulevaisuuden tehdas	10
	TEORIAOSA	11
2	KULUMINEN	11
<i>2.1</i>	<i>Kulumistyytit</i>	<i>13</i>
<i>2.2</i>	<i>Kulumismekanismit</i>	<i>14</i>
2.2.1	Abrasiivinen kuluminen	14
2.2.2	Adhesiivinen kuluminen	15
2.2.3	Tribokemiallinen kuluminen	16
2.2.4	Väsymiskuluminen.....	17
2.2.5	Kulumismekanismin määrittäminen	18
3	ALUMIINI RAKENNEMATERIAALINA	20
<i>3.1</i>	<i>Ominaisuudet</i>	<i>21</i>
<i>3.2</i>	<i>Alumiiniseokset</i>	<i>25</i>

4	ALUMIININ PINTAKÄSITTELYMENETELMÄT	27
4.1	<i>Anodisointi</i>.....	27
4.2	<i>Terminen ruiskutus</i>.....	29
4.3	<i>Kaasufaasipinnoitus</i>.....	32
4.4	<i>Pinnansulatus</i>.....	33
5	LASERPINTAKÄSITTELYTEKNIIKAT	34
5.1	<i>Laser pintakäsittelyssä</i>	34
5.1.1	Periaate.....	35
5.1.2	Pintakäsittelyssä käytettävät lasertyypit.....	36
5.1.3	Laservalon absorptio pintakäsittelyissä.....	40
5.1.4	Tehohäviö laserpintakäsittelyssä.....	42
5.2	<i>Laserpintakäsittelyt</i>	43
5.2.1	Lisäaineellinen laserpintakäsittely	46
5.2.2	Laserpinnoitus	50
5.2.3	Laserpinnansulatus	51
5.2.4	Laserpinnanseostus	53
5.2.5	Kovien partikkelien seostaminen	57
5.2.6	Laserpintakarkaisu	63
5.2.7	Muita menetelmiä	64
5.3	<i>Laserpintakäsiteltävän kappaleen esikäsittely</i>	65
5.3.1	Esilämmitys.....	65
5.3.2	Oksidikalvon merkitys	66
	KOKEELLINEN OSA	68
6	TYÖN TAUSTA JA TAVOITTEET.....	68
7	KOEJÄRJESTELYT.....	72
7.1	<i>Kokeiden kulku</i>.....	72
7.1.1	Esikokeet.....	74
7.1.2	Varsinaiset kokeet.....	75
7.2	<i>Koelaitteistot</i>.....	76
7.2.1	Laser.....	76
7.2.2	Jauheensyöttölaitteisto	77
7.2.3	Työasema	78

7.3	<i>Parametrit</i>	80
7.4	<i>Koemateriaalit</i>	82
7.4.1	Perusaine	82
7.4.2	Lisäaineet	83
8	KOEKAPPALEIDEN TUTKIMUSMENETELMÄT	85
8.1	<i>Silmämääräinen tarkastelu</i>	85
8.2	<i>Makro- ja mikrorakenteen tarkastelu</i>	85
8.3	<i>Kovuuskokeet</i>	85
8.4	<i>Kulumiskokeet</i>	86
8.5	<i>Radiografinen tarkastelu</i>	87
8.6	<i>Alkuaineanalyysi</i>	87
9	TULOKSET JA TULOSTEN ANALYSOINTI	88
9.1	<i>Silmämääräinen tarkastelu</i>	88
9.2	<i>Makro- ja mikrorakenteen tarkastelu</i>	91
9.2.1	Makrorakenne	91
9.2.2	Mikrorakenne	97
9.3	<i>Kovuuskokeet</i>	98
9.4	<i>Kulumiskokeet</i>	102
9.5	<i>Radiografinen tarkastelu</i>	103
9.6	<i>Alkuaineanalyysi</i>	104
9.7	<i>Parametrialue</i>	106
9.7.1	Laserteho	106
9.7.2	Jauheensyöttönopeus.....	107
9.7.3	Parametri-ikkuna	108
10	JOHTOPÄÄTÖKSET	110
11	JATKOKEHITYS	112
12	YHTEENVETO	114

KÄYTETYT SYMBOLIT JA LYHENTEET

AW	Alumiinin merkintä = muokattavat seokset (wrought alloys)
CVD	Chemical Vapour Deposition = kemiallinen kaasufaasipinnoitus
EDS	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy = energiadiispersiivinen röntgenalkuaineanalyyttori
HV	Hardness Vickers = Vickers kovuus
HVOF	High Velocity Oxy Flame Spraying = suurnopeusliekkiruiskutus
MIG	Metal Inert Gas
MMC	Metal Matrix Composite = metallimatriisikomposiitti
Nd:YAG	Neodymium-Yttrium-Aluminium-Garnet
PTA	Plasma Transfer Arc = jauheplasmaruiskutus
PVA	Polyvinyylialkoholi
PVD	Physical Vapour Deposition = fysikaalinen kaasufaasipinnoitus
SEM	Scanning electron microscope = pyyhkäisyelektronimikroskoopi
SFS-EN	EN-standardi, jonka Suomen standardisoimisliitto on hyväksynyt
SRHS	Alumiini profiilin merkintä
T5	Alumiinin toimitustila
TIG	Tungsten Inert Gas

1 Johdanto

1.1 Diplomityön tausta ja aiheen valinta

Diplomityö on osa LTY:n, VTT:n, TEKES:in ja 15 suomalaisen metallialan teollisuusyrityksen yhteistä ”Suurten kappaleiden Nd:YAG- laserhitsaus” – projektia. Diplomityö liittyy projektissa mukana olevan Metso Paper Turku Works Oy:n yrityscaseen.

Diplomityön aiheen valinta perustui Metso Paper Turku Works Oy:n tarpeeseen parantaa paperikoneen alumiinisten komponenttien kulumiskestävyyttä paikallisesti. Sovelluskohteena oli puhalluslaatikon suuttimen reunan kulumiskestävyyden parantaminen.

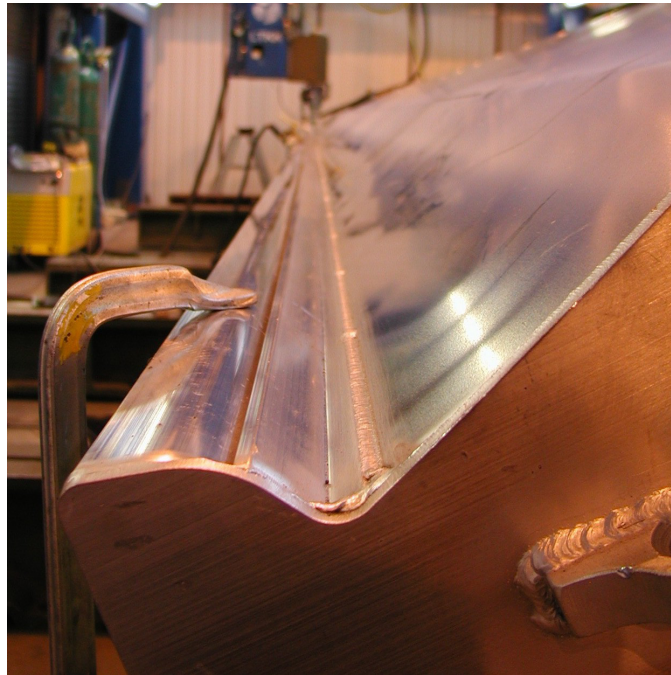
1.2 Diplomityön määrittely, tavoitteet ja rajaus

Alumiini on pienen ominaispainonsa, hyvän korroosiokestävyytensä ja muotoiltavuutensa ansiosta runsaasti käytetty materiaali niin koneenosissa kuin monissa muissakin rakenteissa.

Joissakin käyttökohteissa alumiinin käyttöä rajoittaa sen pehmeys ja heikko kulumiskestävyys. Diplomityössä tutkitaan alumiinin pintaominaisuuksien parantamista laserpintakäsittelymenetelmillä.

Alumiinin kulumiskestävyyttä parantavista pintakäsittelyistä on Suomessa eniten käytetty lähinnä anodisointia ja termisiä ruiskutusmenetelmiä. Alumiinin laserpintakäsittelyjen tutkimus on ollut Suomessa vähäistä. Ulkomaisia tutkimusraportteja erilaisista alumiinin laserpintakäsittelyprosesseista löytyy jonkin verran. Teollisuuskäytössä alumiinin laserpintakäsittelyt eivät ole yleisiä.

Teollisuuden sovelluskohde diplomityössä tehtävälle tutkimukselle on paperikoneissa käytetyn, alumiinista valmistetun, puhalluslaatikon suutinprofiilin (kuva 1) reunan kulumiskestävyyden parantaminen.



Kuva 1. Puhalluslaatikon suutinosa.

Kulumiskestävyyden osalta diplomityössä asetettiin tavoitteeksi saavuttaa parempi abrasiivinen kulumiskestävyys kuin perinteisesti alumiinin kulumiskestävyyden parantamisessa käytetyllä anodisoinnilla. Tavoitteena oli aluksi löytää sopiva laserpintakäsittelymenetelmä, saada pintakäsittelyprosessi toimivaksi, löytää oikean suuntaiset parametrit ja saada aikaan laserpintakäsittelyllä silmämääräisesti tarkasteltuna hyvänlaatuinen pinta. Tavoitteena oli myös oppia tuntemaan paremmin alumiinin pintakäsittelyprosessia ja sen eri parametrien vaikutusta käsittelyn lopputulokseen.

Diplomityö rajattiin käsittelemään alumiiniseoksia ja suhteellisen ohuita aineenvahvuuksia (3-5 mm). Kokeet suoritettiin alumiiniseoksella AW-6063 (AlMg0,7Si), mistä yrityscasen sovelluskohteen rakenne valmistetaan. Kokeet

rajattiin Nd:YAG-laserilla tehtäviin pintakäsittelyihin. Kokeissa tavoitteena oli kehittää pintakäsittelymenetelmä, joka on riittävän yksinkertainen ja helposti hallittava soveltuakseen konepajatuotantoon. Tämän vuoksi kokeet rajattiin pintakäsittelymenetelmiin, missä lisäaine syötetään dynaamisesti eli prosessin aikana. Toinen menetelmävaihtoehto olisi pintakäsittely esiasetetulla lisäaineella, missä lisäaine esiasetetaan käsiteltävän kappaleen pintaan ennen laserenergian tuontia.

1.3 Yritysesittelyt

1.3.1 Metso Paper Turku Works Oy

Metso Paper Turku Works Oy (kuva 2) on Metso-konserniin kuuluva prosessiteollisuuden osia valmistava konepaja. Se keskittyy pääasiassa kirkaista metalleista eli alumiinista ja ruostumattomasta teräksestä valmistettujen osien tuotantoon.

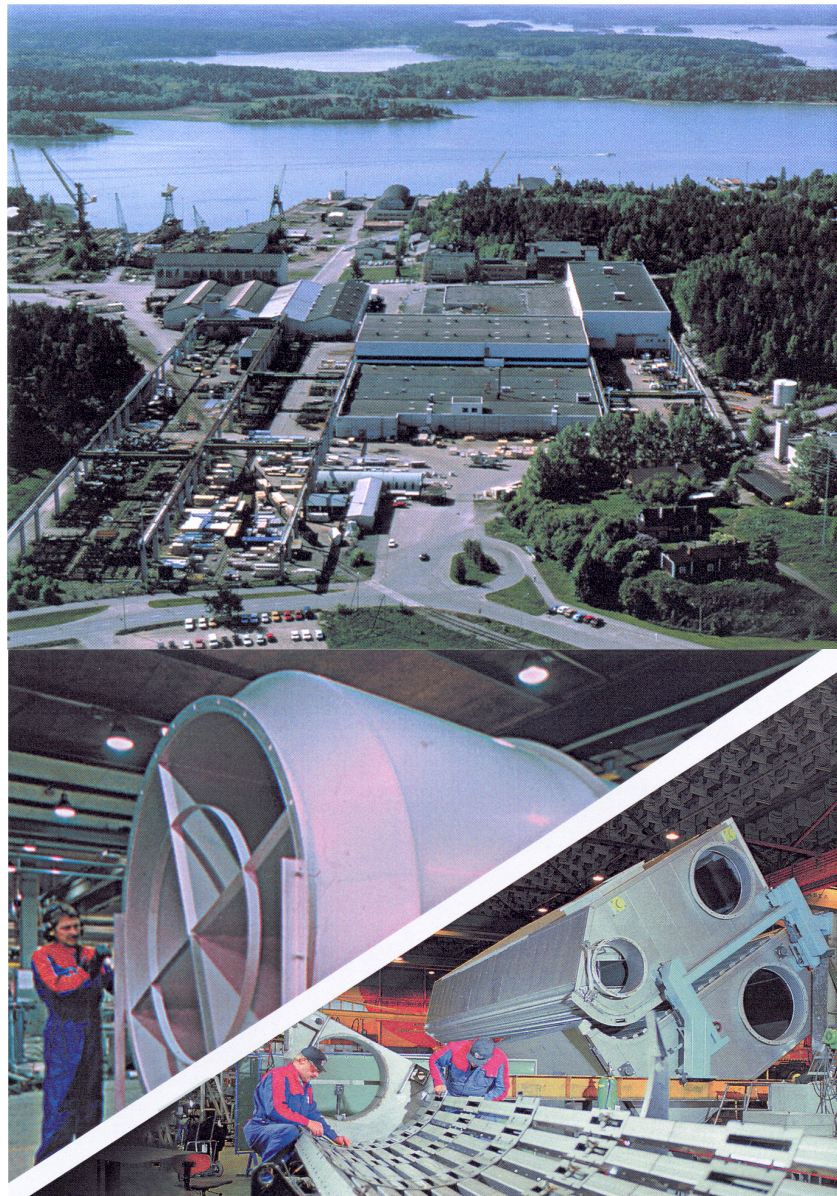
Metso Paper Turku Works Oy:llä on pitkät perinteet teollisuuden prosessilaitteiden valmistajana seuraavilla toiminta-alueilla:

- paperikoneilmastointi
- puutavarakuivaamo
- teräs- ja alumiinirakenteet
- sahakoneet
- huoneilmastointi
- paineastiat
- laivanrakennus.

Metso Paper Turku Works Oy on edelläkävijä paperikoneiden ilmalaitteiden valmistajana. Sen tuotteisiin kuuluvat mm. puhalluslaatikot paperirainan

ajettavuuden parantamiseen, lämmönvaihtimet, kuivattimet, kuivatusviirojen puhdistuslaitteet ja suihkuputket.

Turku Works:ssä on töissä noin 150 henkilöä. Työntekijöistä suurin osa on luokiteltuja hitsaajia. /1/



Kuva 2. Metso Paper Turku Works Oy. /1/

1.3.2 Tulevaisuuden tehdas

Tulevaisuuden tehdas (kuva 3) sijaitsee Lappeenrannassa teknologiakeskus Kareltekin yhteydessä. Tulevaisuuden tehtaassa toimivat LTY:n konetekniikan osaston lasertyöstön laboratorio, VTT:n tuotteet ja tuotanto-yksikköön kuuluva lasertyöstöön keskittynyt tutkimusryhmä ja LTY:n konetekniikan osaston levytyötekniikan laboratorio.

Tulevaisuuden tehtaassa tehtävä tutkimus on pääasiassa teollisuuden suuntautuvaa asiakaslähtöistä soveltavaa tutkimus- ja kehitystyötä. Tutkimuksen painopistealueita lasertyöstön alueella ovat laserhitsaus, laserleikkaus ja laserpintakäsittelyt. Uusimpina tutkimusalueina on paperin ja kartongin laserleikkaus sekä hieno- ja mikrotyöstö.

Tulevaisuuden tehtaassa oleva laserlaitteisto koostuu 6 kW:n, 2,7 kW:n ja 2,5 kW:n CO₂-lasereista, 3 kW:n, 50 W:n ja merkkaus Nd:YAG-lasereista ja 3 kW:n ja 100 W:n diodilasereista. /2/



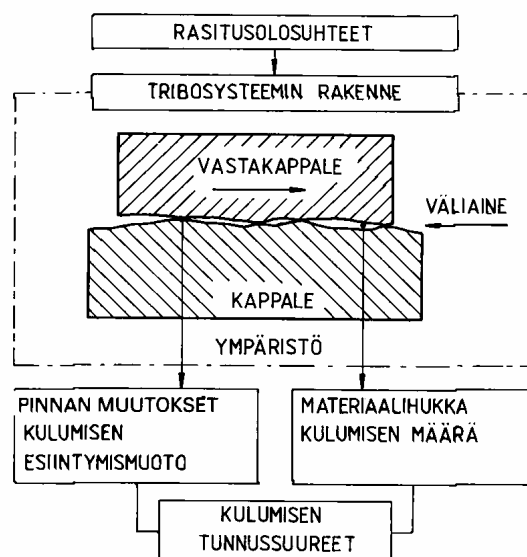
Kuva 3. Tulevaisuuden tehdas. /2/

TEORIAOSA

2 Kuluminen

Kulumisen käsitetään materiaalin häviämisenä kappaleen pinnalta. Sen voi aiheuttaa usea eri tekijä. Usein se on seurausta liikkuvien pintojen vuorovaikutuksesta. Yleensä kulumisen on haitallinen ilmiö, mutta monissa tapauksissa sitä myös hyödynnetään. Tällaisia tapauksia ovat mm. koneiden sisäänajovaihe ja erilaiset työstöt. Ajan myötä kulumisen aiheuttaa koneenosien tai työkalun toimintakyvyn heikkenemistä ja saattaa johtaa laitteen vaurioitumiseen. /3, s. 97; 4, s. 27; 5, s. 132/

Kulumiseen vaikuttavat ratkaisevasti kuluvan ja kuluttavan pinnan keskinäisen vaikutuksen luonne. Tämä muodostaa kulumisilmiöön vaikuttavan tribologisen systeemin (kuva 4). Siihen vaikuttavat lähinnä kuorma, liike, materiaalien ominaisuudet, osien geometria, pinnankarheus, lämpötila ja muut ympäristötekijät. /4, s. 27; 6, s. 3/



Kuva 4. Kulumisen tribosysteemi. /4, s. 27/

Kuluminen ei ole ilmiönä yksiselitteinen ja sitä ei ole täydellisesti pystytty määrittämään. Kulumistapahtumaan vaikuttavia parametreja on monia ja niiden samanaikainen hallinta on vaikeaa. Kulumisesta on muodostettu erilaisia teoreettisia kulumislakeja, mutta niiden paikkansapitävyydestä ja soveltuvuudesta ei olla täysin yksimielisiä. /3, s. 97/

Kulumiskestävyys on riippuvainen materiaalin ominaisuuksista ja kulumistyyppistä monimutkaisella tavalla. Ratkaisevimpia aineominaisuuksia kulutuskestävyydessä on materiaalin kovuus. Materiaalin liukuominaisuudet vaikuttavat myös kulumiskestävyyteen. Liukuominaisuuksia mitataan yleensä aineen kitkakertoimella. /4, s. 11/

Kitkan ja kulumisen malliteoria

Seuraavat kaavat on johdettu kulumisen malliteorian mukaan. /3, s. 99; 5, s. 138/

$$V = 2\alpha \frac{F_N * s}{\sigma_0} \quad , \text{jossa} \quad (1)$$

V= kulunut tilavuus

s = matka

F_N = puristusvoima

σ_0 = materiaalin myötölujuus

α = todennäköisyyskerroin

Edellinen kaava voidaan kirjoittaa myös seuraavaan muotoon.

$$V = Z \frac{F_N * s}{H} \quad (\text{Holmin kulumisyhtälö}) \quad , \text{jossa} \quad (2)$$

Z = kulumiskerroin

H = materiaalin kovuus

Kaavoista voidaan päätellä kolme kulumisen peruslakia:

1. Kulunut tilavuus on suoraan verrannollinen liukumismatkaan.
2. Kulunut tilavuus on suoraan verrannollinen kuormaan.
3. Kulunut tilavuus on kääntäen verrannollinen materiaalin myötölujuuteen.

Edellä esitetyt ideaalisen kulumisen kaavat eivät suoraan päde todellisiin kohteisiin, mutta niitä voidaan käyttää perustana kulumisen arviointiin.

Yleensä kuluminen on jaettu Suomessa kahdella tavalla: /3, s. 100; 5, s. 140/

1. luokittelu kulumista aiheuttavan liikkeen mukaan
2. luokittelu kulumismekanismin mukaan.

2.1 Kulumistyytit

Kuluminen voidaan luokitella sitä aiheuttavan liikkeen perusteella kuuteen eri tyyppiin: /3, s.100; 5, s.141/

- liukuminen
- vierintä

- iskukuormitus
- värähtely
- nestevirtaus
- nestevirtaus, jossa on kiinteitä partikkeleita.

Kulumisen mekanismeista ovat: /5, s.141/

- pinnan väsyminen
- abraasio
- adheesio
- tribokemialliset prosessit.

2.2 Kulumismekanismit

Teollisuudessa kulumisvauriot jakautuvat kulumismekanismittain seuraavasti: /6, s. 3/

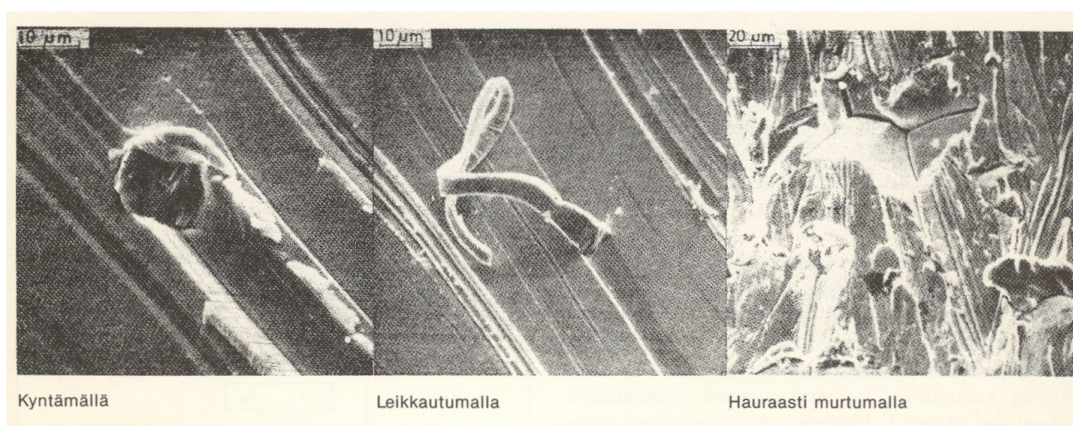
- abrasiivinen kuluminen	55 %
- adhesiivinen kuluminen	15 %
- väsymiskuluminen	15 %
- tribokemiallinen kuluminen	15 %

Todellisuudessa kuluminen tapahtuu yleensä monella eri mekanismilla yhtä aikaa, joista yksi on hallitseva.

2.2.1 Abrasiivinen kuluminen

Abrasiivinen eli hiontakuluminen on yleisin teollisuudessa esiintyvä kulumismekanismi. Siinä kuluminen tapahtuu hioutumalla, leikkautumalla tai hauraasti murtumalla (kuva 5). Kuluminen tapahtuu kovemman pinnan liukuessa

pehmeämpää vasten. Kovemman pinnan pinnankarheuden huiput kuluttavat normaalivoiman vaikutuksesta pehmeämpää pintaa. Sama ilmiö tapahtuu myös, kun kahden toisiaan vasten liukuvan pinnan välissä on niitä kovempaa materiaalia. /4, s. 27; 3, s.109/

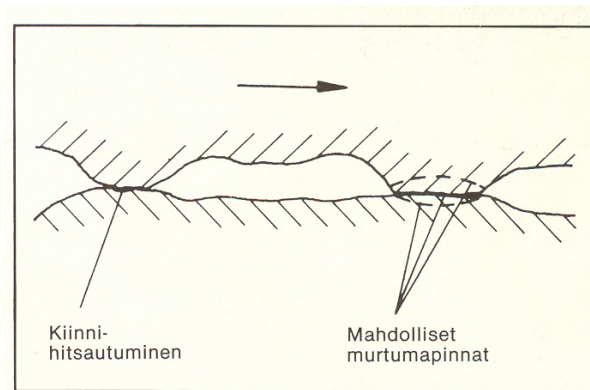


Kuva 5. Kuluminen eri hiontakulumismekanismeilla. /6, s. 4/

Abrasiivinen kulumiskestävyys on suoraan verrannollinen materiaalin alkuperäiseen kovuuteen. Kovuutta kohentavilla pintakäsittelyillä ei yleensä saavuteta kulumiskestävyteen parannusta, ellei käsittelyssä aikaansaada koko matriisin rakenteen muuttumista. /5, s. 195/

2.2.2 Adhesiivinen kuluminen

Adhesiivista- eli tartuntakulumista syntyy, kun toistensa suhteen liukuvista pinnoista irtoaa materiaalia pintojen hetkellisten yhteentarttumien eli adhesiivisten liitosten leikkautuessa (kuva 6). Tätä kutsutaan joskus myös kylmähitsautumiseksi. ”Hitsautumiseen” vaikuttavat pintojen fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet. Voitelu on tehokas keino vähentää adhesiivista kulumista. /3, s.105; 6, s. 5/

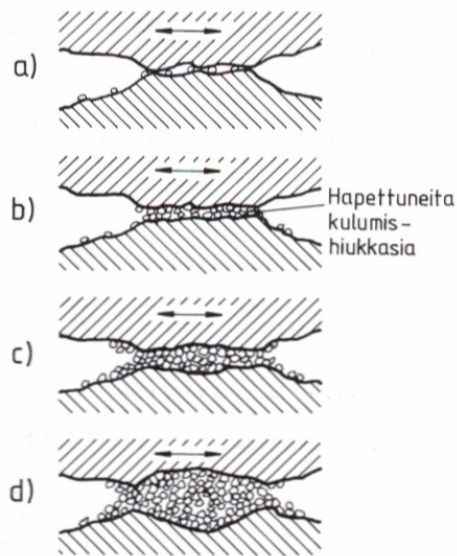


Kuva 6. Adhesiivisen kulumisen mekanismi. /6, s. 5/

2.2.3 Tribokemiallinen kuluminen

Tribokemiallinen kuluminen on metallipintojen muodostaman reaktiotuotekerroksen kulumista suhteellisen liikkeen seurauksena. Reaktiotuotekerros, yleensä oksidikerros, rikkoutuu ja paljastunut metallipinta reagoi uudelleen ympäristönsä kanssa. Tribokemialliseen kulumiseen vaikuttaa pinnan reagointi ympäristön kanssa eli korrosio ja hapettuminen sekä reagointi voiteluaineiden kanssa. /6, s. 7; 3, s. 112; 4, s. 27/

Eräs tribokemiallisen kulumisen tyyppi on värähtelykuluminen (kuva 7), jossa toisiaan koskettavien pintojen pieniamplitudinen (0,1-1,0 mm) liike synnyttää kulumispartikkeleita adhesiivisten liitosten repeillessä liikkeen vaikutuksesta. /6, s. 7/

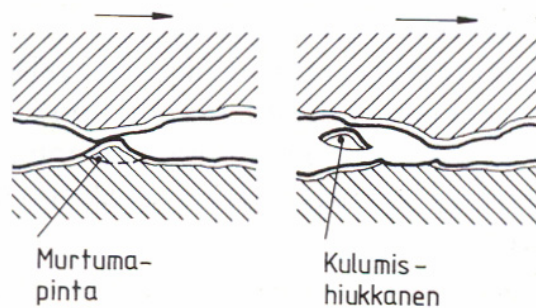


Kuva 7. Värähtelykulumisen mekanismi, esimerkki tribokemiallisesta kulumisesta.

/4, s. 28/

2.2.4 Väsymiskuluminen

Lähes kaikissa kosketuksissa tapahtuu plastista deformaatiota. Kun yksi uloke deformoituu tarpeeksi monta kertaa, se irtoaa väsymismurtuman seurauksena (kuva 8). Mikäli muiden mekanismien seurauksena ei kulumista tapahdu, on pintakerroksen väsyminen ainoa jäljelle jäävä mekanismi. Sen syntymiseen ei tarvita välttämättä plastista deformaatiota, vaan toistuvasta kuormituksesta johtuva dislokaatioiden kasautuminen ja siten väsymismurtumasärön muodostuminen riittää. /5, s.167/



Kuva 8. Väsymiskuluminen liukuvassa kosketuksessa. /4, s. 28/

2.2.5 Kulumismekanismien määrittäminen

Valittaessa materiaalia tai pintakäsittelymenetelmää kuluttavaan ympäristöön, on osattava tunnistaa mikä kulumismekanismi on vallitseva. Seuraavassa kerrotaan kulumistapahtumien ominaispiirteitä. Niiden perusteella voidaan arvioida kyseessä oleva kulumismekanismi silmämääräisellä tarkastelulla. Usein kuitenkin kulumismekanismien selvittäminen vaatii pintojen tarkempaa analysointia ja kulumisympäristön tutkimusta esimerkiksi kulumishiukkasanalyysin. /5, s. 292; 6, s. 8; 7, s. 11/

Abrasiivinen kuluminen

Pinnassa on lastuamalla tai kyntämällä syntyneitä naarmuja, uurteita ja uria, kovilla materiaaleilla myös murtumasäröjä. Kulumistuotteena on lastuja tai hauraasti irronneita partikkeleita.

Adhesiivinen kuluminen

Kulumispinnassa on sitkeän repeytymisen jälkiä, kuten kartio- ja suomumaisia ulokkeita ja kuoppia. Kulumistuotteena on metallilastuja ja metallin siirtymistä pinnasta toiseen.

Tribokemiallinen kuluminen

Kulumistuotteena on metallioksidgeja. Pinnassa on kemiallisia reaktiotuotteita (hiukkasia ja kalvoja). Pinta on kiiltävä ja tiivis.

Väsymiskuluminen

Vierinnän tapauksessa pintaan muodostuu pitting-kuoppia ja kuluminen alkaa äkillisesti. Liukumisen ollessa kyseessä tapahtuu ns. delaminaatiokulumista eli pinnasta irtoaa voimakkaasti muokkautunutta kiiltävää metallihilsettä. Pinnassa on murtumia ja pisaranmuotoisia kuoppia.

3 Alumiini rakennemateriaalina

Alumiinin historia alkoi vuonna 1825, kun tanskalainen tiedemies H. Chistian Olsten onnistui valmistamaan pienen määrän alumiinia. 30 vuotta myöhemmin alumiinin teollinen valmistus alkoi Ranskassa käyttäen kemiallista valmistusmenetelmää. 30 vuotta tämän jälkeen kehitettiin sähkökemiallinen alumiinin valmistusmenetelmä, mihin nykyiset valmistusmenetelmät perustuvat. /8, s. 3/

Alumiini on maankuoressa runsaimmin esiintyvä metallinen alkuaine. Se on hapen ja piin jälkeen kolmanneksi yleisin alkuaine maapallolla. Sen pitoisuus maankuoressa on noin 8 %. Alumiini ei esiinny maaperässä puhtaana, vaan yleensä oksideina tai silikaatteina. Metallisen alumiinin raaka-aineena käytetään pääasiassa bauksiittia. Bauksiitti on rapautumisen tuloksena syntynyt useita eri mineraaleja sisältävä kivilaji, joka sisältää alumiinioksidia. /9, s. 91; 10, s. 227; 4, s. 163/

Alumiinin valmistus suoritetaan kahdessa päävaiheessa:

- alumiinioksidin valmistus bauksiitista
- metallisen alumiinin valmistus alumiinioksidista.

Alumiinioksidin valmistuksessa yleisemmin käytetään Bayer-prosessia. Metallinen alumiini valmistetaan alumiinioksidista sulatuselektrolyysissä Hall-Heroult-menetelmällä. /11, s. 31/

Alumiinin valmistus elektrolyytisesti vaatii runsaasti energiaa. Tähän perustuu myös osittain sen hinta ja tuotannon keskittyminen halvan energian maihin. Alumiinitonnin tuottamiseen tarvitaan noin 4 tonnia bauksiittia, josta alumiinioksidin valmistus vaatii lämpöenergiaa 11 MWh. Alumiinioksidia syntyy n. 2 tonnia. Alumiinioksidista metallisen alumiinin valmistaminen elektrolyysissä vie

sähköenergiaa 16 MWh/tonni. Energiämäärä on moninkertainen esimerkiksi teräkseen verrattuna. Elektrolyysissä tarvitaan myös lisäaineita. /4, s. 164/

Alumiinia on helppo kierrättää ja uudelleensulatukseen menee vain 5 % siitä energiämäärästä, mitä tarvitaan primäärialumiinin valmistamiseen. Tällä hetkellä yli neljäsosa maailman alumiinituotannosta muodostuu kierrätetystä alumiinista. /11, s. 37/

3.1 Ominaisuudet

Alumiini on laajimmin käytetty ei-ferriittinen metalli koneenrakennuksessa, koska sillä on monia hyviä ominaisuuksia. Alumiinin ja sen seosten erikoispiirre on keveys. Alumiinin ominaispaino on $2,7 \text{ kg/dm}^3$ eli noin kolmasosa teräksen ominaispainosta. Metallin hinta lasketaan yleensä painon mukaan, mutta niitä käytetään tilavuuden mukaan. Alumiinimetallien käyttö on näin ollen edullisempaa kilohintaan perustuvassa vertailussa. Teräspalkki samoilla lujuusominaisuuksilla on noin kaksi kertaa alumiinipalkkia painavampi. Alumiinin keveys ja lujuus tuovat merkittäviä säästöjä mm. kuljetusteollisuudessa. Alumiinin käyttö autoissa, junissa, laivoissa, lentokoneissa ja muissa kulkuneuvoissa tuo säästöjä käyttökustannuksissa ja mahdollistaa hyötykuormien kasvun. Lisäksi korkeissa rakenteissa rakenteen oma paino on tärkeä ja siksi alumiini on potentiaalinen vaihtoehto (rakennusten, laivojen ja nostimien ylimmät rakenteet). /12, s. 270; 13; 14, s. 599; 15, s. 3/

Alumiinissa yhdistyy monia hyviä ominaisuuksia, minkä vuoksi siitä on tullut raudan jälkeen eniten käytetty metalli. /9, s. 8/

Alumiinin käytön perusteita eri kohteissa: /9, s. 91; 11, s. 8/

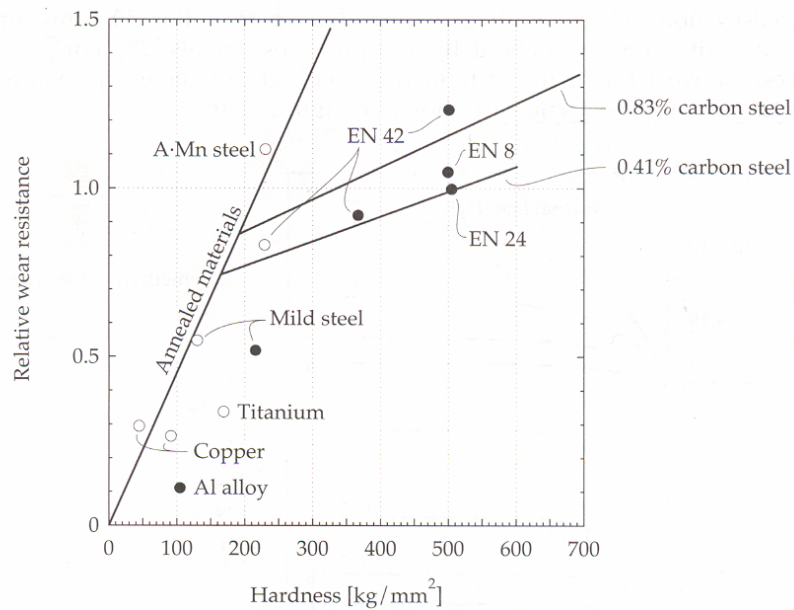
- keveys
 - tiheys 1/3 teräksen tiheydestä

- lujuus ja kestävyys
 - seostuksella saavutetaan murtolujuus yli 600 N/mm^2
 - ei haurastu matalissa lämpötiloissa, sitkeys säilyy jopa lämpötilassa -200 °C
- korroosionkestävyys
 - luonnollinen oksidikalvo suojaa metallia
- työstettävyys
 - alumiinia voidaan muokata, valaa, hitsata, juottaa ja lastuta helposti
- muotoiltavuus
 - alumiinia voidaan valssata paksuksi levyksi ja ohueksi folioksi, siitä voidaan pursottaa profiileja, valmistaa takeita, syvävetää tölkkejä, valaa muottiin tai vetää ohueksi langaksi
- liitettävyys
 - alumiinia voidaan liittää hitsaamalla, juottamalla, niittaamalla ja liimaamalla
- johtavuus
 - alumiini johtaa sähköä ja lämpöä hyvin
- taloudellisuus
 - keveyden ja lujuuden suhde ja hyvät valu- ja muovausominaisuudet tekevät alumiinin edulliseksi materiaaliksi
- ulkonäkö
 - alumiinin pinnan ulkonäkö ja värjättävyys antavat monipuoliset suunnittelu- ja käyttömahdollisuudet
- hygieenisuus
 - alumiinia voidaan käyttää elintarvikkeiden ja lääkkeiden pakkaamiseen
- kipinättömyys
 - alumiini ei kipinöi iskettäessä

- heijastuvuus
 - kiillotettu alumiinipinta heijastaa jopa 99 % valosäteilyä takaisin (ongelmia lasertyöstöissä).

Alumiiniseosten ”akilleenkantapäät”: /4, s. 297/

- matala maksimikäyttölämpötila
 - Alumiiniseokset alkavat menettää lujuuttaan yli 150 °C lämpötiloissa johtuen erkaumakarkaisussa syntyneiden koherenttien erkaumien ylivanhenemisestä.
- alhainen pitkän kestoiän väsymislujuus
 - Erkaumakarkaisulla tai kylmämuokkauksella ei saavuteta kuin lyhyen kestoiän väsymislujuuden kasvua.
- alhainen jäykkyys
 - Alumiinin kimmomoduli on noin kolmannes teräksen kimmomodulista. Vaikka alumiini voidaan lujittaa lähes rakenneteräksen lujuuteen, niin sen kimmoisen muodonmuutoksen suuruus eli alhainen jäykkyys saattaa olla monissa kohteissa rajoittava tekijä.
- alhainen kovuus ja siitä johtuva vähäinen kulumiskestävyys (kuva 9)
 - Alumiinia voitaisiin käyttää vielä paljon monipuolisemmin, jos sen kulumiskestävyys olisi korkeampi.
- taipumus lujuuden menetykseen sulahitsauksen yhteydessä
 - Kylmämuokatut tai erkaumalujitetut rakenteet menettävät lujuutensa lämpötilan noustessa liian korkeaksi.



Kuva 9. Materiaalin kovuuden suhde abrasiiviseen kulumiskestävyyteen. /16, s. 500/

Seuraavassa taulukossa on esitetty alumiinin ja sen seosten fysikaalisia ominaisuuksia.

Taulukko 1. Alumiinin ja Al-seosten fysikaaliset ominaisuudet. /9, s. 96/

Tiheys	g/cm ³	2,6...2,8
Ominaislämpökapasiteetti	kJ/K kg	0,9...1,0
Lämmönjohtavuus	W/Km	84...170
Pituuden lämpötilakerroin	1/K*10 ⁻⁶	20...24
Sähkönjohtavuus	m/Ωmm ²	18...35
Kimmomoduli	kN/mm ²	69...75
Liukumoduli	kN/mm ²	26...28
Poissonin luku	-	0,33
Sulamispiste Al99,5	°C	658
Sulamislämpö Al99,5	J/g	387,2

Alumiiniseoksien pintaominaisuuksia hyödynnetään mm. autojen moottorien liukulaakereissa. Ne kestävät hyvin syövyttäviä olosuhteita ja ovat halpoja. Niiden käyttöä kuitenkin rajoittaa huonot kitkaominaisuudet voitelukalvon pettäessä, huono reunapuristukseen mukautuminen, heikko kyky haudata kovia partikkeleita, vaatimaton kuormitettavuus ja suuri lämpölaajeneminen. /3, s. 224/

3.2 Alumiiniseokset

Tässä diplomityössä termillä alumiini tarkoitetaan sekä puhdasta seostamatonta alumiinia että alumiiniseoksia.

Alumiinia käytetään harvoin koneenrakennuksessa seostamattomana. Sitä seostetaan eri seosaineilla riippuen tavoiteltavista ominaisuuksista. Standardien SFS-EN 573-1-2 alumiiniseosten nimikejärjestelmän nelinumeroisen koodin ensimmäinen numero kertoo alumiiniseoksen pääseosaineryhmän taulukon 2 mukaan. Lisäksi merkintään voidaan lisätä valmistus- ja muokkaustilojen tunnuksia.

Alumiiniseoksia voidaan myös merkitä niiden kemialliseen koostumukseen perustuvalla merkinnällä, missä seosaineet merkitään korkeapitoisimmasta alkaen ja seosainepitoisuus prosentteina.

Taulukko 2. Alumiinin seosaineet. /11, s. 84/

Luokka	Pääseosaineet
1xxx	Seostamaton
2xxx	Cu
3xxx	Mn
4xxx	Si
5xxx	Mg
6xxx	Mg, Si
7xxx	Zn
8xxx	Muut seosaineet

4 Alumiinin pintakäsittelymenetelmät

Metalleja pintakäsitellään, jotta niiden pinnalle saataisiin parempia ominaisuuksia kuin perusaineella on. Tällöin voidaan joissain tapauksissa valita halvempi, tai muilta ominaisuuksiltaan kohteeseen paremmin sopiva perusaine kuin ilman pintakäsittelyä olisi mahdollista. Pinnoitteilla voidaan parantaa perusmetallin ulkonäköä, lisätä käyttöikää, säästää perusmetallia, keventää rakennetta tai saavuttaa sellaisia teknisiä ominaisuuksia, joita ei muutoin voida saada aikaan. /17, s. 8/

Alumiinille yleisemmin käytetyt pintakäsittelymenetelmät: /8, s. 5/

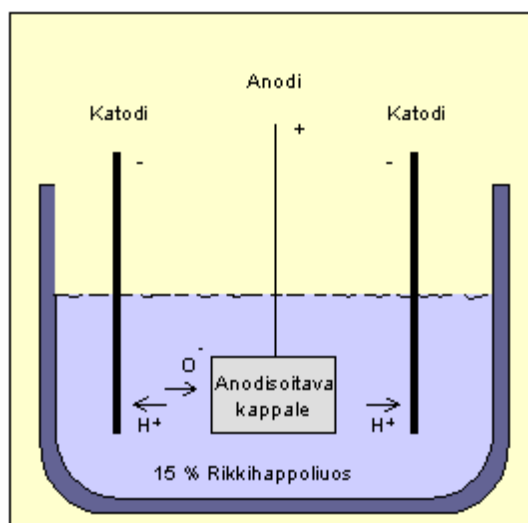
- anodisointi
- ruiskutuspinnoitus
- kaasufaasipinnoitus
- pinnansulatus.

4.1 Anodisointi

Pinnoitesanaston mukaan anodisointi on elektrolyyttinen hapetusprosessi, missä metallin pintakerros muutetaan pinnoitteeksi, tavallisesti oksidipinnoitteeksi, millä on suojaavia, koriste- tai toiminnallisia ominaisuuksia. Anodisointi tunnettiin ennen nimellä eloksointi. /18, s.116; 19, s. 636/

Anodisointia käytetään suojaamaan kappaletta korroosiota ja kulumista vastaan. Sitä käytetään maalauksen esikäsittelynä ja sillä parannetaan ulkonäköä. Anodisointi suoritetaan yleisemmin alumiinille, mutta myös magnesiumille ja sinkille. /8, s. 6; 4, s. 175/

Anodisoitaessa paksunnetaan alumiinin pintaan luontaisesti syntyvää oksidikalvoa. Käsiteltävä kappale sijoitetaan sopivaan elektrolyyttiin, normaalisti rikkihappoon. Kappale kytketään virtalähteen anodiin. Sähkövirran ansiosta vesi hajoaa vedyksi ja hapeksi. Vetyionit kulkevat katodille ja happi-ionit anodille. Anodilla happi-ioni reagoi alumiinianodin kanssa ja muodostaa alumiinioksidia. Anodisoinnilla voidaan kasvattaa oksidikerroksen paksuutta luontaisesta 0,01 μm :stä 50 μm :iin. /4, s.175; 18, s. 117/



Kuva 10. Anodisoinnin periaate. /20/

Anodisoimalla saavutettu alumiinioksidikerros on erittäin kova ja ohut. Vickers-kovuudeksi saadaan 200-400 riippuen anodisointimenetelmästä ja alumiiniseoksesta. Kovuuden takia oksidikerros on erittäin hauras ja murtuu taivutettaessa tai muokattaessa. Se alkaa halkeilla venymän ylittäessä 0,5 %. Kerroksen kulumiskestävyys on sen kovuuden ansiosta erittäin hyvä ja kasvaa likimäärin lineaarisesti kerrospaksuuden mukaan. /18, s. 119; 6, s. 62/

Kova-anodisointi

Tiiviimpi ja kovempi pintakerros saadaan kova-anodisoinnilla. Kova-anodisointi tehdään samanlaisessa kylvyssä kuin tavallinen anodisointi, mutta eri parametreilla.

Kova-anodisoinnissa lasketaan lämpötilaa ja virrantiheyttä. Sillä saadaan aikaan kovia ja kulutusta kestäviä kerroksia. Kova-anodisoidun kerroksen paksuus voi olla 100 µm ja kerroksen kovuus 1000 HV. Kerros on väriltään harmaa tai musta.

Kova-anodisoinnin rajoitteita:

- pinta ei ole yhtä sileä kuin tavallisessa anodisoinnissa
- terävät kulmat ja reunat on pyöristettävä, muuten se halkeilee
- ei sovi seoksille, joissa on yli 3 % kuparia tai yli 7 % piitä
- metallin väsymislujuus laskee.

Edellä mainittujen lisäksi kova-anodisointi on hankala ja kallis prosessi. Sen käyttö onkin vähentynyt viime aikoina.

/21; 11, s. 133; 22, s. 67/

4.2 Terminen ruiskutus

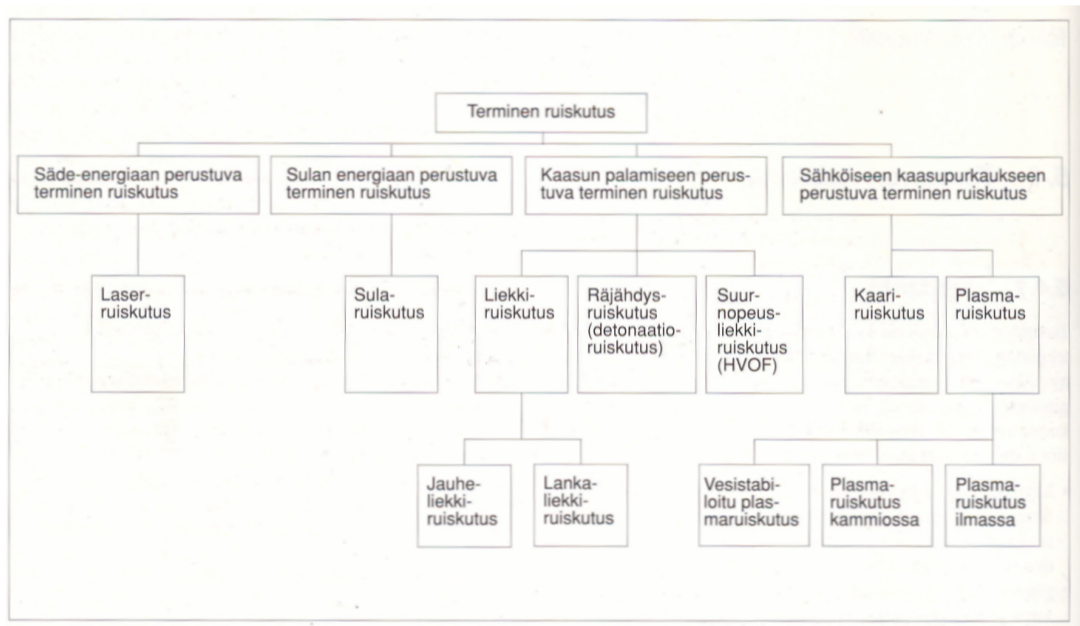
Teromisella ruiskutuksella tarkoitetaan niitä pinnoitusprosesseja, joissa pinnoitteen valmistamiseen käytettävä lisäaine kuumennetaan sulaan tilaan ja viedään hienojakoisena hiukkassumuna kaasuvirtauksen avulla esikäsitellylle pinnalle. /23, s. 69/

Terminen ruiskutus on eniten teollisuudessa käytetyistä teknisten pinnoitteiden valmistusmenetelmistä. Se on hyvin monipuolinen menetelmä laajan pinnoitemateriaalivalikoiman ansiosta. Pinnoite voidaan tehdä monella eri pinnoitemateriaalilla ja se voidaan valmistaa eri paksuisina. Näille tekniikoille on tyypillistä korkean tehosiheyden omaava lämpölähde. /8, s. 7; 23, s. 69/

Termistä ruiskutusta käytetään, kun halutaan: /24, s. 631; 23, s. 69/

- korroosiolta suojaavia pinnoitteita
- kulumista kestäviä pinnoitteita (abraasio, eroosio, adheesiokuluminen, jne.)
- kuumakorroosiota kestäviä pinnoitteita
- hapettumissuojaa korkeissa lämpötiloissa
- täyttää kuluneita ja väärin koneistettuja alueita
- sähköä johtavia tai eristäviä pinnoitteita
- kitkaa pienentäviä tai lisääviä pinnoitteita
- nollasovitetta (turpiinit) jne.
- pienentää osien painoa (esim. alumiininen perusaine ja kulumista kestävä pinnoite)
- koristeellinen pinnoite.

Termiset ruiskutusmenetelmät (kuva 11) voidaan jakaa työkappaleen pinnanlämpötilan perusteella sulatus- ja kylmäpinnoitusmenetelmiin. Kylmäpinnoituksessa työkappaleen lämpötila pyritään pitämään alle 200 °C. Tällöin lämmöntuonti pysyy alhaisempana ja kappaleen rakenne- ja muodonmuutokset vähäisempinä. /24, s. 630; 23, s. 69/



Kuva 11. Termisten ruiskutusmenetelmien jaottelu lisäaineen sulattamiseen käytettävän energian tuontitavan perusteella. /23, s. 70/

Tärkeimmät teollisessa käytössä olevat termiset ruiskutusmenetelmät ovat: /23, s. 70/

- liekkiruiskutus sekä langalla että jauheella
- kaariruiskutus
- plasmaruiskutus
- tyhjiöplasmaruiskutus
- suurnopeusliekkiruiskutus (HVOF)
- jauheplasmaruiskutus (PTA)
- detonaatoruiskutus (räjähdysruiskutus)

Kehittyneimpiä näistä prosesseista ovat HVOF- ja PTA-menetelmä. Nämä antavat pinnoitteelle hallittavissa oleva muodon, paksuuden ja tunkeuman perusaineeseen. HVOF-menetelmällä saavutetaan tiivis pinnoite, jonka paksuus vaihtelee 0,1-2 mm. PTA-menetelmällä saavutetaan 1-6 mm pinnan paksuus. PTA-menetelmä voidaan myös automatisoida pitkälle. PTA-menetelmällä on valmistettu myös metallimatriisikomposiittipinnoitteita. /8, s. 7; 25, s. 4; 26; 27/

Alumiinin pinnoittaminen termisen ruiskutuksen menetelmillä vaatii lisätoimenpiteitä ja huomioita verrattuna terästen pinnoittamiseen. Tämä johtuu alumiinin nopeasta hapettumisesta, suuresta lämpölaajenemiskertoimesta ja pienestä kimmokertoimesta. Monet pinnoitteet vaativatkin alleen ns. tartuntapinnoitteen. Alipainemenetelmät parantavat pinnoitteen tartuntalujuutta alumiiniin ja vähentävät huokoisuutta. /28, s. 18/

4.3 Kaasufaasipinnoitus

Kaasufaasipinnoitus on yleisnimitys pinnoitusmenetelmille, joissa materiaalin siirto pinnoitettavalle pinnalle tapahtuu atomaarisilla tai molekylaarisilla prosesseilla kaasufaasista. Nämä menetelmät jaetaan kemiallisiin (CVD) ja fysikaalisiin menetelmiin (PVD). Kemiallisissa menetelmissä pinnoite muodostuu kemiallisen reaktion välityksellä. Fysikaalisissa menetelmissä pinnoitemateriaali siirretään sellaisenaan alusmateriaalin pinnalle ulkoisesti tuodun energian avulla. Pinnoitteet ovat tavallisimmin metallisia tai keraamisia. Pinnoitepaksuudet vaihtelevat yleisemmin välillä 0,1-500 µm. /29, s. 125/

Alumiinin pinnoitukseen kaasufaasipinnoitusmenetelmistä parhaiten soveltuvat PVD-menetelmät. PVD-menetelmiä kutsutaan tyhjiöpinnoitusmenetelmiksi, koska niissä toimitaan alipaineessa. PVD-menetelmät ovat melko uusia menetelmiä. /8, s. 7/

Ioni-implantointi

Ioni-implantoinnissa eli ioni-istutuksessa käsiteltävän kappaleen pintaa pommitetaan sähkökentän avulla kiihdytetyillä ioneilla. Ionit tunkeutuvat pintaan. Pintaan tunkeutuneen kerroksen paksuus on 0,01- 2 µm. Prosessi suoritetaan alipaineessa. /8, s. 7; 30, s. 112; 16, s. 431/

Kummassakin tekniikassa, PVD-menetelmässä ja ioni-implantoinnissa, on rajoitteena laitteiston ja prosessin kalleus, tyhjiötekniikan käyttö ja rajoittuvuus ohuisiin pinnoitteisiin. /8, s. 7/

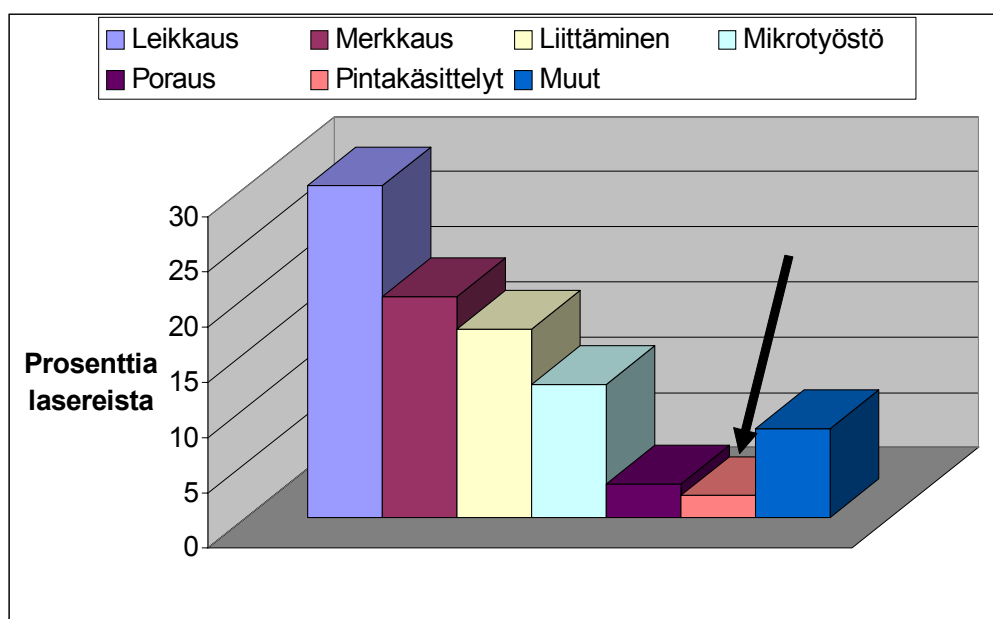
4.4 Pinnansulatus

Kappaleen pintaa voidaan uudelleen sulattaa tavoitteena sen ominaisuuksien parantaminen. Sulattaminen voidaan tehdä usealla eri energian lähteellä. Pinnansulatus voidaan tehdä joko lisäämällä tai lisäämättä siihen seosainetta. Sulatus voidaan suorittaa muun muassa elektronisuihkulaitteistolla, TIG:illä, plasmalla tai laserilla. Suurin etu pinnansulatusmenetelmillä on mahdollisuus saavuttaa melko paksu ja kova pinta joka on metallurgisesti kiinnittynyt perusaineeseen.

5 Laserpintakäsittelytekniikat

5.1 Laser pintakäsittelyssä

Laserpintakäsittely on nopeasti kasvava teknologia ja sen tekniikat ovat nykyään hyvin kehittyneitä. Nopeimmin ovat kehittyneet CO₂-lasertit ja niitä ovat seuranneet Nd:YAG-lasertit. Uusimmat pintakäsittelyissä käytettävät lasertit ovat diodi- ja excimerlasertit. Suurien pinta-alojen taloudellinen ja kilpailukykyinen pintakäsittely on mahdollista laserien teho-hinta-suhteen kasvaessa. Tällä hetkellä teollisuudessa käytössä olevista lasereista n. 2 % on pintakäsittelysovelluksissa (kuva 12). /31, s. 36/



Kuva 12. Pintakäsittely sovelluksissa käytettäviä lasereita on vielä melko vähän.

/31, s. 37/

Huolimatta lupaavista tutkimustuloksista laserpintakäsittely ei ole vielä laajasti levinnyt menetelmä teollisuuden tuotantolinjoilla. Laserpinnoitusta käytetään teollisuudessa mm. moottorin venttiilien istukoiden pinnoittamisessa, turbiinin

siipien pinnoituksessa/korjauksessa ja muiden teollisuuden komponenttien kunnostamisessa. /32, s. 55/

5.1.1 Periaate

Laserin käyttö pintakäsittelyssä ei poikkea muista pintakäsittelymenetelmistä kuin energiantuontitavaltaan ja prosessin hallittavuudeltaan. Laserpintakäsittelyissä säteen teho jaetaan isommalle pinta-alalle kuin laserhitsauksessa ja -leikkauksessa. Laserpintakäsittelyissä käytetään yleensä defokusoitua lasersädettä. Defokusoinnilla tarkoitetaan sitä, että työstö tapahtuu säteen muulla kuin fokuksipisteen osalla eli säteen fokuksipiste ei sijaitse kappaleen pinnalla, kuten yleensä laserhitsauksessa ja -leikkauksessa. Yleensä laserpintakäsittelyissä fokuksipiste on muutaman kymmenen millimetriä kappaleen pinnan yläpuolella. Joitain etuja on myös saavutettu asettamalla fokuksipiste kappaleen pinnan alle. Säteen koko kappaleen pinnalla vaihtelee eri pintakäsittelysovelluksien, lasertyyppien ja eri materiaaliyhdistelmien välillä. Säteen halkaisija kappaleen pinnalla voi vaihdella noin yhdestä yli kymmeneen millimetriin. Laserpintakäsittelyyn on myös olemassa sitä varten valmistettuja optisia komponentteja, joilla saadaan tarpeen mukaisesti muotoiltu säde. Laserpintakäsittelyissä käytetään myös muita säteen hajautus- ja poikkeutustekniikoita, kuten oskilloivia ja integroivia peilejä. /33, s. 144; 34, s. 4226; 35, s. 38/

Säteen koolla ja laserin teholla voidaan säädellä laserpintakäsittelyissä tärkeää parametria, tehotiheyttä. Toiseen pintakäsittelyparametriin, säteen vaikutusaikaan, vaikuttaa säteen koon lisäksi säteen kuljetusnopeus kappaleen pinnalla.

Laserpintakäsittelyn parametreja: /36, s. 64/

- tehotiheys [W/mm^2]

$$I = \frac{P}{A} \quad , \text{jossa} \quad (3)$$

P = laservalon teho

A = lasersäteen poikkipinnan pinta-ala kappaleen pinnalla

- säteen vaikutusaika [s]

$$t = \frac{s}{v} \quad , \text{jossa} \quad (4)$$

s = lasersäteen vaikutusmatka

v = kuljetusnopeus

Säteen ominaisenergia eli energiantuonti pinta-alaa kohti saadaan kertomalla tehotiheys ja vaikutusaika. Ominaisenergian yksikkönä on [J/mm²].

$$E = I * t \quad (5)$$

Suurien pinta-alojen pintakäsittelyssä tärkeä parametri on pintakäsittelynopeus. Se lasketaan kertomalla limitysleveys kuljetusnopeudella.

$$\text{pintakäsittelynopeus [mm}^2\text{/s]} = \text{limitysleveys [mm]} * \text{kuljetusnopeus [mm/s]} \quad (6)$$

5.1.2 Pintakäsittelyssä käytettävät lasertyypit

Konepajateollisuuden laserpintakäsittelyihin käytetään pääasiassa kolmea eri lasertyyppiä:

- CO₂-laser
- Nd:YAG-laser
- diodilaser

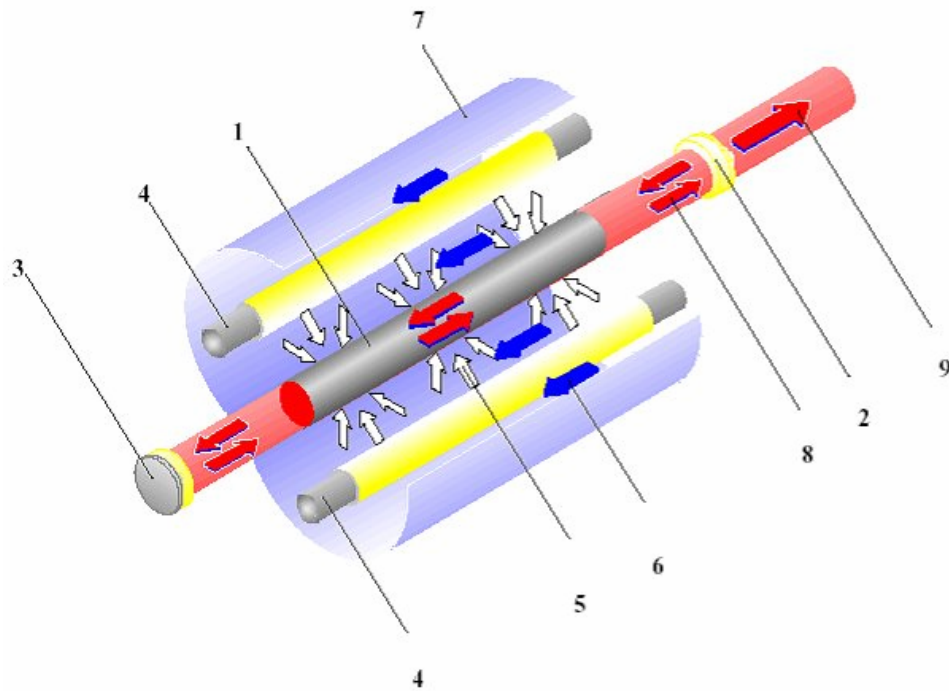
Myös excimerlaseria on käytetty laserpintakäsittelyyn. Sen sovelluskohteet ovat lähinnä pienien laitteiden ja komponenttien pintakäsittelyissä. CO₂-laserit ovat pintakäsittelyissä eniten käytettyjä. Muiden edellä mainittujen laserien käyttöä on aikaisemmin rajoittanut niiden alhainen jatkuva teho. Viimevuosina ovat myös Nd:YAG- ja diodilaserit kehittyneet ja niiden käyttö on yleistymässä. /32, s. 55/

Nd:YAG-laser

Nd:YAG-laser on kidelaser. Sen laservalo syntyy YAG-kiteessä olevissa neodyymiatomeissa. Nd:YAG-laserin säteen aallonpituus on 1,06 µm. Lyhyestä aallonpituudesta johtuen yksi Nd:YAG-laserin eduista on mahdollisuus säteen kuljetukseen optista kuitua pitkin. Tämä mahdollistaa mm. saman resonaattorin säteen käytön monessa työasemassa, helpon robotisoinnin ja laserin vapaamman sijoittelun. Lyhyen aallonpituuden aiheuttama haittapuoli on turvallisuustekninen. Nd:YAG-laserin valo on ihmissilmälle hyvin vaarallista. Valo kulkee tavallisen lasin ja muovin läpi eli sitä käytettäessä on suojauduttava erikoisvalmisteisin suojalasein ja työasemat on koteloitava hyvin. /35/

Nd:YAG-laserissa kide on yleensä sijoitettu kahden elliptisen heijastimen yhteiselle optiselle akselille. Laservalon syntymiseen tarvittavaa energiaa kiteelle tuotetaan lampuilla tai diodeilla. Lisää tehoa saadaan kytkemällä kidetangoja sarjaan. Ulostuloikkunan kautta säde ohjataan ulos resonaattorista. /35, s. 9/

Kuvassa 13 on esitetty periaatekuva lamppupumpatun Nd:YAG-laserin rakenteesta.



Kuva 13. Lamppupumpatun Nd:YAG-laserin resonaattorin rakenne. 1. Nd:YAG-kide
2. ulostuloikkuna 3. peräpeili 4. lamput 5. pumppausvalo 6. jäähdytysvesi 7. heijastin
8. resonaattorin sisäinen säde 9. lasersäde. /37/

Tällä hetkellä suuritehoisimmat saatavissa olevat Nd:YAG-laserit ovat 6 kW:n tehoisia.

CO₂-laser

CO₂-laser on kaasulaser. Sen säde syntyy resonaattorissa, missä optisena väliaineena olevaa kaasuseosta viritetään sähköenergialla. Hiilidioksidilaserissa kaasuna käytetään heliumin, hiilioksidin ja typen muodostamaa kaasuseosta. Varsinaisen lasersäteen synnyttää hiilidioksidi, jonka molekyylit emittoivat viritettyinä valoa. Hiilidioksidilaserin aallonpituus on 10,6 µm. Aallon pituus on Nd:YAG- ja diodilaseriin verrattuna noin kymmenkertainen. Tämän vuoksi sädetä joudutaan siirtämään resonaattorista työasemaan ja edelleen kappaleeseen optisten peilien ja linssien avulla. Tämä vaikeuttaa ja monimutkaistaa työaseman rakennetta ja robotisointia. Pitkän aallonpituuden etuna on se, että hiilidioksidin säteeltä pystytään

suojautumaan tavallisilla kirkkailla suojalaseilla. Säteen laatu hiilidioksidilaserissa on yleensä parempi kuin Nd:YAG-lasereissa, koska siinä ei käytetä optista kuitua. Suuritehoisimmat CO₂-laserit ovat tällä hetkellä n. 60 kW:n tehoisia. /38, s. 16/

Diodilaser

Diodilaser poikkeaa eniten CO₂- ja Nd:YAG-lasereista ulkoiselta rakenteeltaan. Siinä ei ole erillistä resonaattoria, vaan säde synnytetään laserpäässä. Laserpää on vain muutaman kuutiodesimetrin kokoinen ja painaa alle 20 kg (kuva 14). Diodilaser kiinnitetään suoraan työaseman liikeakseliin tai robotin käsivarteeseen. Ainoa ”konepajan lattialle” jäävä osa on laserin teho- ja jäähdytysyksikkö. /39, s. 49/



Kuva 14. Diodilaserin ohjausyksikkö, laserpää ja keskusyksikkö. /40/

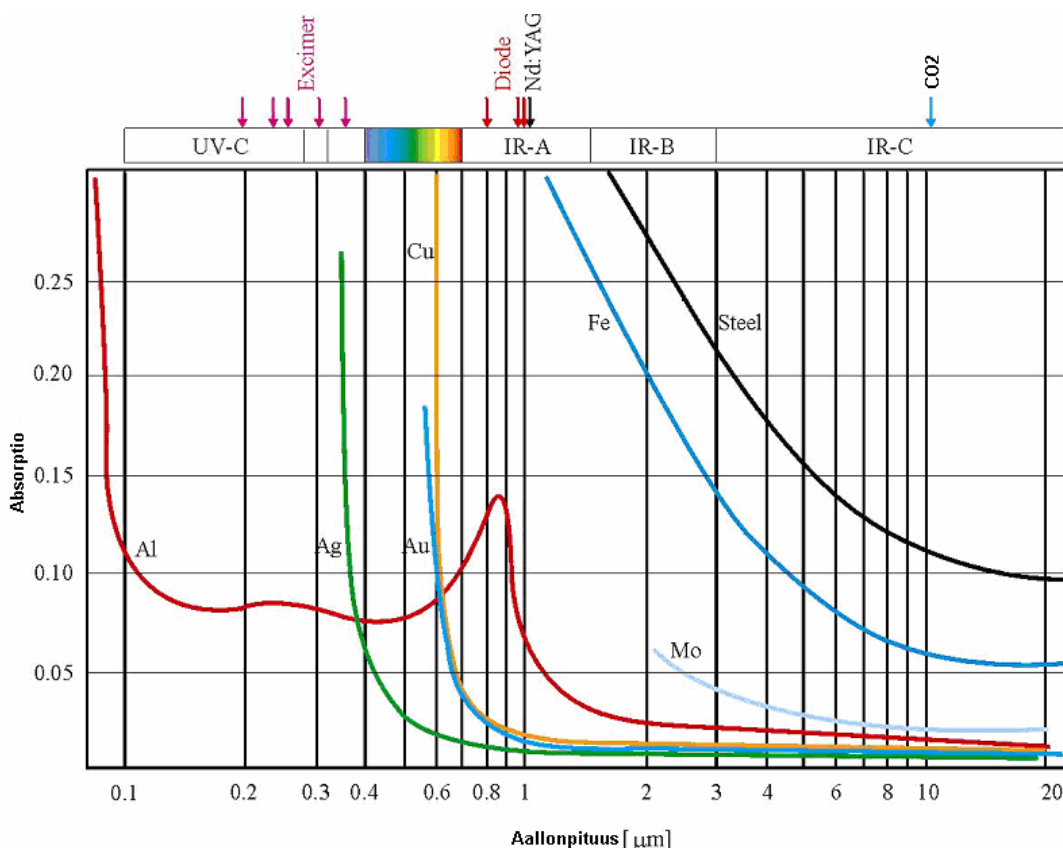
Diodilaser koostuu sadoista pienitehoisista diodilasereista, joita on koottu useita yhteen pakkaan (stack). Suuritehoisemmissa diodilasereissa on useampia pakkoja, joiden tehot on koottu yhteen. Pakkojen tuottama laserenergia fokusoidaan työkappaleen pinnalle. Diodilaserin aallonpituus on välillä 0,790-0,980 µm eli 790-980 nm. Lyhyt aallonpituus absorboituu paremmin joihinkin metalleihin, kuten alumiiniin ja kupariin. Tästä on hyötyä mm. pintakäsittelyissä. Suuritehoisimmat diodilaserit ovat tällä hetkellä 8 kW:n tehoisia. /39, s. 49/

5.1.3 Laservalon absorptio pintakäsittelyissä

Absorptio, joka on käänteinen ilmiö heijastumiselle, on tärkeä ominaisuus laserpintakäsittelyprosesseissa. Erityisesti kirkkaiden metallien, kuten alumiinin tai kuparin työstössä se on tärkeä ottaa huomioon. /41, s. 47/

Osa säteestä heijastuu ja osa absorboituu pintaan, kun lasersäde kohtaa metallisen materiaalin pinnan. Absorboituneen energian määrä riippuu pääasiassa materiaalista, säteen aallonpituudesta, lämpötilasta, pinnanlaadusta ja säteen tehotiheydestä. /42/

Kuvasta 15 voidaan havaita, että huoneenlämpötilassa Nd:YAG-laserin valon aallonpituudella absorptio alumiiniin on 3-5 kertainen verrattuna CO₂-laseriin. /41, s. 47; 43, s. 22/



Kuva 15. Eri aallonpituuden omaavien laserien absorptio eri materiaaleihin huoneenlämpötilassa.

Laserenergian absorboituminen on monimutkainen ilmiö, josta ei asiantuntijapiireissäkään olla täysin yksimielisiä ja tutkimuksista saadut tulokset ovat hieman ristiriitaisia. Absorboitumisarvoja on helpompi määrittää ja mitata teoreettisessa tapauksessa sileän kappaleen pintaan. Laskettaessa tai mitattaessa absorptioarvoja käytännön lasertyöstöprosesseissa tilanne muuttuu toiseksi. Absorption määrittämisessä käytetään kalorimetrillä tehtäviä kokeita. /43, s. 23; 42/

On kuitenkin kehitetty teorioita ja kaavoja joista voidaan laskea arvoja absorptioille. Eräs yksinkertaisimmista on kaava 7. Taulukkoon 3 on laskettu joillekin materiaaleille absorptioarvoja kaavan 7 mukaan. Absorptioarvojen laskemiselle on olemassa myös monimutkaisempia malleja. Esimerkiksi laserhitsauksen aikana absorptioarvot muuttuvat radikaalisti, kun keyhole ja plasmopilvi ovat vaikuttamassa. Sama koskee myös laserpintakäsittelyjä, missä kappaleeseen muodostuu sula. Perusaineen lämpötilan noustessa myös absorptio kasvaa. Ilmiö korostuu kuparilla ja alumiinilla. Myös pinnankarheudella ja pinnan kalvoilla on vaikutusta absorboitumiseen. /41, s. 47; 43, s. 22/

$$A = \frac{4n}{((n+1)^2 + k^2)} \quad , \text{jossa} \quad (7)$$

A = absorptio

n = heijastumisindeksi

k = materiaalikohtainen absorptiokerroin

Taulukko 3. Esimerkkejä heijastumisindekseistä (n) ja –kertoimista (k) ja niistä lasketuista absorboitumiskertoimista (A) aallonpituudella 1,06 μm (Nd:YAG).

Materiaali	k	n	A
Al	8,50	1,75	0,09
Cu	6,93	0,15	0,01
Fe	4,44	3,81	0,36
Ni	5,26	2,62	0,26
Ti	4,0	3,8	0,37
Lasi	0	1,5	0,96

5.1.4 Tehohäviö laserpintakäsittelyssä

Tehonjakauma muodostuu seuraavista osatekijöistä dynaamisella jauheensyötöllä tapahtuvassa laserpintakäsittelyssä (kuva 16): /44, s. 3; 45/

$$P_L = P_A + P_B + P_C + P_D + P_E + P_F + P_G \quad , \text{jossa} \quad (8)$$

P_A = pinnoitteesta heijastunut teho

P_B = syötettävistä lisäainejauhepartikkeleista heijastunut teho

P_C = jauheen sulattamisen käytetty teho

P_D = työkappaleesta heijastunut valo

P_E = energian siirtyminen pois käsiteltävältä alueelta

P_F = perusaineeseen johtunut energia

P_G = sulaan päätyttämiin jauhepartikkeleihin absorboitunut teho

Hiiliteräkselle CO₂- ja Nd:YAG-lasereilla tehdyissä kokeissa tehon jakautuminen on seuraavanlainen: /44, s. 3; 45/

$P_A = 40\text{-}50 \%$

$P_B = 8 \%$

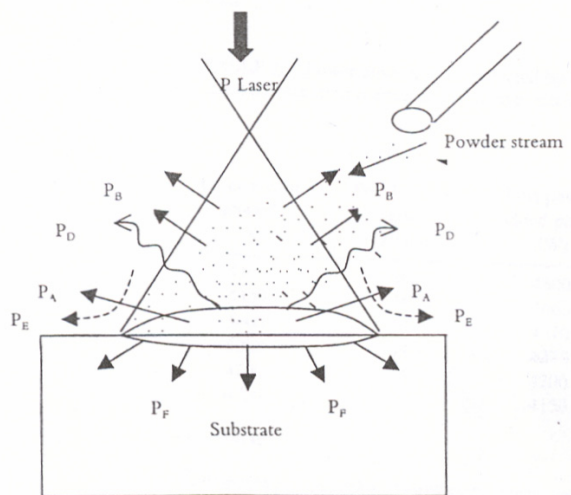
$$P_C = 10-20 \%$$

$$P_D = 1 \%$$

$$P_F = 30 \%$$

$$P_E + P_G = 1 \%$$

Arvot kuitenkin riippuvat useista eri tekijöistä ja ovat melko tapauskohtaisia.



Kuva 16. Tehon jakaantuminen laserpinnoituksessa. /44, s. 3; 45/

Erityisesti alumiinilla ja kuparilla työkappaleesta heijastunut teho on merkittävässä asemassa varsinkin CO₂-laserpinnoituksissa. Myös lämpöenergian johtuminen työkappaleeseen on huomattavasti nopeampaa kuin teräksellä.

5.2 Laserpinnoitus

Laserpinnoituksissa pinnoitukseen tarvittava energia tuodaan käsiteltävään kappaleeseen suuren energiatihedden lasersäteellä. Lasersäteen kohdatessa pinnan, jota se ei läpäise ja josta se ei kokonaan heijastu, tapahtuu lämmönsiirtyminen fotonien, sekä vapaiden ja sitoutuneiden elektronien vuorovaikutuksesta. /46, s. 158/

Laserin käytöllä pintakäsittelyissä on monia etuja. Laserpintakäsittelyiden etuja verrattuna perinteisiin pintakäsittelymenetelmiin ovat: /47, s. 27; 46, s. 158; 41/

- tarkasti kontrolloitu energiantuonti
- voidaan käsitellä kappaleita paikallisesti
- pieni kokonaislämmöntuonti → pienet muodonmuutokset
- lämpenemis- ja jäähtymisnopeudet suuria → on mahdollista saavuttaa hieno mikrorakenne tai metastabiili faasi
- koskettamaton prosessi
- tarkka käsiteltävän alueen ja tunkeuman raja
- vähäinen jälkikoneistuksen tarve
- helppo automatisoida.

Laserpintakäsittelyn huonoja puolia verrattuna perinteisiin menetelmiin ovat: /48, s. 26/

- laitteiston kalliit investointikustannukset
- esituotannolliset kokeet ja testaus saattavat viedä runsaasti aikaa
- suurien pinta-alojen pinnoittaminen ei ole aina taloudellisesti kannattavaa.

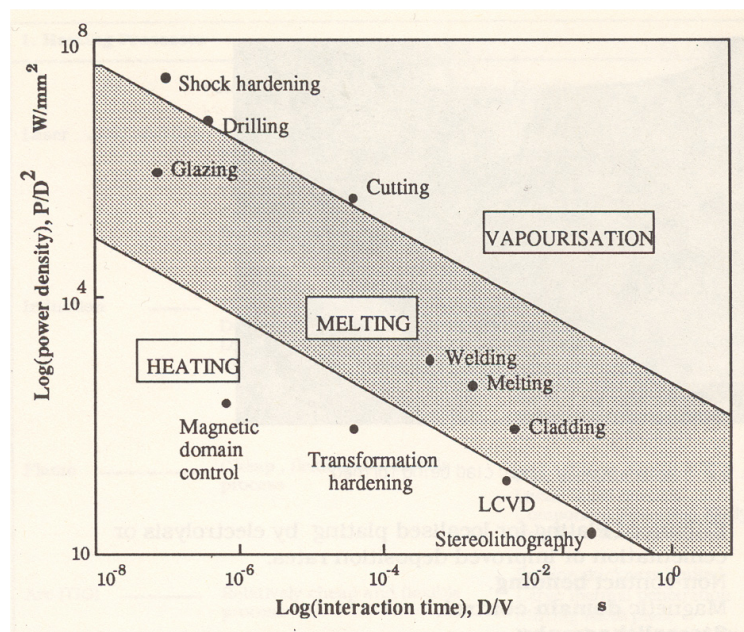
Laserpintakäsittelyjä on useaa eri tyyppiä. Niillä saavutetaan eri materiaaleihin erilaisia pintoja, mikrorakenteita ja ominaisuuksia eri tarkoituksiin. Ne poikkeavat toisistaan mm. laserin tehotiheydessä, säteen vaikutusajassa, käytetyissä materiaaleissa ja lisäaineen syötössä/käytössä. Yleisempiä laserpintakäsittelymenetelmiä ovat:

- laserpintakarkaisu
- laserpinnoitus
- laserpinnansulatus
- laserpinnanseostus.

Näistä menetelmistä on kehitetty erilaisia versioita, joita nimitetään myös eri prosesseiksi, kuten lasershokkikarkaisu ja kovien partikkelien seostaminen eli injektointi. Taulukossa 4 ja kuvassa 17 esitetään lasersäteen tehotiheyden ja säteen vaikutusajan parametrialueet eri laserpintakäsittelyprosesseissa.

Taulukko 4. Lasersäteen tehotiheyden ja säteen vaikutusajan parametrialueet eri laserpintakäsittelyissä. /46, s. 158/

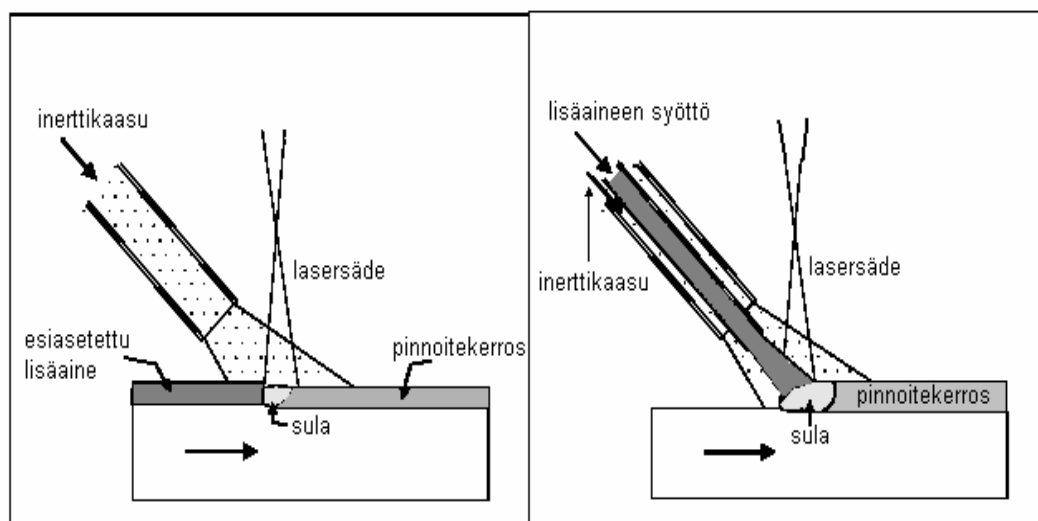
Prosessi	Tehotiheys W/mm^2	Säteen vaikutusaika s
Pinnankarkaisu	10-100	0,01-1
Pinnansulatus	10^2-10^4	0,001-1
Pinnanseostus	10^2-10^4	0,001-1
Pinnoitus	10-1000	0,1-1
Partikkelien injektointi	10-1000	0,1-1
Shokkikarkaisu	10^6-10^8	$10^{-8}-10^{-6}$



Kuva 17. Tehotiheyden ja säteen vaikutusajan parametrialueet eri lasertyöstöprosesseissa. /41, s. 173/

5.2.1 Lisäaineellinen laserpintakäsittely

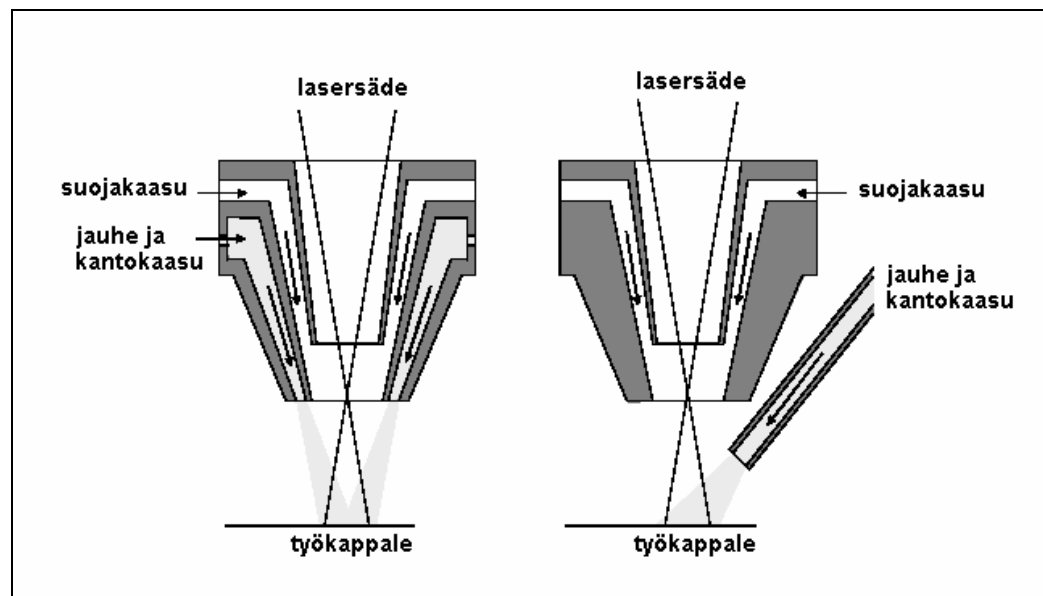
Yleisempiä lisäaineellisia laserpintakäsittelyjä ovat laserpinnoitus ja –seostus. Lisäaineellisessa laserpintakäsittelyssä on olemassa kaksi eri suoritusteknistä menetelmää lisäaineensyötön osalta (kuva 18). Dynaamisessa lisäaineensyöttötekniikassa lisäaine tuodaan kappaleen pinnalle prosessin aikana. Toinen tekniikkavaihtoehto on laserpinnoitus esiasetetulla lisäaineella. Prosessi on kaksivaiheinen. Ensimmäisessä vaiheessa lisäaine asetetaan kappaleen pinnalle ja toisessa vaiheessa se käsitellään lasersäteellä. Prosessia nimitetään laserpinnoitukseksi esiasetetulla lisäaineella. Esiasetukseen on useita menetelmävaihtoehtoja. Lisäaine voidaan esimerkiksi liimata kappaleen pintaan sopivaan sideaineeseen seostettuna tai kiinnittää jollakin termisellä ruiskutusmenetelmällä. Sideaineena voidaan käyttää esimerkiksi polyvinyylialkoholia (PVA) ja termisenä ruiskutusmenetelmänä plasmaruiskutusta. /47, s. 279; 49, s. 121; 41, s. 200; 50, s. 12; 51, s. 143/



Kuva 18. Lisäaineen syöttövaihtoehtoja laserpinnoituksessa. Vasemmalla pinnoitus esiasetetulla lisäaineella ja oikealla dynaaminen jauheensyöttö. /47, s. 28/

Dynaamisessa lisäaineen syötössä lisäaine tuodaan tyypillisesti jauheena tai lankana kappaleen pinnalle. Näistä kahdesta vaihtoehdosta jauhe on yleisempi. Jauheena tapahtuva syöttö on joustavampi ja jauhe ei häiritse sädettä niin paljon kuin lanka. Jauhetta voidaan myös syöttää sulan etupuolelle kappaleen pintaan. Tapa on tavallaan esiasetetun ja dynaamisen jauheensyötön välimuoto. /47, s. 30; 52/

Dynaamisessa lisäaineensyötössä käytettäessä lisäaineena jauhetta se tuodaan yleensä kantokaasun avulla. Kantokaasuna käytetään normaalisti inerttiä kaasua. Yleisemmin käytetyt kaasut ovat argon, helium ja typpi. Jauhe voidaan tuoda myös pelkästään gravitaatiovoiman avulla. Tyypillisempiä pintakäsittelykonstruktiota ovat koaksiaalinen ja off-aksiaalinen jauheensyöttö (kuva 19). /47, s. 31/



Kuva 19. Koaksiaalinen ja off-aksiaalinen jauheensyöttö dynaamisella jauheensyötöllä tapahtuvassa pintakäsittelyssä. /47, s. 32/

Lisäaineensyöttötapojen vertailua

Dynaamisen jauheensyötön hyviä puolia: /48, s. 26; 52; 53; 47, s. 30/

- mahdollisuus täydelliseen automatisointiin

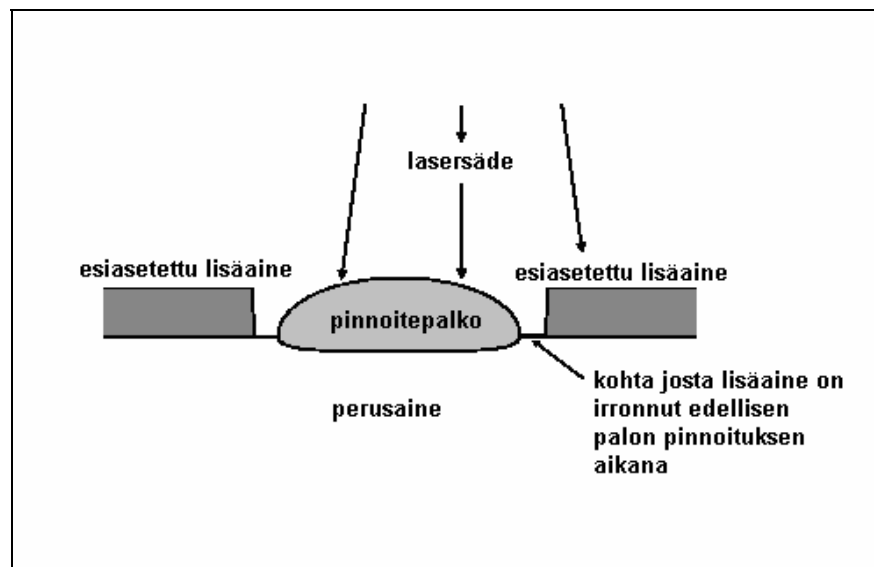
- säästyy monia työvaiheita eli prosessi nopeutuu
- mahdollisuus tehdä paksuja pinnoitteita
- pinnoitteen paksuutta voidaan säädellä prosessin aikana
- hankalien muotojen pintakäsittely helpompaa.

Esiasetetun lisäaineensyötön hyviä puolia: /48, s. 26/

- mahdollisuus päästä pieniin seostumisasteisiin
- parametreja vähemmän kuin dynaamisessa jauheensyötössä
- päästään ohuisiin pintakerroksiin.

Esiasetetun lisäaineensyötön rajoitteita: /47, s. 29; 53/

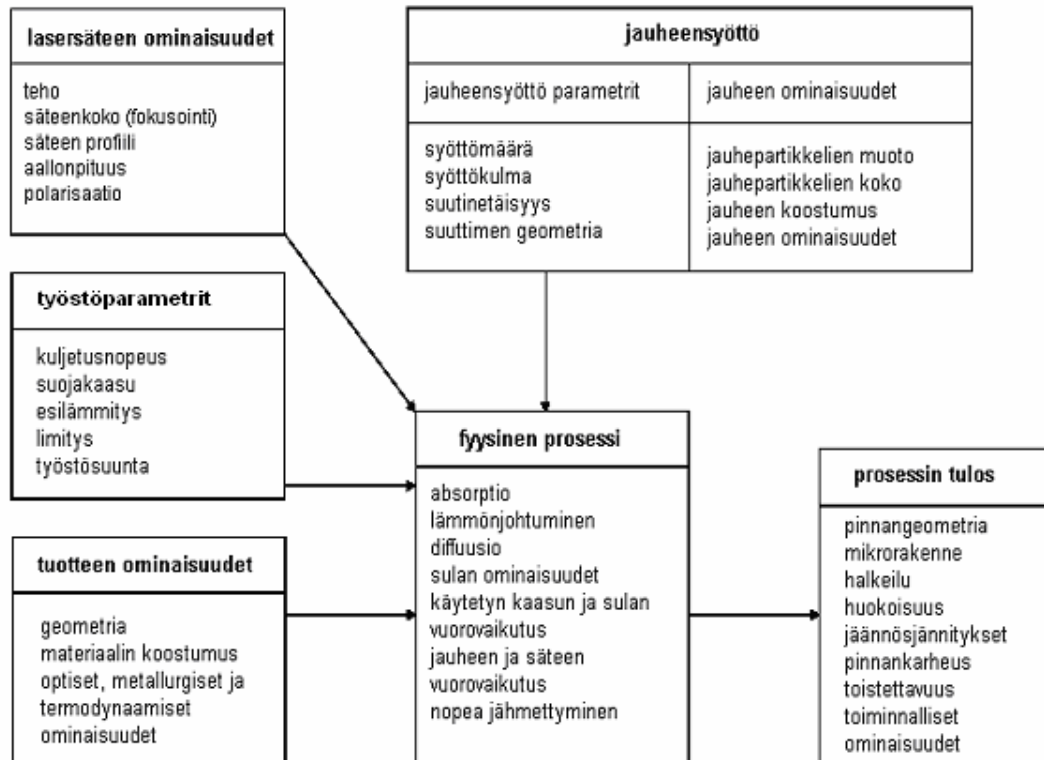
- Monipalkokäsittelyissä edellisen palon käsittely poistaa lisäaineen seuraavan palon kohdalta (kuva 20).
- Ei saada aikaan paksuja pinnoitteita. Tyypillisesti pinnoitteen paksuudet ovat noin 100 µm. Yli 0,4-0,5 mm paksuisia pinnoitteita ei voida saavuttaa.
- Laserseostuksessa lisäaine jakautuu epähomogeenisesti.



Kuva 20. Esiasetetulla lisäaineella laserpintakäsittelyn huonoja puolia. /47, s. 29/

Parametrit

Kuvassa 21 on esitetty dynaamisella jauheensyötöllä tapahtuvan laserpintakäsittelyn eri parametrit ja niiden vaikutukset prosessin tulokseen.



Kuva 21. Laserpintakäsittelyparametrit ja muuttujat. /47, s. 41/

Taulukossa 5 on esitetty laserpintakäsittelyn pinnan ominaisuuksia ja arviointikriteerejä.

Taulukko 5. Laserpintakäsittelyn pinnan ominaisuuksia. /47, s. 33/

Geometriset ominaisuudet	Mekaaniset ominaisuudet	Metallurgiset ominaisuudet	Laatu ominaisuudet
- pinnoitteen mitat	- kovuusjakauma	- mikrorakenne	- huokoisuus
- seostumisaste	- jäännösjännitykset	- sekoittumisaste	- halkeilut
- pinnankarheus	- kulutuskestävyys	- raekoko	- ulkonäkö
	- vetolujuus	- homogeenisuus	
		- korroosionkesto	

5.2.2 Laserpinnoitus

Laserpinnoitus on yksi laserpintakäsittelyprosesseista, vaikka pinnoituksesta puhuttaessa usein tarkoitetaan pintakäsittelyjä yleisesti.

Periaate

Laserpinnoituksessa on tavoitteena pinnoittaa metalli toisella metallilla ja muodostaa virheetön rajapinta niin, että perusaineen sulaminen olisi vähäistä. Pyrkimyksenä on välttää perusaineen ja pinnoitteen liiallista sekoittumista. Optimaalinen sekoittumisaste vaihtelee eri perusaine- ja pinnoiteyhdistelmillä. Sekoittumisasteen ylärajana laserpinnoituksessa pidetään 5-10 %. Sekoittumisasteen kasvaessa prosessi muuttuu laserpinnanseostukseksi, jossa toki yleensä pyritään suurempaan sekoittumisasteeseen. /41, s. 199; 49, s. 121; 54; 55, s. 263/

Perusaineen koostumuksella ei ole niin suurta merkitystä pinnoituksessa, koska laserpinnoituksessa vain pieni osa perusaineesta sulaa prosessin aikana. Tämän vuoksi samalla pinnoitteella voidaan usein pinnoittaa monia eri perusaineita. Tilanne muuttuu kuitenkin siirryttäessä ei-ferriittisiin materiaaleihin. /56/

Laserpinnoituksessa yleisesti käytettyjä pinnoitemateriaaleja ovat koboltti- ja nikkelpohjaiset seokset, ruostumaton teräs, kupari, alumiini, titaani, pronssiseokset ja komposiitit. /54/

Soveltuvuus alumiinille

Laserpinnoitus soveltuu hyvin yleisemmin käytetyille koneenrakennusmateriaaleille. Alumiinille ja titaanille sen soveltuvuus on huonompi. Näille kevytmetalleille on vaikeaa löytää järkevää pinnoitemateriaalia, jonka kanssa saataisiin aikaan riittävä tartunta perusaineen ja pinnoitteen välillä sekä pinnoitteen riittävän hyvät ominaisuudet, jotta pinnoittamisesta olisi merkittävää hyötyä. Muut laserpintakäsittelymenetelmät on havaittu paremmiksi menetelmiksi alumiinin ja titaanin pintaominaisuuksien parantamisessa. Joillekin alumiiniseoksille myös pinnoittamalla on saatu kohtalaisen hyviä tuloksia. /56/

5.2.3 Laserpinnansulatus

Periaate

Laserpinnansulatuksessa ei käytetä lisäainetta, vaan pinta käsitellään pelkällä lasersäteellä. Lasersäteellä pyyhkäistään käsiteltävän pinnan yli sopivilla parametreilla ja sula mahdollisesti suojataan suojakaasulla. Kappaleen pinnan mikrorakenteessa tapahtuu muutoksia nopean jäähtymisen ansiosta. Nämä muutokset aikaansaavat pinnan ominaisuuksien paranemista. Sammutusnopeus riippuu sulatussyvyydestä. Paksummilla kerroksilla on hitaampi jäähtymisnopeus kuin ohuemilla. /57, s. 787; 58, s. 99/

Laserpinnansulatuksessa on yleensä tarkoituksena homogenisoida ja muuttaa mikrorakennetta hienommaksi. Pinnan muokkaaminen pelkästään sulattamalla on

kuitenkin rajoitettua, koska sulaneen alueen materiaali pysyy kuitenkin samana kuin perusaine. /56/

Laserpinnansulatuksella voidaan myös tasoittaa valukappaleiden epätasaisia pintoja ja jälkikäsitellä termisesti ruiskutettuja pinnoitteita. /35, s. 39/

Laserpinnansulatuksen hyviä puolia: /41, s. 187/

- yksinkertainen prosessi , vähän parametreja, ei lisäaineparametreja
- hyvä pinnan laatu
- pieni lämmöntuonti → pienet muodonmuutokset → voidaan suorittaa lähelle lämpöherkkiä alueita
- joustavuus ja helppo automatisointi.

Laserpinnansulatuksen rajoituksia:

- Ei paranna kovuutta ja kulumisenkestoa paljoakaan. Poikkeuksena valurauta, jolla kovuuden kasvu voi olla huomattavaa.

Soveltuvuus alumiinille

Laserpinnansulatusta on suoritettu pääasiassa suomu- ja pallografiittivaluraudalle. Tavoitteena on ollut parantaa pinnan kovuutta ja kulumiskestävyyttä muuttamalla mikrorakenne grafiitista ja ferriitistä/perliitistä ledeburiitiksi. Kovuus on saatu nousemaan 200 HV:sta 1000 HV:seen. /35, s. 39/

Alumiinin sulatuksella on saavutettu noin 100 HV:n kovuus, lähtökovuuden ollessa n. 60 HV. Muuttuneen vyöhykkeen paksuus on ollut noin 0,4 mm. /53/

5.2.4 Laserpinnanseostus

Periaate

Laserpinnanseostuksessa lasersäteellä sulatetaan kappaleen pintaa ja sulaan lisätään lisäainetta. Se on samanlainen prosessi kuin laserpinnoituskin, mutta tarkoituksena on saada lisäaineen ja perusaineen sekoittumisaste halutun suuriseksi. Tämä saavutetaan pitämällä materiaalit riittävän pitkään sulassa olomuodossa, jotta tarpeellinen sekoittuminen ja diffuusio ehtivät tapahtua. Lisäainetta voidaan syöttää sekä dynaamisesti että esiasettamalla kuten laserpinnoituksessakin. /56; 48, s. 26/

Laserpinnanseostuksessa seosmateriaalin määrä on tavallisesti paljon pienempi verrattuna koko sulaneen materiaalin määrään. Tämän takia lämmöstä johtuvat muodonmuutokset saattavat aiheuttaa ongelmia, kuten jäännösjännityksiä. /56/

Laserpinnanseostuksen hyviä puolia:

- Saadaan aikaan merkittäviä pintaominaisuuksien kohenemisiä, jotka eivät ilman seostusta olisi mahdollisia.

Laserpinnanseostuksen huonoja puolia: /56/

- pieni parametri-ikkuna
- optimaalisten parametrien haku vaikeaa
- korkeampi lämmöntuonti kuin laserpinnoituksessa → muodonmuutoksia ja jäännösjännityksiä.

Soveltuvuus alumiinille

Alumiinin laserpinnanseostuksessa seostetaan perusaineeseen sopivia lisäaineita, kun halutaan kohentaa kulumiskestävyyttä ja kovuutta. Lisäaineet muodostavat kovia

faaseja perusaineen kanssa reagoidessaan. Nämä faasit lujittavat ja parantavat pinnan ominaisuuksia. Käytettyjä seosaineita ovat transitiometallit kuten nikkeli, kromi, molybdeeni, volframi, titaani, zirkoni ja niiden eri kombinaatiot. Näillä aineilla on normaalissa jähmettymisessä matala liukoisuus alumiiniin. Nopeassa jähmettymisessä, joka tapahtuu laserilla tapahtuvassa sulatuksessa, liukoisuusalue laajenee. Muodostuneet metalliyhdisteet ovat suhteellisen stabiileja myös korkeissa lämpötiloissa ja tällä saavutetaan monia tarpeellisia ominaisuuksia. /59; 56; 8, s. 12/

Aikaisemmin tehdyissä tutkimuksissa on esiasettaminen ollut suositumpi lisäaineen tuontitapa alumiinin seostuksessa. Menetelmässä on vähemmän parametreja ja se on laboratorio- ja tutkimuskäytössä nopeampi ja kätevämpi tapa tutkia eri seosaineiden vaikutuksia. Esiasetetulla lisäaineen syötöllä saavutetaan vain ohuita pinnoitteita, ja se saattaa monia tuotanto-olosuhteita ajatellen olla hankalampi lisäaineen tuontitapa.

Seuraavassa on käsitelty tutkimuksia yleisempien seosaineiden laserseostuksesta alumiiniin. Tutkimuksissa on kokeiltu useita seosaineita ja runsaasti niiden erilaisia kombinaatioita.

Nikkeli

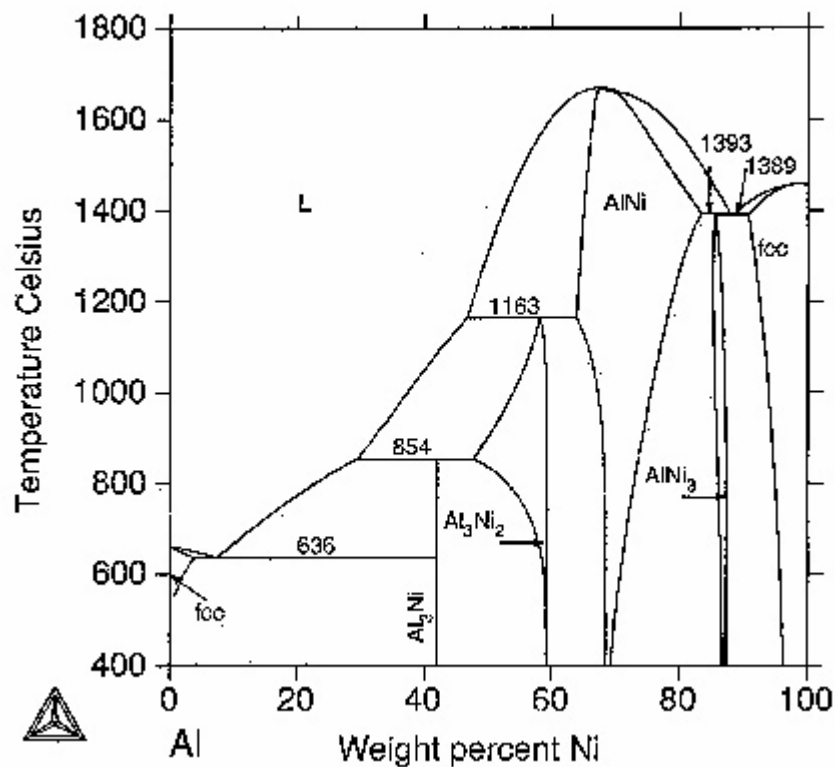
Nikkeli on tutkimuksissa usein alumiinin laserseostuksessa käytetty aine. Sitä on käytetty lisäämään kovuutta ja kulumiskestävyyttä. Sen kovettava vaikutus perustuu sen ominaisuuteen muodostaa alumiinin kanssa useita kovia metalliyhdisteitä, kuten Al_3Ni , Al_3Ni_2 , $AlNi_3$ ja $AlNi$. Nämä metastabiilit faasit muodostuvat nopean sulamisen, jähmettymisen ja jäähtymisen seurauksena. /47, s. 40; 61, s. 2/

Nikkeliä voidaan seostaa yksinään tai lisäämällä siihen jotain muuta seosainetta. Siihen voidaan myös seostaa koostumukseltaan samaa jauhetta kuin perusaine. Perusainejauheen lisäämisellä pyritään vähentämään halkeilua. Kovia partikkeleita, kuten titaanikarbida on myös seostettu lupaavin tuloksin nikkelin kanssa yhdessä tai nikkeliä seostettuun pintaan. /53, s. 264; 62, s. 516/

Nikkelillä seostetun alumiinin pinta on mikrorakenteeltaan dendriittinen. Dendriitit koostuvat pääasiassa yhdisteistä Al_3Ni_2 ja Al_3Ni . Dendriittien väliset alueet koostuvat suurimmaksi osaksi alumiinista.

Tyypillinen nikkelipitoisuus seostetussa pinnassa on keskimäärin 20 %, jolloin tasapainopiirroksen (kuva 22) mukaan Al_3Ni on yhdessä perusaineen kanssa vallitseva faasi. Rakenteen kovuus noin 400 HV.

Mitä suurempi on nikkelipitoisuus, sitä suurempi on kovuus. Erittäin kovat kerrokset ovat aina myös hauraita ja halkeamia on havaittavissa aina kun kovuudet nousevat yli 600 HV:n, muodostumisolosuhteista riippumatta. /53, s. 264/



Kuva 22. Al-Ni tasapainopiirros. /60/

Ni-seostuksen ongelmana on tarve saada nikkelin hyvä homogenoituminen sulatettuun osaan. Tätä voidaan parantaa esimerkiksi lisäämällä säteen vaikutusaikaa, mutta haittana ovat sulamisalueen syveneminen ja korkeampi seostuminen. Myös lämmöntuonti ja muodonmuutokset kasvavat. /53, s. 264/

Kromi

Kromiseostusta on käytetty pääasiassa parantamaan alumiinin korroosion kestävyyttä. Kromi muodostaa alumiinin kanssa metallisia yhdisteitä kuten Al_7Cr ja $Al_{11}Cr_2$. Kromin seostuksessa on käytetty tekniikkaa, jossa laserseostettu pinta on uudelleen sulatettu halkeamisista, huokosista, sulkeumista ja sulamattomista kromipartikkeleista eroon pääsemiseksi. Kromiseostus parantaa pinnan kovuutta korkeimmillaan 300 HV:een. Seostetun kerroksen paksuus on noin 0,5 mm ja uudelleen sulatetun kerroksen paksuus 0,3 mm. Alumiinin korroosionkesto kohenee kromioksidin muodostaman passiivikalvon ansiosta. /63/

Volframi

Hyvin pienirakeista ($\sim 1 \mu m$) volframijauhetta on laserseostettu alumiiniin käyttämällä esiasetettua lisäaineensyöttötekniikkaa. Seostetun kerroksen paksuus on ollut n. 50 μm . Kerroksen kovuus on ollut yli 700 HV:ta. /12, s. 270/

Niobi

Niobia on laserseostettu sekoittamalla sitä 25 % alumiinijauheeseen. Pinta on vielä uudelleen sulatettu paremman pinnanlaadun ja pintaan jääneiden virheiden korjaamiseksi. Kahteen kertaan käsitelty pinta sisältää n. 40 % niobia. Mikrorakenne on pääasiassa Al_3Nb metalliyhdistettä. Tuloksena on ollut n. 500 HV:n kovuus. Seostetun kerroksen paksuus on ollut noin 1 mm. /64/

Pii

Piitä seostamalla on saavutettu keskimäärin n. 180 HV:n kovuus ja n. 1,4 mm paksuinen seoskerros. Piin seostamista on käytetty myös tuotantosovelluksissa sylinterin sisäpintojen käsittelyssä. /65/

Molybdeeni

Molybdeeniä on seostettu seostamattomana sekä titaanikarbidin että volframikarbidin kanssa erilaisilla seossuhteilla. Seosaineet on esiasetettu kappaleen pintaan. Kovuus ja kulumiskestävyys kasvavat volframikarbidipitoisuuden noustessa lisäaineseoksessa. Titaanikarbidin kanssa seostettuna on saavutettu paras tulos seossuhteella 70 % TiC + 30 % Mo. Seostamattomalla molybdeenillä suurin saavutettu kovuus on n. 250 HV. /66; 67/

5.2.5 Kovien partikkelien seostaminen

Periaate

Kovien partikkelien seostaminen, mistä käytetään myös nimitystä injektointi, on laserpinnanseostuksen sovellus. Erona ”normaaliin” seostamiseen on se, etteivät seostetut partikkelit sulaa seostusprosessissa. Partikkelit jäävät sulamattomina perusaineen pintaosiin ja muodostavat metallimatriisikomposiittirakenteen (MMC). Rakenne on hyvä parantamaan kovuutta ja etenkin kulumiskestävyyttä. Menetelmällä voidaan joissain sovelluksissa myös parantaa pinnan liukuominaisuuksia. Ennen kovia partikkeleita seostettiin ainoastaan tyhjössä, mutta nykyisin myös normaalissa ilmanpaineessa. /68, s. 616; 69; 41, s. 204/

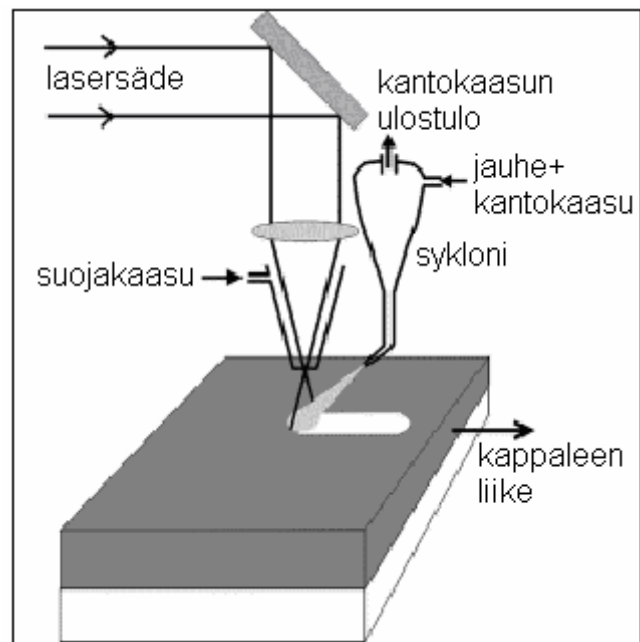
Seostamista ja injektointia voidaan käyttää myös yhdessä. Sulavaan seosaineeseen voidaan seostaa tietty osa sulamattomia partikkeleita, jotka lisäävät kovuutta ja

kulumiskestävyyttä. Toinen yhdistelmävaihtoehto on kovien partikkelien injektointi seostettuun pintaan, jolloin partikkeleille saadaan parempi tarttumispinta kuin pelkkään perusaineeseen. /61; 53/

Kovia partikkeleita seostetaan myös, jotta saataisiin kasvatettua pinnoitteen kimmokerrointa. Tähänkin tarkoitukseen sopii TiC, koska sillä on korkea Youngin moduli. /53/

Käytettäessä injektoinnissa dynaamista lisäaineensyöttöä partikkelit syötetään sulaan usein syklonin kautta. Syklonissa partikkelit erotetaan kantokaasusta ja ne ”valuvat” sulaan pelkän gravitaatiovoiman avulla. Eräissä tutkimuksissa on saavutettu paras tulos, kun syklonin kaasun ulostuloaukko on suljettu ja saatu partikkeleille suurempi nopeus. Partikkelien suurempi nopeus vähentää säteen ja partikkelien vuorovaikutusaikaa, joka vähentää partikkelien sulamista, mutta saattaa aiheuttaa ongelmia esimerkiksi partikkelien kimpoamisena pois sulasta.

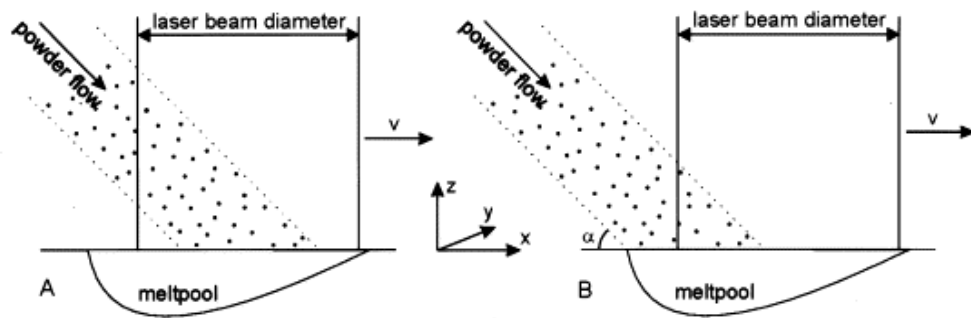
Pintakäsittelysuuntana kappaleen liike vasten lisäaineen liikettä (kuva 23) on havaittu eräissä tutkimuksissa paremmaksi. Sädettä on myös defokusoitu niin, että polttopiste on kappaleen pinnan alla. Näin seostettavien partikkelien sulaminen vähenee matkalla sulaan. /34/



Kuva 23. Injektionin periaate ”työntävällä” jauheen syötöllä. Kantokaasu ja jauhe erotetaan toisistaan syklonissa. Jauhe syötetään sulaan gravitaatiovoiman avulla.

/34/

Jauheensyötön kohdistuksella on myös merkitystä injektioinnin onnistumisen kannalta. Paras tulos saavutetaan sijoittamalla jauheensyöttö hieman säteen takapuolelle säteen kuljetussuuntaan nähden, jolloin sula ehtii kunnolla muodostua ennen partikkelien syöttämistä. Tällöin myös jauheensyöttö häiritsee vähemmän sädettä (kuva 24). Eri materiaaleilla saattaa olla eroja. Jauheensyöttökulma ei saa olla liian pieni, jotta partikkelit eivät kimpoile pois ennen sulaa. Liiallinen laserteho saattaa aiheuttaa partikkelien sulamisen kappaleen pintaan, jolloin seurauksena on hyvin karkea ja epätasainen pinta. /70/



Kuva 24. Vaihtoehto B on havaittu paremmaksi jauheensyöttökohdaksi kovien partikkelien injektoinnissa. /70/

Kovien partikkelien seostamisessa havaittuja seikkoja: /52; 69, s. 33/

- 1) Yleisesti materiaalien pintajännitys on sitä pienempi, mitä korkeampi lämpötila on, joten korkeammassa lämpötilassa partikkelit uppoavat paremmin pintaan.
- 2) Suuremmat partikkelit tunkeutuvat pintaan paremmin, koska niillä on suurempi liike-energia.
- 3) Liike-energiasta johtuen myös partikkelien nopeudella on suuri merkitys. Nopeutta voidaan vaihdella usein kantokaasun virtausta vaihtelemalla.
- 4) Suuremmalla teholla sulassa on suurempi konvektio ja partikkelit sekoittuvat siihen paremmin.
- 5) Karbidien määrä 20-30 % pinnassa antaa parhaan tuloksen kulumiskestävyyden kohentamisessa. Määrän kasvattaminen parantaa ominaisuuksia vain rajoitetusti.

Kovien partikkelien seostamisen etuja: /69, s. 33/

- hyvä kulumiskestävyys
- pinnoituksessa pinnoite saattaa irrota paineen vaikutuksesta, mutta injektoinnissa näin ei tapahdu niin helposti.

Kovien partikkelien seostamisen huonoja puolia: /34; 70/

- paljon parametreja
- pieni parametri-ikkuna
- herkkyys lisäaineensyöttöparametrien muutoksille.

Soveltuvuus alumiinille

Erityisesti piikarbidi ja titaanikarbidi ovat soveltuvia seosaineita alumiinin kulumiskestävyyden parantamiseen. Kromi- ja volframikarbidia on myös käytetty alumiinin pinnan lujittamiseen.

Seuraavassa on käsitelty yleisempien käytettyjen kovien partikkelien injektointia alumiiniin.

Titaanikarbidi

Titaanikarbidi (TiC) on yleisimpiä tutkimuksissa alumiinin kulutuskestävyyden parantamisessa käytettyjä aineita. Sillä on saatu kulumiskestävyys parantumaan eräässä tutkimuksessa yli 20-kertaiseksi verrattuna käsittelemättömään perusaineeseen. Sitä on seostettu myös yhdessä mm. nikkelin kanssa ja nikkelillä seostettuun pintaan. Titaanikarbidia on seostettu dynaamisella lisäaineen syötöllä ja esiasettamalla. Esiasettamalla kerrospaksuudeksi on saatu 100 μm ja kovuudeksi 450 HV. /69; 71/

Piikarbidi

Piikarbidia (SiC) on käytetty monessa tutkimuksessa parantamaan alumiinin kulumiskestävyyttä. Sitä on käytetty sekä esiasettamalla että dynaamisella

jauheensyötöllä. Kulumiskestävyyttä on saatu parannettua kuusinkertaiseksi käsittelemättömän perusaineeseen verrattuna. /72/

Piinitridi

Piinitridi (Si_3N_4) on harvinaisempi seosaine alumiinin laserpintakäsittelyissä. Sitä on käytetty esiasettamalla ja seostettu yksinään sekä yhdessä piikarbidin kanssa. Yksinään seostettuna pinnan kovuudeksi on saatu 400 HV. Kulumiskestävyys on parantunut kolminkertaiseksi perusaineeseen verrattuna. /50/

Volframikarbidi

Volframikarbidia on seostettu esiasettamalla. Seostuneen kerroksen paksuudeksi on saatu n. 100 μm . Maksimikovuus on ollut noin 600 HV. Kulumiskestävyys on saatu kaksinkertaistettua. /73/

Kromikarbidi

Kromikarbidia (Cr_2C_3), kuten kromiakin, on käytetty alumiinin laserpintakäsittelyissä, missä pääasiallisena tavoitteena on ollut korroosiokestävyyden parantaminen. Kromikarbidilla saavutetaan myös kulumiskestävyyden ja kovuuden kohenemistä. Kromikarbidia on seostettu dynaamisella lisäaineen syöttötekniikalla. Saavutettu maksimikovuus on ollut n. 350 HV. /74, s. 242/

Alumiinioksidi

Alumiinioksidia (Al_2O_3) on injektoitu alumiinin pintaan tavoitteena pinnan kovuuden ja kulumiskestävyyden parantaminen. Sillä on saatu aikaan ohuita pintoja ($\sim 100 \mu\text{m}$), jonka maksimikovuus on n. 600 HV. Pinta on irronnut kovemmassa pintapaineessa. /75/

5.2.6 Laserpintakarkaisu

Laserpintakarkaisun edellytyksenä on, että käsiteltävä materiaali muodostaa martensiittia. Martensiitti on erittäin kova ja hauras teräksen faasi. Sitä muodostuu hiiltä sisältävien terästen nopeasti tapahtuvassa jäähtymisessä.

Periaate

Laserpintakarkaisussa kappale kuumennetaan austeniittialueelle lasersäteen energialla. Kuumennuksen jälkeen seuraa sammutus eli kuumennettu kappale jäähdytetään nopeasti. Laserkarkaisussa tämä tapahtuu yleensä itsesammutuksena eli tuotu lämpö johtuu kappaleeseen itseensä. Nopeassa jäähtymisessä hiilen diffuusiolle ei jää riittävästi aikaa ja syntyy hiiliylikyllästetty α -ferriitti. Sitä kutsutaan martensiitiksi. /76, s. 3.4.2-2/

Soveltuvuus alumiinille

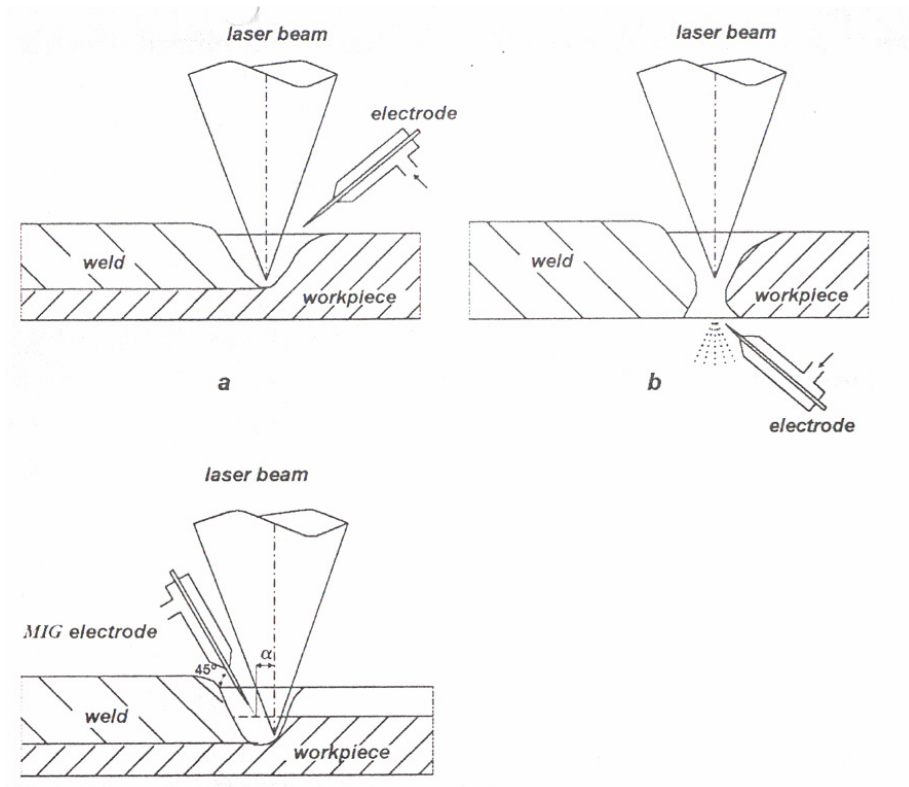
Laserpintakarkaisu ei suoranaisesti sovi alumiiniseoksille, koska ne eivät muodosta martensiittia. Alumiiniseoksille käytetäänkin lasershokkikarkaisua, joka on eri menetelmä kuin laserkarkaisu. /77, s. 207/

Lasershokkikarkaisussa yleensä pulssitetulla lasersäteellä höyrytetään kappaleen pintaa pieni alue kerrallaan. Höyrynpaine aiheuttaa kappaleen pintaan paineiskun, joka aiheuttaa työkappaleen pintaan puristusjännityksen. /78/

Lasershokkikarkaisun on tutkimuksissa havaittu parantavan alumiinien väsymisenkestoa reilusti. Kovuutta on saatu kasvatettua vain noin 10 % alkuperäisestä kovuudesta. /79, s. 112/

5.2.7 Muita menetelmiä

Muita laserpohjaisia menetelmävaihtoehtoja alumiinin kovuuden ja kulumiskestävyyden parantamiseen ovat esimerkiksi erilaiset hybridimenetelmät. Hybridimenetelmillä tarkoitetaan laserprosessin yhdistämistä johonkin toiseen prosessiin. Alumiinin pintakäsittelyssä käytettyjä yhdistelmiä ovat mm. laser-plasma, laser-TIG ja laser-MIG (kuva 25). Hybridimenetelmiä on käytetty pääasiassa hitsaussovelluksissa, mutta niiden käyttöä on myös tutkittu pintakäsittelyissä. Alumiinin pintakäsittelyssä niitä on käytetty ilman lisäainetta ja lisäaineen kanssa. /8; 80/



Kuva 25. Eri vaihtoehtoja laser-kaaripintakäsittelymenetelmille. /8, s. 17/

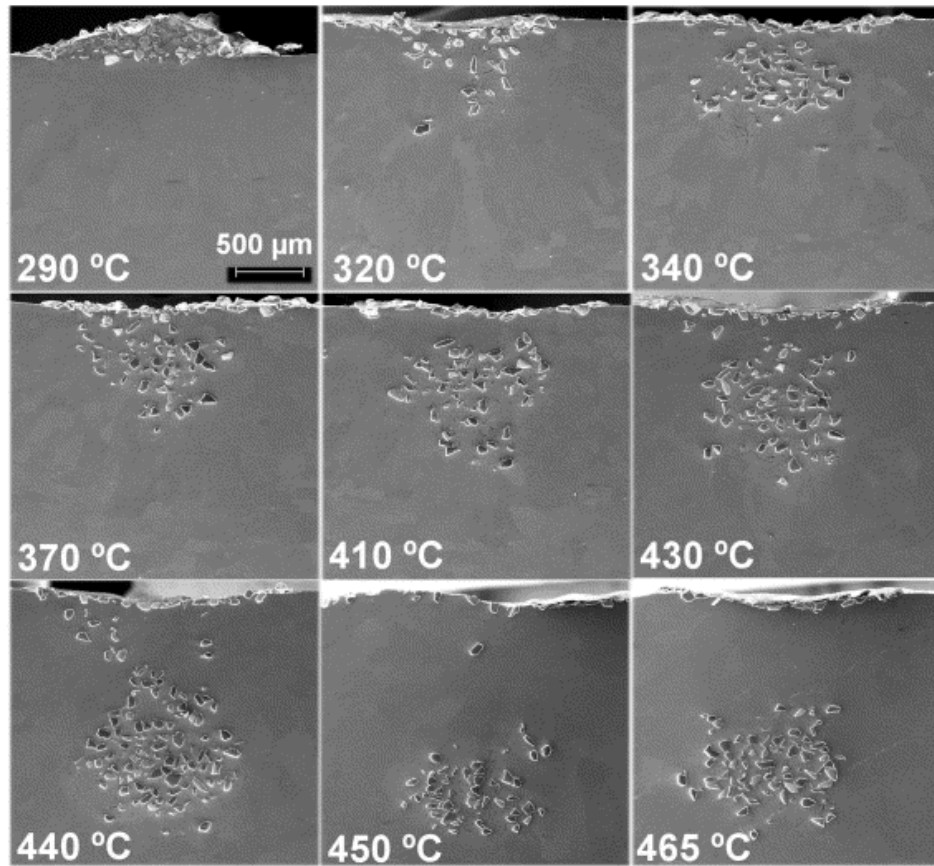
5.3 *Laserpintakäsittävän kappaleen esikäsittely*

Laserpintakäsittävän alumiinin esikäsittely poikkeaa terästen käsittelystä mm. sen pinnalla olevan kovan oksidikalvon vuoksi.

5.3.1 Esilämmitys

Esilämmitystä käytetään tavallisesti laserpintakäsittelyissä estämään halkeamien muodostumista. Esilämmitys hidastaa kappaleen jäähtymistä käsittelyn jälkeen, jolloin yleensä jäähtymisvaiheessa syntyneiden halkeamien määrä vähenee. /77, s. 208/

Esilämmitys lisää lisääaineen ja perusaineen sekoittumista. Se myös lisää seosaineen tunkeumaa perusaineeseen, kuten kuvasta 26 on nähtävissä kovien partikkelien seostamisen tapauksessa. Esilämpenemistä tapahtuu yleensä myös monipalkopintakäsittelyissä. Viimeisten palkojen käsittelyn aikana kappale saattaa olla lämmennyt huomattavasti alkuperäistä korkeampaan lämpötilaan, jolloin loppupalot tehdään esilämmitettyyn kappaleeseen. Eräissä tutkimuksissa koejärjestely on järjestetty niin, että koekappaleen alla on jäähdytysjärjestelmä, joka pyrkii pitämään kappaleen lämpötilan vakiona. /61; 56/



Kuva 26. Esilämmityksen vaikutus SiC-partikkelien injektoinnissa. Partikkelit tunkeutuvat sitä syvemmälle mitä korkeampi on kappaleen esilämpö. /34/

Nikkelin ja muiden metastabiileja faaseja muodostavien seosaineiden seostuksessa esilämmityksestä saattaa olla haittaa, jos faasien muodostumiseen vaadittavaa riittävän nopeaa jäähtymistä ei pääse tapahtumaan.

5.3.2 Oksidikalvon merkitys

Ilmassa alumiinin pintaan muodostuu 0,01-0,1 μm paksu kova ja suojaava oksidikerros. Oksidikerroksen vaurioituessa mekaanisesti se muodostuu uudelleen välittömästi. Kuivassa ilmassa paljaan alumiinin pintaan muodostuu muutaman nanometrin paksuinen oksidikerros minuuteissa. Joillakin seosaineilla on heikentävä vaikutus oksidikerroksen muodostumiseen. /11, s. 98/

Laserpintakäsittelyissä paras tulos on saatu aikaan poistamalla oksidikalvo alumiinin pinnasta. Suurimmassa osassa laserpintakäsittelytutkimuksia alumiinin oksidikalvo on poistettu ennen pintakäsittelyä. Kalvon poistaminen on yleensä suoritettu raepuhaltamalla, jonka jälkeen on vielä tehty puhdistus asetonilla. Puhallus parantaa myös säteen absorptiota kappaleen pintaan. /69; 34/

Esilämmityksellä pystytään ehkäisemään nopeasti muodostuvan oksidikalvon vaikutusta. Esilämmitys liuottaa raepuhalluksen jälkeen syntyneen ohuen oksidikalvon osittain pois, mikä helpottaa ainakin kovien partikkelien tunkeutumista kappaleen pintaan. /34/

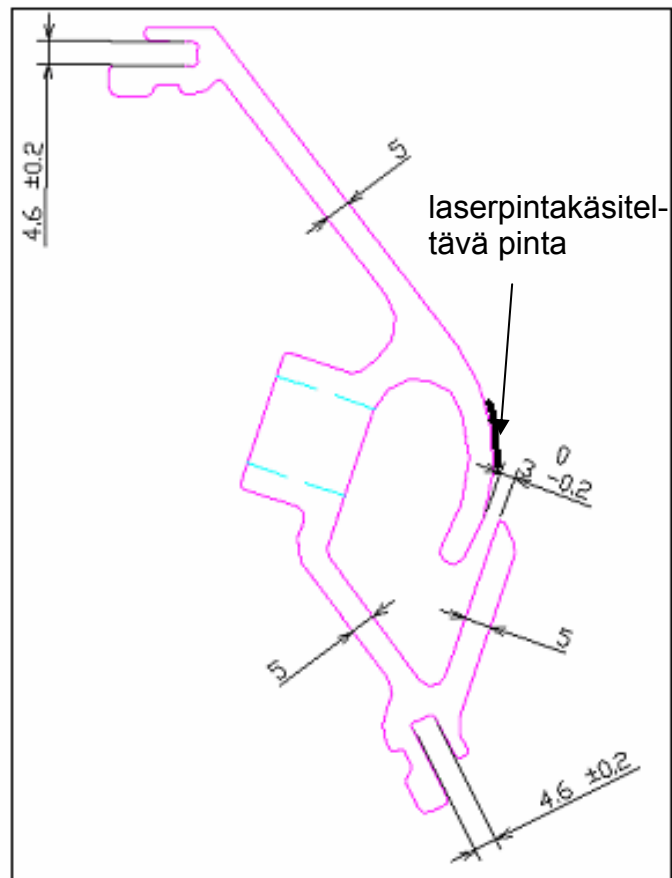
KOKEELLINEN OSA

6 Työn tausta ja tavoitteet

Diplomityön kokeellisessa osassa tutkittiin laserpintakäsittelyn mahdollisuuksia alumiinin pintaominaisuuksien, erityisesti kovuuden ja kulumiskestävyyden parantamiseksi.

Diplomityön kokeiden sovelluskohteena oli paperikoneen puhalluslaatikon suutin. Diplomityössä tehtävien kokeiden tavoitteena oli olla pohjana soveltaville kokeille, joissa laserpintakäsiteltäisiin sovelluskohteen mukainen kappale.

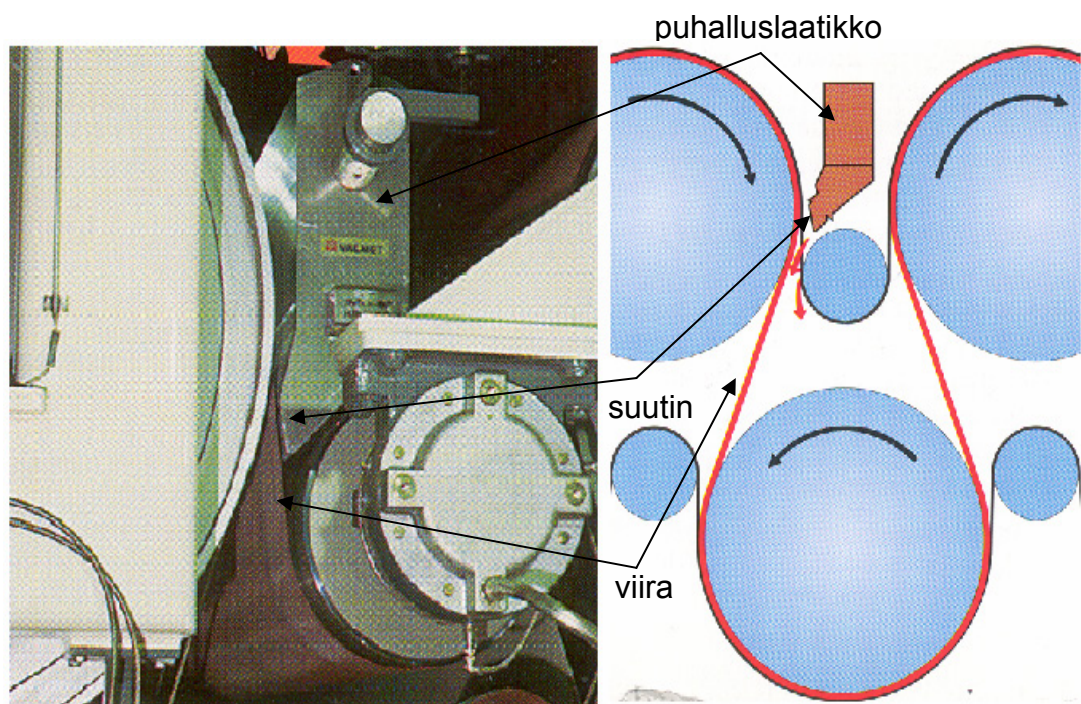
Puhalluslaatikkoa käytetään paperikoneissa kuivaukseen tai paperirainan ajettavuuden parantamiseen. Puhalluslaatikko on valmistettu alumiinista ja se kootaan hitsaamalla. Laatikon suutin on SRHS-profiilia ja sen materiaali on AW-6063 eli AlMg0,7Si (kuva 27). Toimitustila on useimmiten T5. Ongelmana rakenteessa on ollut suuttimen reunan kuluminen. Kuluminen aiheutuu viiran ajoittaisesta kosketuksesta suuttimeen viiran värinöistä johtuen. Viira kuluttaa vähitellen suutinta niin paljon, että siitä aiheutuu haittaa sen toiminnalle. Myös suuttimen reunan kuluessa se alkaa kuluttaa yhä enemmän kallista viiraa.



Kuva 27. Suutinprofiilin mittakuva.

Kulumisen aiheuttaa liukuminen eli kulumistyyppinä on liukumiskuluminen. Pääasialliseksi kulumismekanismiksi arvioitiin abrasiivinen kuluminen. Myös korrosoivat olosuhteet joissakin suuttimen käyttökohteissa vaikuttavat suuttimen kulumiseen jonkin verran.

Diplomityössä tutkittiin mahdollisuutta laserpintakäsittelyillä parantaa profiilin kulumiskestävyyttä kohdasta missä viira ottaa kiinni suuttimeen (kuva 27). Viiran sijoittuminen suuttimeen näkyy kuvasta 28.



Kuva 28. Puhalluslaatikon suuttimen sijoittuminen viiraan nähden.

Ratkaisua ongelmaan on aiemmin etsitty anodisoinnista, jonka ongelmana on se, että suurikokoiset laatikot eivät mahdu kokonaisena anodisointialtaaseen ja ne on jouduttu paloitlemaan. Menetelmä on parantanut suuttimen kulumiskestävyyttä jonkin verran, mutta siitä on luovuttu edellä mainitun hankaluuden vuoksi. Suutinprofiilin kulumisen ehkäisemiseen on myös käytetty teflonlistoja, joita on asennettu kohtiin, joissa viira ottaa kiinni profiiliin.

Sovelluskohteen mukaan asetettiin tavoite kulumiskestävyyden osalta. Pääavoite oli paremman abrasiivisen kulumiskestävyyden saavuttaminen kuin anodisoinnilla saavutetaan. Abrasiivista kulumiskestävyyttä mitattiin kumipyöräkokeella.

Diplomityön kokeellisen osan tavoitteiden asettamista hankaloitti kokemuksen puute alumiinin laserpintakäsittelyistä. Ei tiedetty miten vaikeaa alumiinin laserpintakäsittely on, ja miten laboratorion pintakäsittelylaitteisto soveltuu siihen. Alustavaksi tavoitteeksi asetettiin sopivan laserpintakäsittelymenetelmän ja toimivien parametrien löytäminen. Tavoitteena oli myös oppia tuntemaan paremmin

alumiinin laserpintakäsittelyprosessia ja sen eri parametrien vaikutusta pintakäsittelyn lopputulokseen.

Kokeet suoritettiin diplomityön sovelluskohteen vaatimuksien mukaan, jonka vuoksi tavoitteena oli lämmöntuonnin pitäminen mahdollisimman alhaisena. Sovelluskohteen rakenne on suurikokoinen ja melko ohuista materiaaleista valmistettu. Muodonmuutosten minimoimiseksi ja mittatarkkuuksien säilymiseksi energiantuonti oli pyrittävä pitämään alhaisena. Pienillä aineenpaksuuksilla myös liiallinen teho ja lämmöntuonti aiheuttaa läpisulamista.

Kaikki laserpintakäsittelykokeet tehtiin Tulevaisuuden tehtaassa Lappeenrannassa.

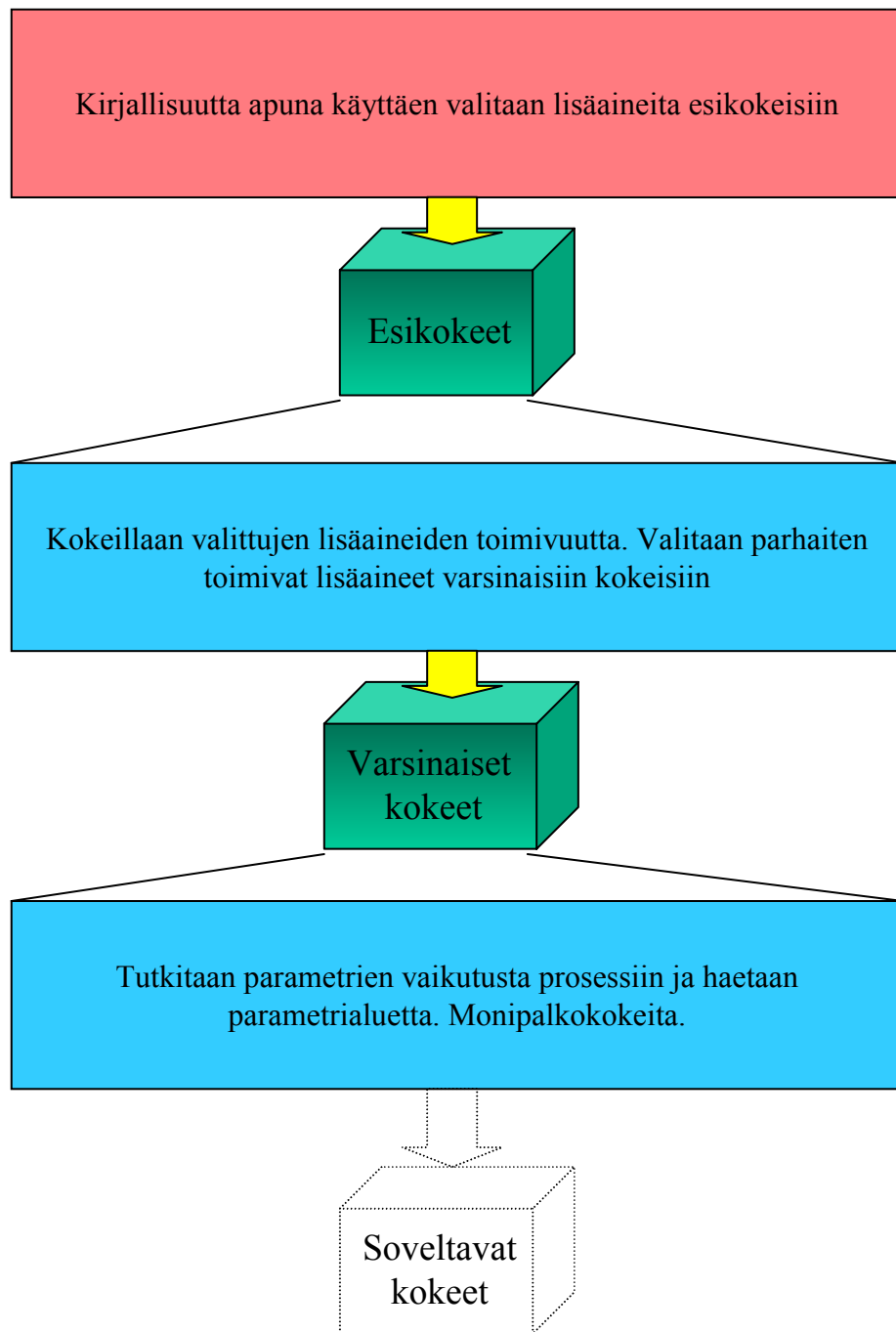
7 Koejärjestelyt

7.1 Kokeiden kulku

Kokeet jaettiin esikokeisiin ja varsinaisiin kokeisiin. Esikokeissa oli tarkoituksena valita laserpintakäsittelymenetelmä, kokeilla eri lisäainemateriaalivaihtoehtoja, etsiä niistä tarkoitukseen sopivin ja tutkia, miten käytetty alumiiniseos käyttäytyy laserpintakäsittelyn perusmateriaalina. Myös pintakäsittelyparametrien hakeminen oikealle alueelle oli esikokeiden tavoitteena ja niiden onnistumisen edellytyksenä.

Varsinaisissa kokeissa tehtiin jatkokokeita esikokeiden perusteella valituilla lisäaineilla. Esikokeissa tutkimukset tehtiin kokeilla, joissa pintakäsiteltiin yksi palko kerrallaan. Varsinaisissa kokeissa tehtiin sekä yhden palon kokeita että monipalkkokokeita. Varsinaisten kokeiden tavoitteena oli tutkia parametrien vaikutusta pintakäsittelyprosessiin.

Diplomityössä tehtyjen kokeiden tarkoituksena on olla pohjana soveltaville kokeille, missä laserpintakäsittelyä kokeiltaisiin varsinaiseen sovelluskohteeseen. Soveltavat kokeet eivät kuuluneet diplomityön tavoitteisiin. Kokeiden kulku käy ilmi vuokaaviosta (kuva 29).



Kuva 29. Diplomityön kokeiden koevuokaavio.

7.1.1 Esikokeet

Esikokeisiin valittiin kirjallisuuden perusteella potentiaalisia lisäainejauheita. Mukaan valittiin sekä laserseostukseen soveltuvia lisäaineita että myös muutamia kovia partikkeleja injektointitekniikan kokeiluun. Laserseostukseen käytettiin nikkelpohjaisia lisäaineita, joilla oli kirjallisuuden mukaan saatu lupaavia tuloksia.

Laserseostuskokeissa käytettiin sekä nikkelijauhetta että jauhetta, jossa nikkeliin oli seostettu 20 tilavuusprosenttia piikarbida. Kirjallisuudessa olevissa tutkimusraporteissa kovia partikkeleita oli menestyksekkäästi seostettu nikkelillä seostettuun pintaan. Lisäkäsittelykerrat kuitenkin lisäävät kappaleeseen tuotavaa lämpöä ja muodonmuutoksia, mikä on kriittistä varsinkin ohuilla aineenvahvuuksilla. Näin ollen kokeet tehtiin jauheella, johon oli etukäteen seostettu karbida. Lisäksi käytettiin nikkelpohjaista jauheseosta, jonka kaupallinen nimi on Inconel 625.

Esikokeissa käytettyjä lisäaineita:

- kromikarbidi (Cr_2C_3)
- alumiinioksidi (Al_2O_3)
- nikkeli
- nikkeli/SiC (20 tilavuus-% SiC)
- Inconel 625.

Esikokeiden perusteella pääteltiin, että laserpinnanseostustekniikka soveltuisi parhaiten käytettävissä olevalle pintakäsittelylaitteistolle. Injektointitekniikassa jauheensyöttölaitteistoon vaadittaisiin sykloni erottelemaan kantokaasu ja jauhe toisistaan paremman lopputuloksen saavuttamiseksi. Lisäksi ohuet aineenvahvuudet rajoittavat injektoinnin käyttöä, koska tehotiheys on siinä vielä seostustakin suurempi.

Alumiinin pinnoittaminen pienillä seostumisasteilla ei myöskään onnistu helposti, johtuen alumiinin alhaisesta sulamispisteestä ja korkeasta lämmönjohtumisesta.

Alumiinin lasersulatuksella ei kirjallisuuden mukaan saavuteta diplomityöhön asetettuihin tavoitteisiin nähden kuin vähäistä kovuuden ja kulumiskestävyuden paranemista, joten siihenkään tekniikkaan ei panostettu.

Edellä mainituista syistä varsinaiset kokeet päätettiin tehdä laserpinnanseostustekniikalla ja nikkelpohjaisilla seosaineilla.

7.1.2 Varsinaiset kokeet

Esikokeiden perusteella varsinaisia kokeita päätettiin tehdä lisäaineilla Inconel 625 ja Ni-SiC. Varsinaisten kokeiden alkuvaiheessa kuitenkin havaittiin Ni-SiC-jauheen aiheuttavan huomattavan määrän huokosia perusaineen rajalle ja sen läheisyyteen. Huokosten määrä oli huomattavasti suurempi kuin lisäaineella Inconel 625, jossa niitä ei juuri havaittu. Näin ollen kokeita painotettiin Inconel 625-jauheella seostukseen, millä myös kulumiskoekappaleet käsiteltiin. Saavutetuissa maksimaalisissa kovuuksissa näiden jauheiden välillä ei ollut suuria eroja. Kovuuden jakauma oli Inconel 625-jauheella tasaisempi seostetulla-alueella kuin jauheella Ni-SiC. Jauheella Ni-SiC seostettu pinta oli jonkin verran hauraampi kuin Inconel 625-jauheella seostettu pinta.

Esikokeet tehtiin suurimmaksi osaksi yhdenpalon kokeina. Varsinaisissa kokeissa tutkittiin myös monipalkokäsittelyjä, joita käytännön sovelluksissa käytetään. Monipalkokokeissa tulee varsinaisesti lisää vain yksi parametri, palkojen limitys. Muita yhden palon kokeisiin verrattuna mukaan tulevia muuttujia ovat peräkkäisten palkojen käsittelyn välinen tauko ja palkojen pituus. Ne vaikuttavat palon jäähtymisaikaan ennen seuraavan palon tekoa. Jäähtymisaikaan vaikuttaa oleellisesti myös kappaleen koko.

7.2 Koelaitteistot

Kokeet suoritettiin Tulevaisuuden tehtaassa Nd:YAG-lasertyöstösolussa. Koelaitteisto koostui laserista, jauheensyöttölaitteesta ja työasemasta.

7.2.1 Laser

Laserpintakäsittelykokeissa käytettiin Saksassa valmistettua Haasin (nykyinen Trumpf) HL 3006D lamppupumpattua Nd:YAG-laseria, jonka aallonpituus on 1,06 μm (kuva 30 ja taulukko 6). Toinen hyvä laservaihtoehto olisi ollut diodilaser. Näiden kahden laserin valon absorptio alumiiniin on moninkertainen verrattuna CO₂-laserin tuottamaan valoon. Nd:YAG-laserin valinta perustui sen monipuolisuuteen. Diplomityön teollisuussovelluksessa on myös tutkittu mahdollisuutta käyttää laseria osassa hitsauksia. Diodilaser ei vielä tämän hetkessä kehitysasteessa sovellu paksun levyn hitsauksiin. Koska sovelluskohteen kannalta haluttiin painottaa laserin käyttömahdollisuuksia myös hitsaussovelluksiin, Nd:YAG-laser oli järkevä valinta, vaikka se häviääkin hieman absorboitumisarvoissa diodilaserille.



Kuva 30. Kokeissa käytetyn laserin resonaattori.

Taulukko 6. Kokeissa käytetyn laserin teknisiä tietoja.

Suurin ulostuloteho [W]	Teho kappaleen pinnalla [W]	Säteenlaatu [mm*mrad]
4000	3000	25

Säde kuljetettiin laserin resonaattorista työasemaan halkaisijaltaan 0,6 mm olevaa optista kuitua pitkin. Säde fokuoitiin kappaleen pinnan yläpuolelle fokuointilinssillä. Kokeet suoritettiin optiikalla, missä fokuoivan linssin polttoväli on 200 mm.

7.2.2 Jauheensyöttölaitteisto

Laserpintakäsittelykokeissa lisäaine syötettiin prosessiin jauheena dynaamisesti eli prosessin aikana. Jauhe syötettiin Metcon Plasma-Technik 10-C jauheensyöttölaitteella (kuva 31) kantokaasun avulla. Jauheensyöttölaite on puolimekaaninen ja sillä voidaan tarvittaessa syöttää jauhetta kahdesta säiliöstä samanaikaisesti. Jauhe syötetään säiliöstä tiputtamalla pyörivän kiekon päälle, mistä

se kantokaasun avulla kuljetetaan eteenpäin. Jauheensyöttönopeutta säädetään kiekon pyörimisnopeutta säätämällä. Kantokaasuna käytettiin typpeä. Jauheensyöttösuuttimena oli kupariputki, jonka reiän halkaisija oli 3 mm.



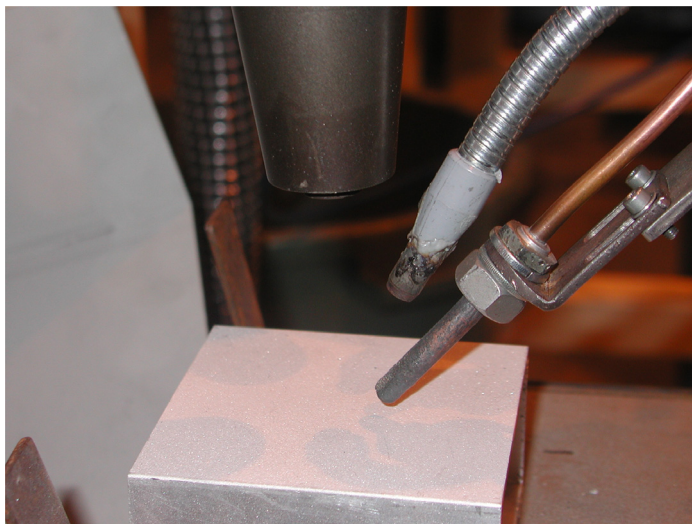
Kuva 31. Plasma-Technik 10-C jauheensyöttölaite.

7.2.3 Työasema

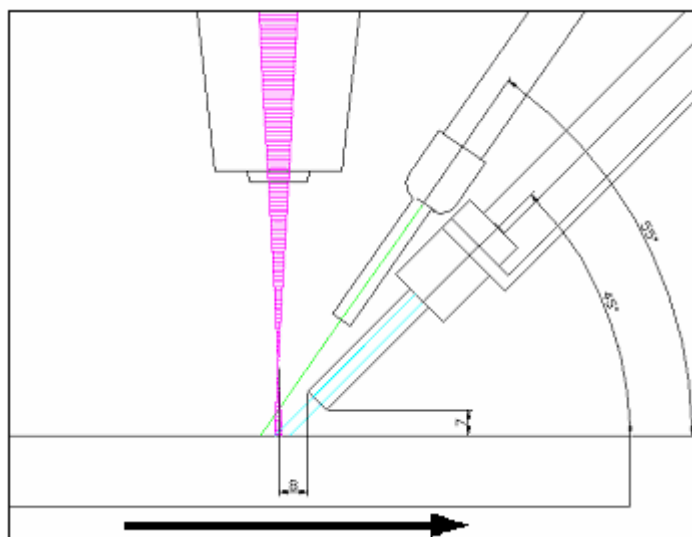
Laser- ja jauheensyöttöpään kuljettimena toimi Kukan kuusiakselinen nivelvarsirobotti. Varsinaisessa sovelluskohteessa pintakäsittelyä tulisi kiinnittää isompaan työasemaan kappaleen suurien dimensioiden takia.

Kokeet tehtiin n. 100 mm:n pituisiin profiileihin. Koekappaleet raepuhallettiin ennen pintakäsittelyä, jotta alumiinin luontainen oksidikalvo ja muut epäpuhtaudet saatiin poistettua. Raepartikkeleina käytettiin alumiinioksidia. Raepuhalluksen jälkeen kappaleet puhdistettiin vielä asetonilla ennen pintakäsittelyä.

Jauheensyöttöpää kohdistettiin lasersäteeseen kohdalle 45 asteen kulmassa kappaleen pintaan nähden. Tarkempaa kohdistusta muuteltiin hieman kokeiden aikana. Paras tulos saatiin, riippuen muista parametreista, sijoittamalla jauheensyötön kohdistus hieman säteen etupuolelle sen kuljetussuuntaan nähden (Kuvat 32 ja 33).



Kuva 32. Pintakäsittelyä.



Kuva 33. Pintakäsittelyään mittakuva. Kuljetussuunta merkitty nuolella.

Suojakaasua syötettiin putkesta, jonka suuttimena oli kupariputki. Suutin oli asetettu samansuuntaisesti kuin jauheensyöttösuutinkin, sen yläpuolelle hieman jyrkempään kulmaan (kuvat 32 ja 33). Suojakaasuna käytettiin argonia.

7.3 Parametrit

Laserpintakäsittelyissä parametreja on hyvin runsaasti, kuten teoriaosastakin käy ilmi. Parametrien variointia täytyi rajoittaa, jotta saataisiin selville tarkemmin kunkin parametrin vaikutus pintakäsittelyn lopputulokseen. Varsinaiset kokeet tehtiin valitsemalla kaksi muuteltavaa parametria ja pitämällä muut parametrit vakioina. Muuteltavat parametrit olivat jauheensyöttönopeus ja laserteho. Monipalkkokokeissa kokeiltiin myös palkojen limityksen eri arvojen vaikutusta.

Laserteholla voidaan vaikuttaa tehotiheuteen sekä ominaisenergiaan. Näihin voidaan vaikuttaa myös fokuksen kokoa ja kuljetusnopeutta muuntelemalla (kaavat 3, 4 ja 5). Tulos ei kuitenkaan aina ole sama, jos esimerkiksi kappaleita käsitellään samalla ominaisenergialla, mutta eri nopeudella. Suuremmalla kuljetusnopeudella jäähtymisnopeus on yleensä suurempi kuin pienemmällä nopeudella, vaikka ominaisenergia olisikin sama. Nopeus ja fokuksen koko päätettiin kuitenkin pitää kokeissa vakioina.

Esikokeiden parametrit valittiin muiden materiaalien pinnoituksessa käytettävien parametrien perusteella. Kaksissa ensimmäisissä kokeissa ei saatu kunnollista tulosta aikaan, vaikka parametreja yritettiin varioida laajalla alueella. Vasta kolmannella koekerralla saatiin aikaan, silmämääräisesti tarkasteltuna, paremman laatuinen pinta. Tärkein muutos edellisiin kokeisiin oli säteen halkaisijan pienentäminen kappaleen pinnalla eli tehotiheyttä ja ominaisenergiaa kasvatettiin. Kokeissa havaittiin, että alumiinin laserpinnanseostuksessa vaaditaan suhteellisen suuri tehotiheys ja lopputulos on parempi pienemmällä säteen halkaisijalla.

Kokeet tehtiin esilämmittämättömiin kappaleisiin. Tehtäessä useita kokeita samaan kappaleeseen, odotettiin sen jäähtymistä ennen seuraavan palon käsittelyä. Jäähtymistä mitattiin pintalämpömittarilla.

Monipalkkokokeet tehtiin viiden palon sarjoina taukoja palkojen välissä pitämättä. Näin ollen kappaleen lämpötila nousi käsittelyn edetessä. Lämpötilan nousunopeus riippui kappaleen koosta. Ensimmäisen palon jälkeen muut palot tehtiin ikään kuin esilämmitettyyn kappaleeseen. Aikaisemmin mainittua järjestelyä, jossa kappaleen lämpötila pysyy vakiona jäähdytyksen ansiosta, on käytännön kohteissa hankala toteuttaa.

Taulukko 7. Varsinaisissa kokeissa käytetyt parametrialueet.

Ainevahvuus	3-5 mm
Jauheensyöttönopeus	11,8-35,4 g/min
Laserteho	1500-3000 W
Suojakaasu ja virtausnopeus	Argon 20-25 l/min
Kantokaasu ja virtausnopeus	Typpi 6-9 l/min
Limitys	9-23 %
Kuljetusnopeus	500 mm/min
Säteen halkaisija	2,2 mm
Säteen vaikutusaika	0,21 s
Tehotiheys	400-790 W/mm ²
Ominaisenergia	104-209 J/mm ²
Energian tuonti	1,8-3,6 kJ/cm

7.4 Koemateriaalit

7.4.1 Perusaine

Laserpintakäsittelykokeissa käytetyn perusaineen määräsivät sovelluskohteen vaatimukset. Sovelluskohde valmistetaan alumiiniseoksesta SFS-EN AW-6063, jonka kemialliseen koostumukseen perustuva merkintä on AlMg0,7Si. Seoksen toimitustila oli T5 eli se on kuumamuokkauksen jälkeen jäähdytetty valmistuslämpötilasta ja keinovanhennettu. Sillä on erinomainen pursotettavuus. Sitä voidaan pursottaa jopa 100 m/min nopeudella ja samanaikaisesti voidaan saavuttaa hyvä pinnanlaatu, alumiiniprofiilin muotoilun vapaus ja tarkoituksenmukainen seinämänpaksuus. Seoksesta voidaan valmistaa monimutkaisia ohutseinämäisiä profiileja. Sitä käytetään yleisesti kuljetusvälineissä, joissa jäykkyys ja väsymislujuus ovat tärkeämpiä kuin staattinen lujuus. Taulukoissa 8, 9 ja 10 on esitetty perusainemateriaalin ominaisuuksia. /11, s. 69/

Taulukko 8. Perusaineen nimellinen koostumus.

Al	Mg	Si
%	%	%
98,9	0,7	0,4

Taulukko 9. Perusaineen mekaanisia ominaisuuksia.

Murtolujuus	Myötölujuus	Murtovenymä	Kovuus
MPa	MPa	%	HV
185	145	12	60

Taulukko 10. Perusaineen fysikaalisia ominaisuuksia.

Tiheys kg/dm ³	Lämpölaajenemiskerroin μm/m°C	Ominaislämpö J/kg°C	Puuroalue °C	Kimmomoduli MPa
2,70	23,5	898	615-655	69500
Ominaisvastus nWm	Lämmönjohtavuus W/m°C			
33,0	201			

Käytettyjen koekappaleiden ainevahvuuden määräsi myös sovelluskohde. Kokeissa käytettiin 3-5 mm paksuisia koelevyjä, koska sovelluskohteen suutinprofiilin ainevahvuus oli kulumasta/pintakäsiteltävästä kohdasta 4 mm. Tämä aiheutti rajoitteita mm. lämmöntuonnin ja muodonmuutosten osalta.

7.4.2 Lisäaineet

Varsinaisissa kokeissa käytettiin kahta lisäainetta. Kummatkin olivat nikkeli-pohjaisia jauheita.

Ni-20 til. % SiC

Ni-20 til. % SiC-jauhe tilattiin räätälöitynä seoksena, joka koostui nikkelistä ja piikarbidista. Piikarbidia oli sekoitettu nikkeliin 20 tilavuusprosenttia. Karbidiseostuksella pyrittiin parantamaan kulumiskestävyttä. Kovien partikkelien seostuksella saadaan kulumiskestävyys paranemaan huomattavasti, jos metallimatriisikomposiittirakenne saadaan muodostumaan kappaleen pintaan. Jauheen partikkelikoko oli 45-125 μm.

Inconel 625

Toinen lisäainejauhe oli kaupallinen jauheseos, jonka tuotemerkki on Inconel 625. Sen pääseosaineet ovat nikkeli, kromi ja molybdeeni. Siihen on myös lisätty pieni määrä niobia, joka lujittaa molybdeenia. Näin ollen seos tarjoaa korkeita lujuuksia ilman lujittavia lämpökäsittelyjä. Se on erittäin hyvin korroosiota kestävä, erityisesti kuoppa- ja rakokorroosiota vastaan. Sitä käytetään kemianteollisuudessa, lentokoneissa, meriteollisuudessa ja ydinvoimalan reaktoreissa. Sen tarkempi kemiallinen koostumus käy ilmi taulukosta 11 ja sen ominaisuuksia on lueteltu taulukoissa 12 ja 13. Jauheen partikkelikoko oli 53-150 µm.

Taulukko 11. Inconel 625-jauheen nimelliskoostumus (paino-%).

C %	Si %	Fe %	Cr %	Ni %	Mo %	Nb %
<0,03	0,40	1,4	21,5	loput (~64)	9,0	3,8

Taulukko 12. Inconel 625-jauheen mekaanisia ominaisuuksia.

Murtolujuus Mpa	Myötölujuus Mpa	Murtovenymä %	Kimmomoduli
930	517	42,5	207

Taulukko 13. Inconel 625-jauheen fysikaalisia ominaisuuksia.

Tiheys g/cm ³	Sulamispiste °C	Ominaislämpö J/kg · K	Lämpölaajenemiskerroin µm/m · K	Lämmönjohtavuus W/m · K
8,44	1290-1350	410	12,8	9,8

8 Koekappaleiden tutkimusmenetelmät

8.1 Silmämääräinen tarkastelu

Silmämääräistä tarkastelua suoritettiin koko ajan kokeita tehtäessä. Kokeiden jälkeen tehtiin vielä tarkempi tarkastelu suurennuslasin avulla. Silmämääräisessä tarkastelussa pystyttiin arvioimaan käsitellyn pinnanlaatu ja -muoto. Pintaan asti ulottuvat huokokset ja halkeamat kyettiin myös havaitsemaan.

8.2 Makro- ja mikrorakenteen tarkastelu

Pintakäsittelykoekappaleista valmistettiin hieet LTY:n metallilaboratoriossa. Käsitellyt kappaleet katkaistiin laikalla ja hiottiin hiekkapapereilla karkeuksilla 200-800. Kiillotus tehtiin alumiinioksidia käyttäen. Kiillotuksen jälkeen hieet syövytettiin fluorivetyhapolla (HF).

Poikkileikkauksista tutkittiin makrorakennetta ja hieman mikrorakennetta. Makrorakennetarkastelussa mitattiin seostuneen alueen dimensiot ja voitiin havaita myös huokosia ja halkeamia.

8.3 Kovuuskokeet

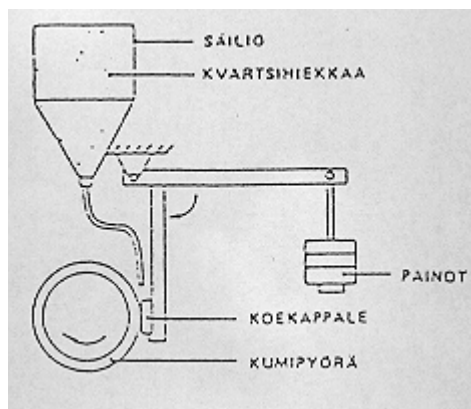
Kovuuskokeet tehtiin LTY:n metallilaboratoriossa ZWICK mittauslaitteella, jonka mittaustarkkuus on 0,001 mm. Painona käytettiin 1 kg painoa (HV 1). Kovuuden mittaus aloitettiin kappaleen pinnasta ja sitä jatkettiin poikkipintaa pitkin syvemmälle. Mittaus lopetettiin, kun oli saavutettu perusaineenraja ja kovuus ei enää muuttunut. Kovuus mitattiin 0,1 mm:n välein.

8.4 Kulumiskokeet

Kulumiskokeet tehtiin VTT:llä Otaniemessä. Kokeet tehtiin abraasio- eli kumipyöräkoelaitteella. Siinä simuloitiin käytännössä esiintyvää hiovaa kulumista. Kumipyöräkokeessa kumipyörän ja tutkittavan kappaleen väliin ohjataan kovaa materiaalia pyörän pyöriessä. Kumipyörää painetaan tietyllä voimalla kohti koekappaletta. Koelaitteisto oli ASTM G-65-mukainen (kuva 34). Koekappaleiden mitat olivat 25x50x4 mm.

Kulumiskokeet tehtiin Inconel 625:llä seostetuille koekappaleille. Niitä verrattiin anodisoituihin ja käsittelemättömiin kappaleisiin.

Anodisoidut koekappaleet oli käsitelty luonnonvärianodisoinnilla ja kerroksen paksuus oli 20 µm. Anodisointiprosessi oli vastaava kuin sovelluskohteessa aiemmin käytetty.



Kuva 34. Kumipyöräkokeen periaatekuva.

Tehdyissä kokeissa kumipyörää painettiin 45 N voimalla ja sen kierrosnopeus oli 100 rpm. Koeaikana oli 5 min. Käytetty abrasiivi oli Silversand 25. Abrasiivin keskimääräinen pudotusnopeus oli 300 g/min.

8.5 Radiografinen tarkastelu

Varsinaisissa kokeissa Inconel 625-jauheella laserseostetuille kappaleille tehtiin myös radiografinen tarkastelu huokosten ja halkeamien havaitsemiseksi. Röntgenkuvat otettiin LTY:n konetekniikan osaston RuP 300 röntgenkuvauslaitteella.

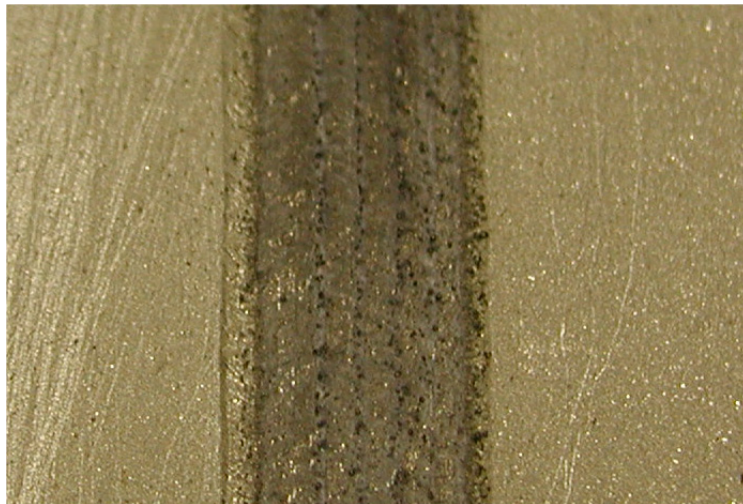
8.6 Alkuaineanalyysi

Pintakäsittelyn pinnan poikkileikkauksesta tehtiin alkuaineanalyysi, sen koostumuksen ja seosaineiden jakautumisen selvittämiseksi. Analyysi tehtiin JEOL JSM-5800 pyyhkäisyelektronimikroskoopilla (SEM) ja siihen liitetyllä EDS-tunnistimella LTY:n kemiantekniikan osastolla. Niobin määrää ei käytetyllä laitteella pystytty määrittelemään, koska sen pitoisuudet koekappaleissa olivat niin pieniä.

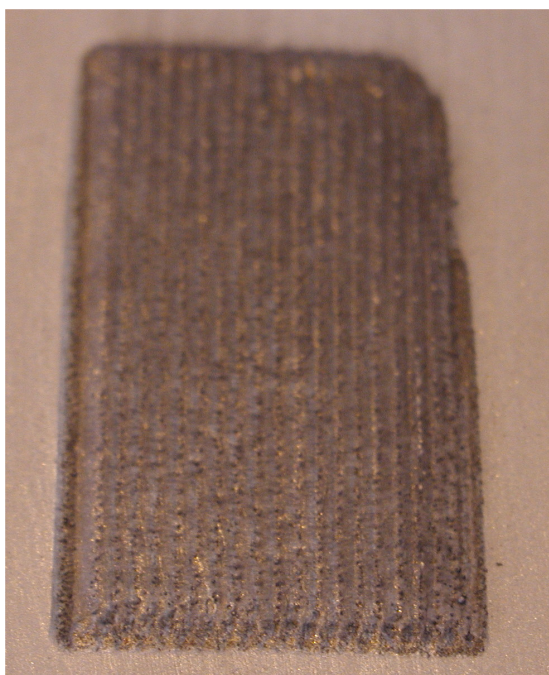
9 Tulokset ja tulosten analysointi

9.1 Silmämääräinen tarkastelu

Alumiinille saadaan aikaan silmämääräisesti tarkasteltuna hyvänlaatuista pintaa laserpinnanseostuksella seostamalla siihen Inconel 625- tai Ni-SiC-jauhetta (kuvat 35 ja 36).



Kuva 35. *Lisäaine Inconel 625. Seostettu 5 palkoa. Teho 1800 W, jauheensyöttönopeus 17,7 g/min.*



Kuva 36. *Lisäainejauhe Inconel 625. Seostettu 20 palkoa. Teho 1800 W, jauheensyöttönopeus 11,8 g/min.*

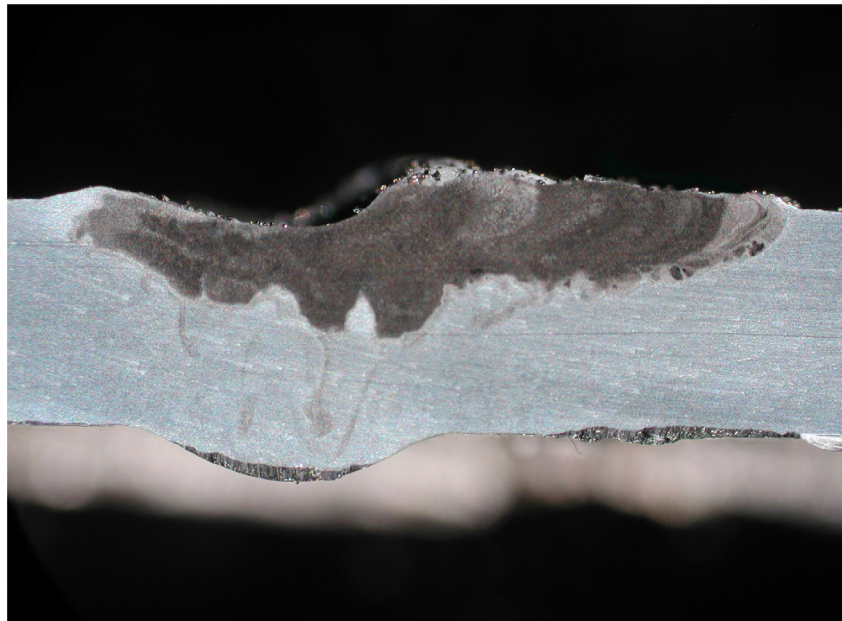
Silmämääräisessä tarkastelussa havaittiin, että kun jauheensyöttönopeus nousee liian suureksi suhteessa lasertehtoon, alkaa pinta aaltoilla, muodostua epätasaiseksi ja jauhe jää kappaleen pinnalle (kuva 37).



Kuva 37. *Lisäaine Inconel 625. Teho 2000 W, jauheensyöttö 29,5 g/min.*

Suurilla jauheensyöttönopeuksilla, varsinkin monipalkokäsittelyissä, muodostui halkeilua. Kulumiskoekappaleita valmistettaessa havaittiin, että suurempia pinta-aloja pintakäsiteltäessä halkeilu muodostuu pahemmaksi ongelmaksi, kuin viiden palon monipalkokäsittelyistä oli pääteltävissä.

Liian suurella teholla, ohuista aineenvahvuuksista johtuen, koekappale sulaa läpi (kuva 38). Tämä ongelma tuli esille monipalkokäsittelyissä, joissa kappale lämpenee käsittelyn edetessä. Lämpeneminen lisää myös absorptiota, joka edelleen lisää lämmöntuontia kappaleeseen. Paksummilla aineenvahvuuksilla ei olisi läpisulamisongelmaa.

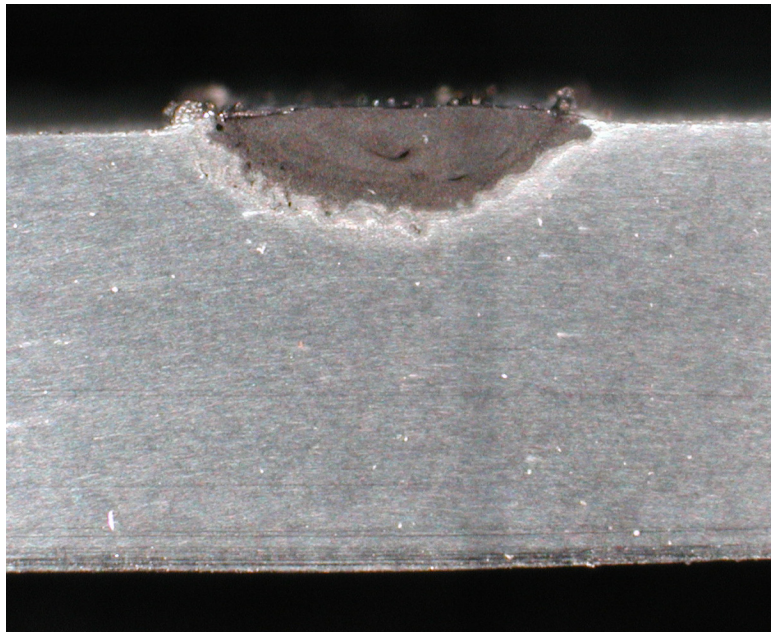


Kuva 38. Osittain läpisulanut koekappale. Seosaine Inconel 625. 5 palkkoa. Laserteho 2600 W ja jauheensyöttönopeus 11,8 g/min.

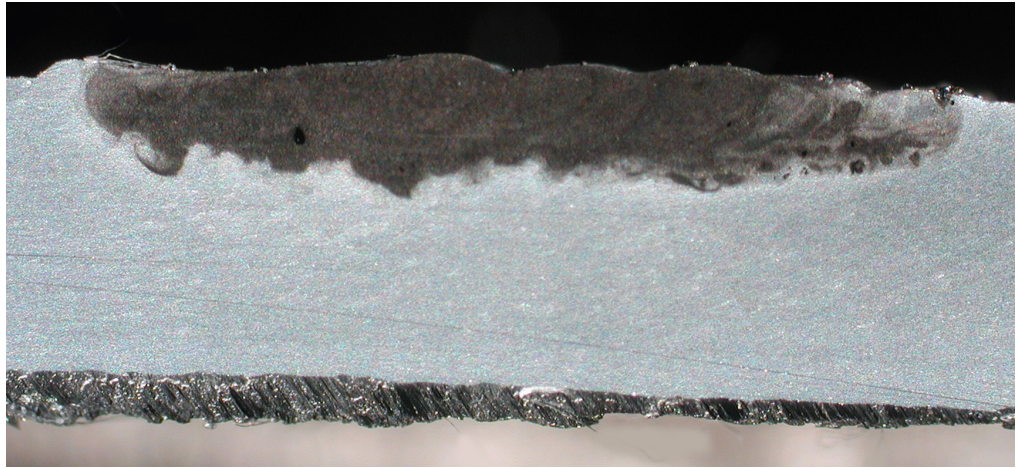
9.2 Makro- ja mikrorakenteen tarkastelu

9.2.1 Makrorakenne

Inconel 625-lisäaineella laserseostetun pinnan poikkileikkauksen tyypilliset makrorakenteet on esitetty kuvissa 39 (yksi palko) ja 40 (5 palkoa). Seostetun alueen poikkileikkauspinta on ennen syövytystä kirkas, mutta syövytys tummentaa pinnan.

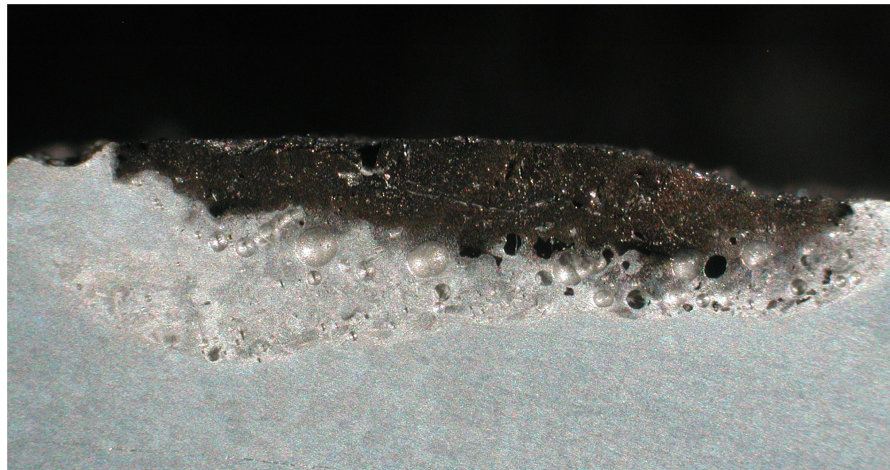


***Kuva 39. Makrohie yhdenpalon käsittelystä. Lisäaine Inconel 625. Teho 2200 W.
Jauheensyöttönopeus 11,8 g/min.***



Kuva 40. *Lisäaine Inconel 625, 5 palkoa. Teho 2000 W, jauheensyöttönopeus 11,8 g/min.*

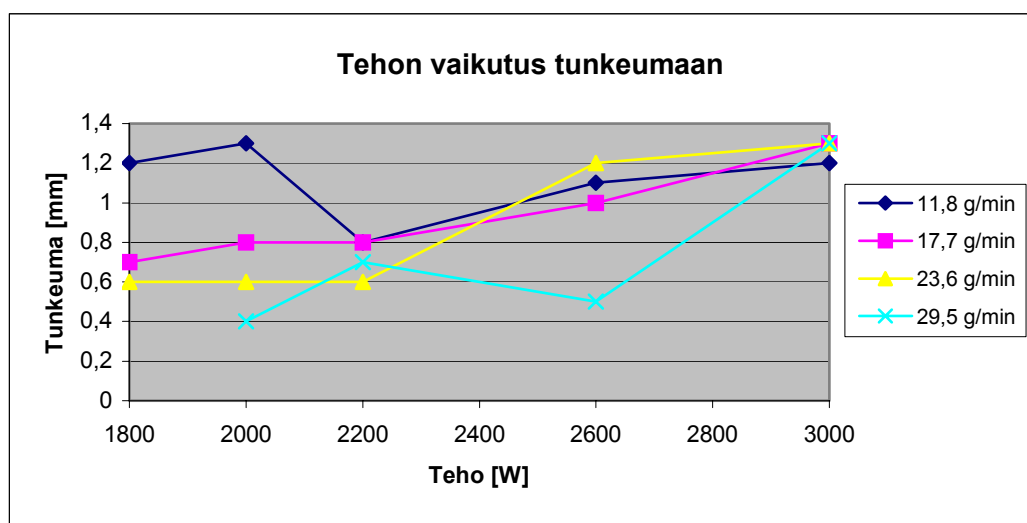
Koekappaleiden poikkileikkauksia tarkastellessa havaittiin lisäaineen Ni-SiC muodostavan runsaasti huokosia seostetun alueen ja perusaineen rajalle (kuva 41). Inconel 625-jauhe ei aiheuttanut vastaavaa huokoisuutta.



Kuva 41. *Ni-SiC-jauhe aiheutti huokoisuutta seostetun alueen ja perusaineen rajalle. 5 palkoa.*

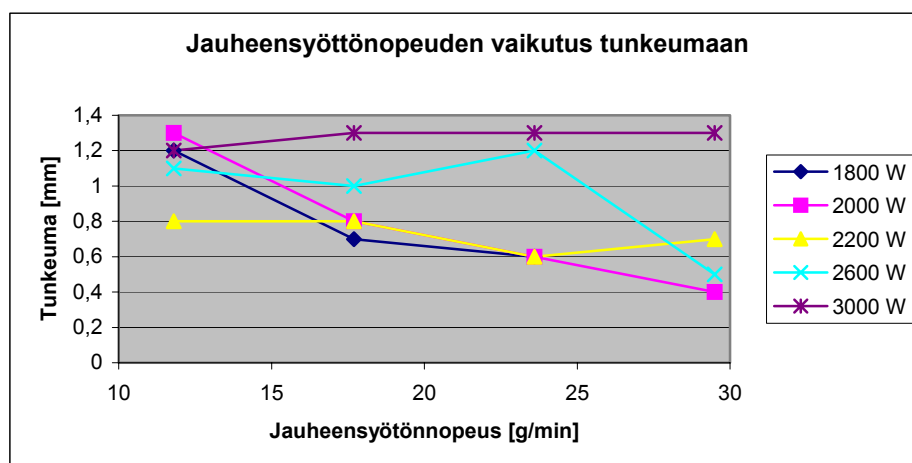
Työssä mitattiin myös poikkileikkausten dimensiot ja parametrien vaikutusta niihin tutkittiin. Seuraavat tulokset koskevat yhdenpalon kokeita Inconel 625-lisäaineella.

Lasertehon vaikutus tunkeumaan, eli seostuneen alueen syvyyteen palon keskellä kappaleen alkuperäisestä pinnasta mitattuna, on nähtävissä kuvasta 42. Vaikutus ei ole säännöllinen ja hajontaa on havaittavissa erityisesti pienemmillä tehoilla osittain suhteellisen suppeasta koesarjasta johtuen. Yhteenvedona voidaan todeta lasertehon lisäyksen kasvattavan tunkeumaa. Suurin tunkeuma joka saavuttiin käytetyillä parametreilla oli n. 1,3 mm.



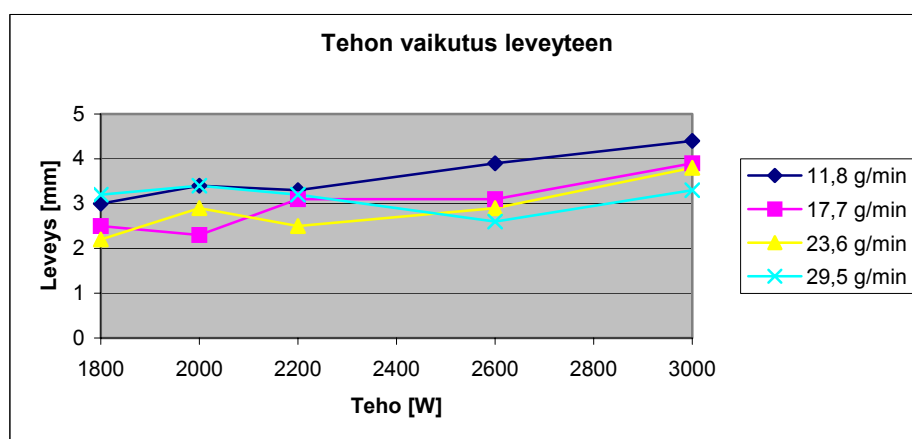
Kuva 42. Tehon vaikutus tunkeumaan. Inconel 625, yksipalkopintakäsittely.

Jauheensyöttönopeuden vaikutus tunkeumaan on nähtävissä kuvasta 43. Suurilla tehoilla jauheensyöttönopeus ei vaikuta tunkeumaan, koska teho riittää sulattamaan jauheen hyvin. Pienemmillä tehoilla ja suurilla jauheensyöttöarvoilla tunkeuma pienenee jauheensyöttönopeuden kasvaessa.



Kuva 43. Jauheensyöttönopeuden vaikutus tunkeumaan. Inconel 625, yksipalkopintakäsittely.

Lasertehon lisääminen kasvattaa seostuneen alueen leveyttä (kuva 44). Leveimmät mitatut palot olivat yli 4 mm leveitä, vaikka säteen halkaisija oli vain 2,2 mm. Alumiinin nopean lämmönjohtumisen ja alhaisen sulamispisteen takia kuitenkin lisäainetta seostui leveämmälle alueelle.

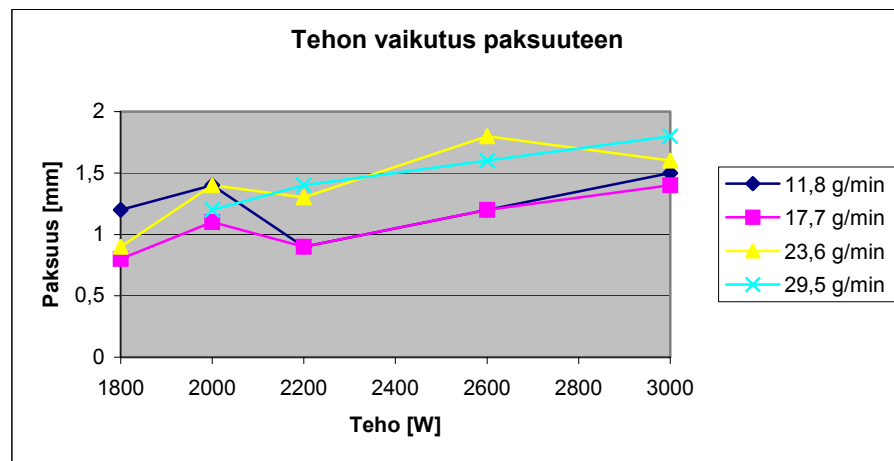


Kuva 44. Tehon vaikutus seostuneen alueen leveyteen. Inconel 625, yksipalkopintakäsittely.

Jauheensyöttönopeuden muutos vaikuttaa palon leveyteen käänteisesti eli suuremmilla jauheensyöttönopeuksilla tulee kapeampi palko ja pienillä leveämpi

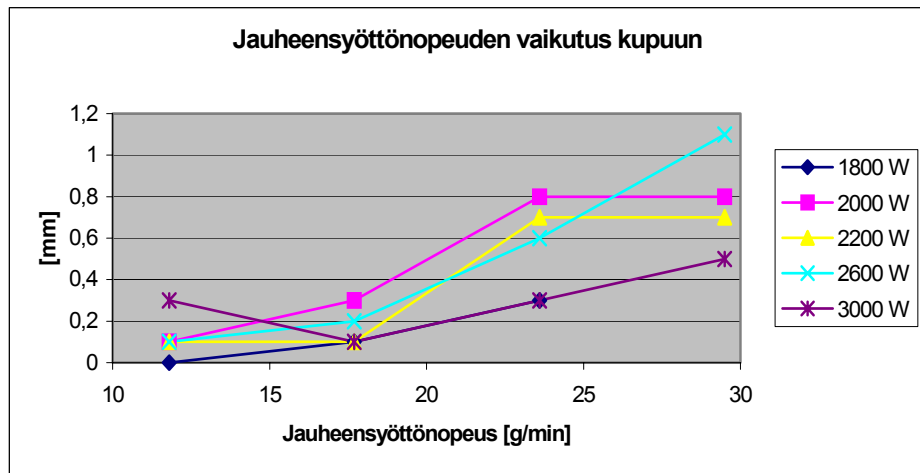
palko (kuva 44). Vaikutus ei kuitenkaan ole kovin suuri ja leveys on riippuvaisempi tehosta.

Jauheensyöttönopeus vaikuttaa seostuneen kerroksen kokonaispaksuuteen siten, että jauheensyöttönopeutta lisäämällä kerroksen paksuus kasvaa edellyttäen, että tehoa on riittävästi sulattamaan jauhe (kuva 45). Tehon ollessa liian alhainen myös kerrospaksuus pienenee, koska jauhe jää kappaleen pinnalle kasoiksi. Seostuneen alueen paksuudella on merkitystä, jos halutaan paksuja seosainekerroksia, joissa olisi enemmän ”kulumisvaraa”. Jauheensyöttönopeuden lisääminen kasvattaa myös kupua eli perusaineen pinnalla olevan seostuneen aineen korkeutta.



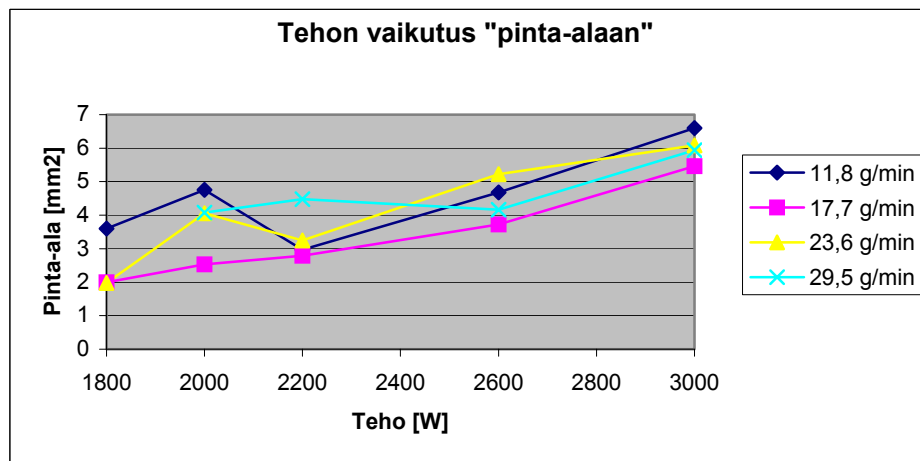
Kuva 45. Lasertehon vaikutus seostuneen alueen paksuuteen. Inconel 625, yksipalkopintakäsittely.

Tehon vaikutus kuvun korkeuteen ei ole suora. Suurella teholla ja suhteessa pienellä jauheensyöttönopeudella tunkeuma ja leveys kasvavat kuvun kustannuksella (kuva 46). Pienellä teholla ja suurella jauheensyötöllä ei jauhe sula. Voidaan todeta, että jauheensyöttönopeus sopivalla teholla vaikuttaa kuvun korkeuteen.



Kuva 46. Jauheensyöttönopeuden vaikutus kupuun. Inconel 625, yksipalkkopintakäsittely.

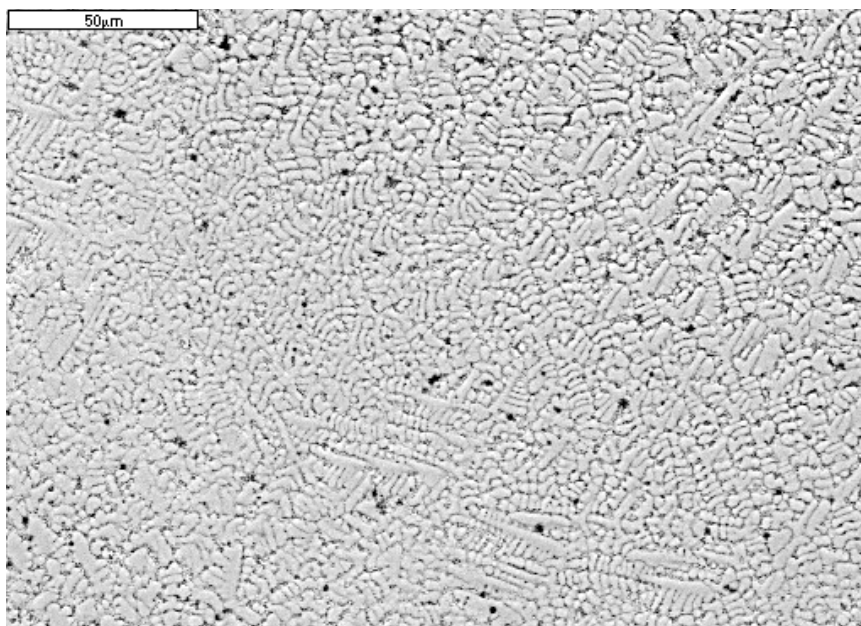
Tehon vaikutus seostuneen alueen alaan on nähtävissä kuvassa 47. Ala on laskettu kertomalla sen paksuus leveydellä eli se on suhteellinen. Tehon lisäys kasvattaa seostuneen alueen alaa.



Kuva 47. Lasertehon vaikutus suhteelliseen pinta-alaan. Inconel 625, yksipalkkopintakäsittely.

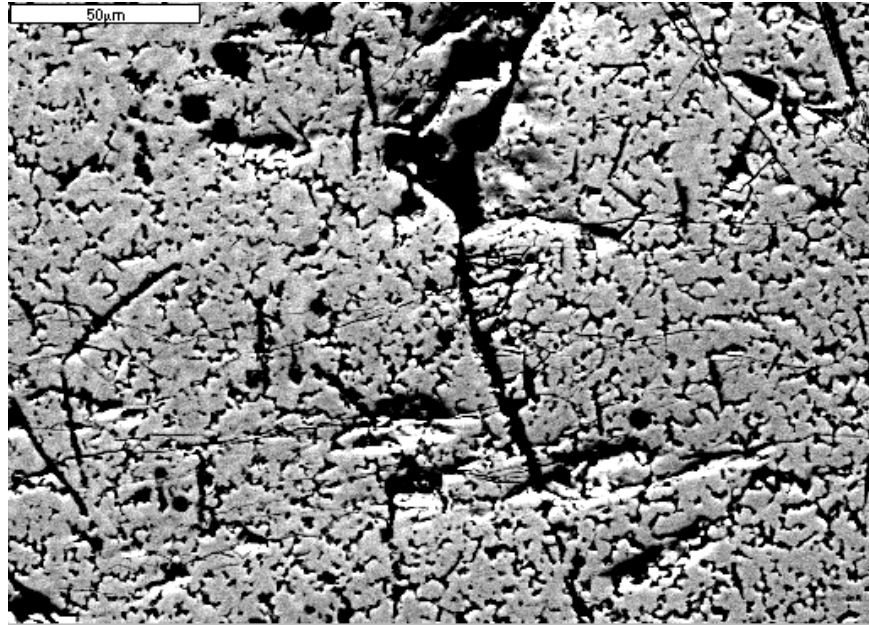
9.2.2 Mikrorakenne

Koekappaleiden mikrorakenteita ei tarkasteltu perusteellisesti. Inconel 625-lisäaineella seostetun pinnan mikrorakenne on erittäin hienorakenteista (kuva 48). Ni-SiC-jauheella seostetun pinnan rakenne on huokoisempaa ja epähomogeenisempaa (kuva 49).



Kuva 48. *Lisäainejauheella Inconel 625 laserseostetun pinnan mikrorakennetta.*

Suurennos 500x.



*Kuva 49. Lisäainejauheella Ni-SiC laserseostetun pinnan mikrorakennetta.
Suurennos 500x.*

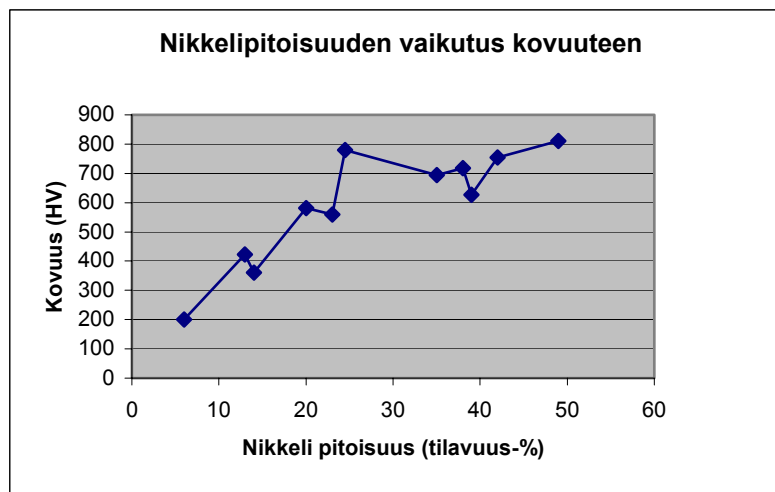
9.3 Kovuuskokeet

Laserseostamalla Inconel 625-jauhetta alumiinin pintaan saavutetaan suuria kovuuksia verrattuna perusaineen alkuperäisiin kovuuksiin. Korkeimmat yhdenpalon kokeissa mitatut kovuudet olivat yli 950 HV. Perusaineen kovuus on noin 50 HV. Kovuudet ovat myös melko tasaisesti jakaantuneet seosalueella.

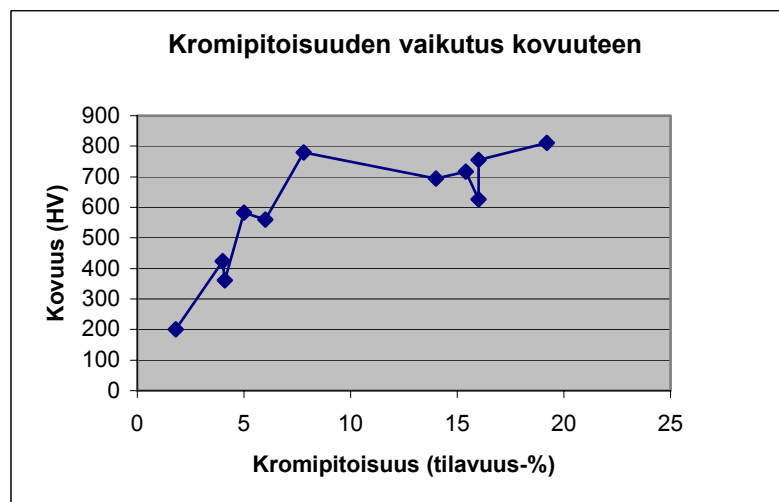
Lisäaineella Ni-SiC saavutettiin myös kovia rakenteita, mutta kovuudet olivat epätasaisemmin jakaantuneita. Kovuuksien epätasainen jakaantuminen johtui osittain huokosongelmasta ja ehkä osittain lisäainejauheen sisältämien karbidien epätasaisesta jakaantumisesta.

Kovuudet kasvoivat sitä enemmän mitä enemmän perusaineeseen saatiin seostumaan lisäainetta. Kovuuden kannalta merkittävin oli nikkelpitoisuus. Raja-arvona nikkelpitoisuudessa voidaan pitää 20 % (kuva 50). Tällä pitoisuudella saavutetaan suurempi kovuuden kasvu, jonka jälkeen kovuudet eivät enää merkittävästi nouse.

Sama arvo on myös mainittu teoriaosassa raja-arvona nikkelin laserseostuksessa. Tällöin seosteen rakenne koostuu alumiini-nikkeli-tasapainopiiirroksen mukaan suurimmaksi osaksi perusaineesta ja yhdisteestä Al_3Ni . 20 %:n nikkelpitoisuudella seostetun pinnan kromipitoisuus on noin 5 % (kuva 51). Inconel 625:llä seostetuilla kappaleilla 20 %:n nikkelpitoisuuden saavuttamiseksi jauheensyöttönopeus pitää olla n. 13 g/min.

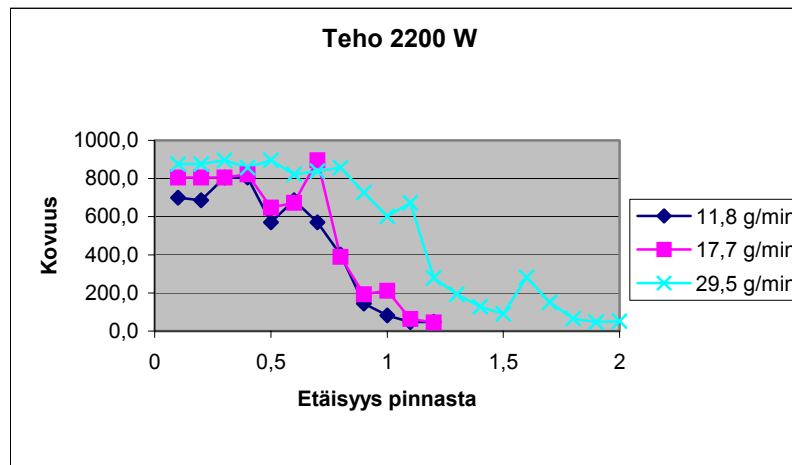


Kuva 50. Nikkelipitoisuuden vaikutus pinnan kovuuteen. Inconel 625, yksipalkopintakäsittely.



Kuva 51. Kromipitoisuus suhteessa pinnan kovuuteen. Inconel 625, yksipalkopintakäsittely.

Kovuusjakaumia eri jauheensyöttönopeuksilla samalla teholla on esitetty kuvassa 52. Kovuudet nousevat sitä enemmän, mitä enemmän lisäainetta saadaan pintaan seostumaan.



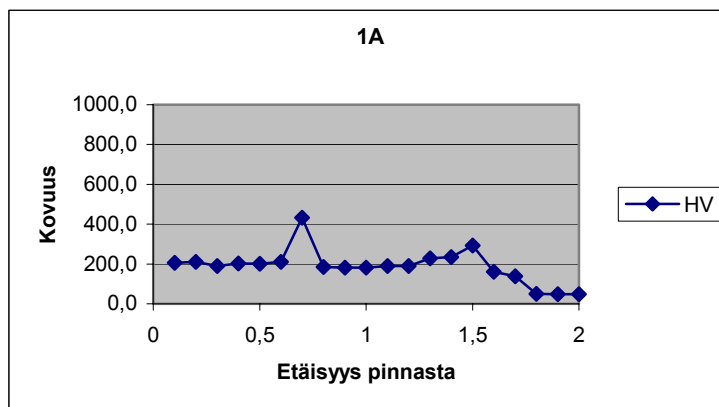
Kuva 52. Kovuusjakaumat eri jauheensyöttönopeuksilla. Teho 2200 W. Inconel 625, yksipalkopintakäsittely.

Kun jauheensyöttönopeus oli alle 11,8 g/min tai jauheensyötön kohdistus oli hieman ”pielessä”, lisäainetta ei seostunut riittävästi ja kovuudet jäivät alhaisiksi (taulukko 14 ja kuva 53). Nikkeliä on seostunut kyseiseen koekappaleeseen vain 5,6 % ja pinnan kovuus on keskimäärin n. 200 HV. Kovuudet ovat tästä huolimatta melko tasaisesti jakaantuneet. Tätä on edesauttanut suhteellisen suuri teho jauheensyöttönopeuteen verrattuna, jolloin diffuusio on ehtinyt tapahtua kunnolla.

Vertailua edellä mainittuun voi suorittaa koekappaleeseen, jonka aineanalyysi on taulukossa 15 ja kovuuskäyrä kuvassa 54. Tähän kappaleeseen nikkeliä on seostunut 24,5 %, ja tällöin kovuudetkin ovat moninkertaiset.

Taulukko 14. Seosainepitoisuudet seostetulla alueella. Inconel 625, yksipalkopintakäsittely. Näyte 1A.

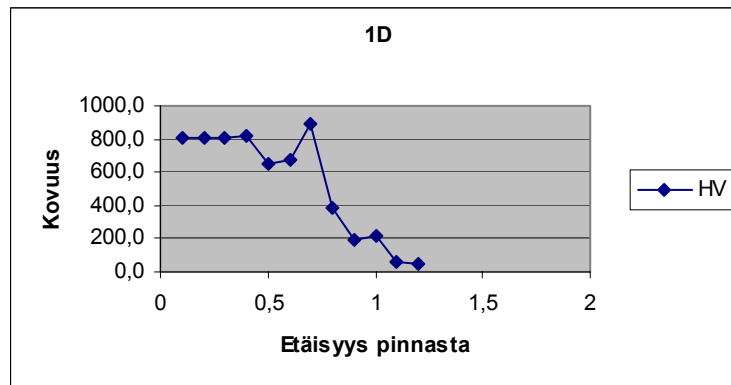
	Al	Ni	Cr	Mo	Fe
Til-%	91,8	5,6	2,0	0,4	0,2



Kuva 53. Kovuusprofiili. Inconel 625, yksipalkopintakäsittely. Näyte 1A, nikkelpitoisuus 5,6 %.

Taulukko 15. Seosainepitoisuudet seostetulla alueella. Inconel 625, yksipalkopintakäsittely. Näyte 1D.

	Al	Ni	Cr	Mo	Fe
Til-%	65,0	24,5	7,6	2,4	0,5

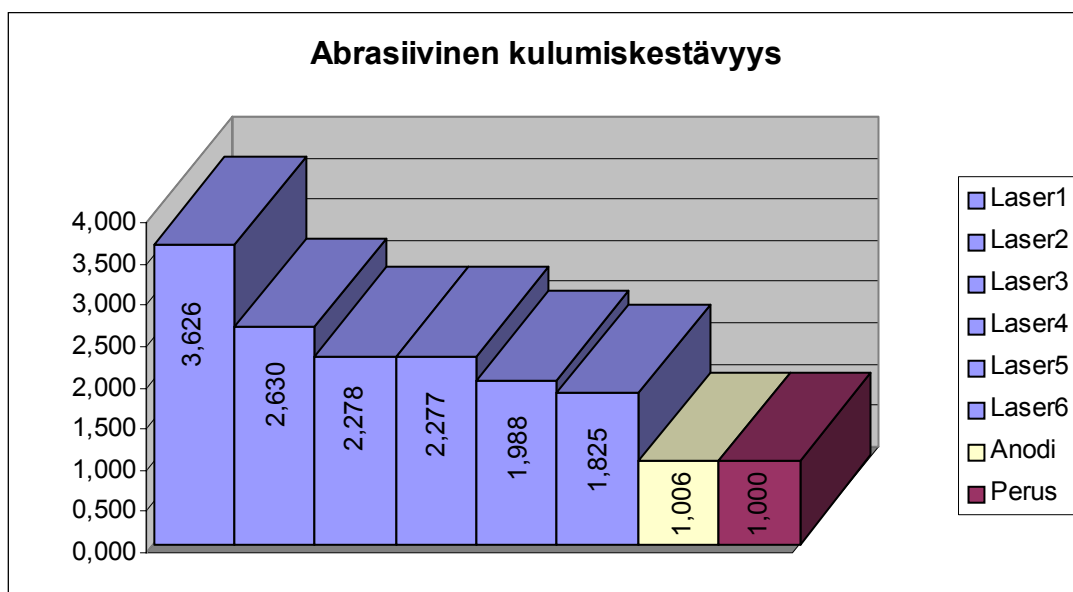


Kuva 54. Kovuusprofiili. Inconel 625, yksipalkopintakäsittely. Näyte 1D, nikkelpitoisuus 24,5 %.

9.4 Kulumiskokeet

Abrasiivista kulumiskestävyyttä tutkittiin kumipyöräkokeella. Koe osoittautui vaativaksi. Anodisoidut vertailukappaleet eivät kestäneet juurikaan paremmin kokeen rasituksia, kuin käsittelemättömät perusainekappaleet (kuva 55). Laserseostetut kappaleet kestivät korkeimmillaan 3,6 ja keskimäärin 2,3 kertaa paremmin kuin käsittelemättömät kappaleet. Kuvassa 55 olevat arvot ovat suhteellisia tilavuushäviöitä verrattuna käsittelemättömään perusaineeseen. Pylväikössä on esitetty kuuden hieman eri parametreilla laserseostetun koekappaleen tulokset, sekä keskiarvot käsittelemättömien ja anodisoitujen koekappaleiden tuloksista. Laserseostettujen kappaleiden halkeamilla ei näyttänyt olevan vaikutusta kulumiseen.

Tilavuushäviöt laserseostetuille kappaleille on laskettu painohäviöistä. Hävinneen materiaalin tiheys on arvioitu käytetyillä parametreilla saavutettavista seostumisasteista.



***Kuva 55.** Laserseostettuiden ja anodisoitujen koekappaleiden tilavuushäviöt suhteessa perusaineen tilavuushäviöön.*

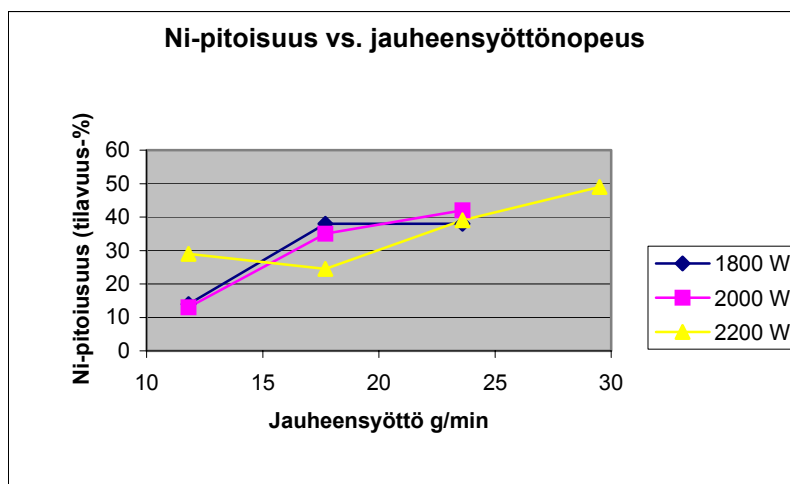
Käytetty kumipyöräkoee oli huomattavasti rankempi kuin sovelluskohteen kulumisolosuhteet. Tämä on pääteltävissä anodisoitujen koekappaleiden heikosta kestävydestä. Laserseostetut kappaleet kestäisivät sovelluskohteessa todennäköisesti huomattavasti käsittelemätöntä perusainetta ja anodisoitua pintaa paremmin.

9.5 Radiografinen tarkastelu

Radiografinen tarkastelu tehtiin Inconel 625-jauheella seostetuille koekappaleille. Radiografisessa tarkastelussa havaittiin halkeamia niissä kappaleissa, joissa oli käytetty korkeampia jauheensyöttönopeuksia. Lähes kaikki havaitut halkeamat olivat kuitenkin pintaan asti auki, joten ne voitiin havaita myös tarkassa silmämääräisessä tarkastelussa.

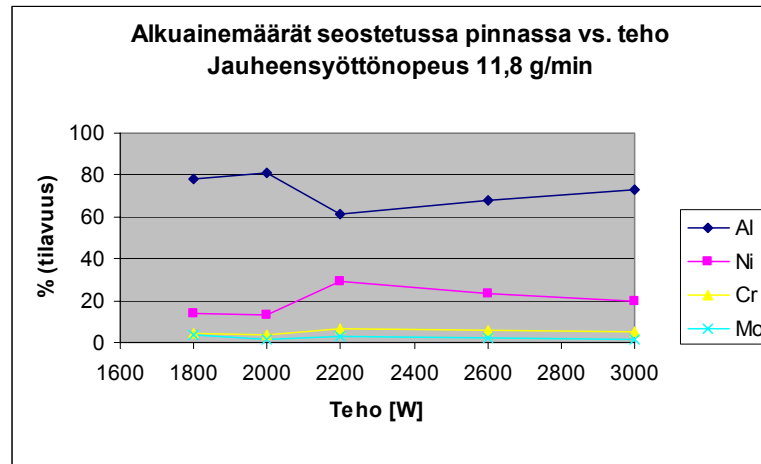
9.6 Alkuaineanalyysi

Alkuaineanalyysissä havaittiin jauheensyöttönopeuden lisäämisen lisäävän nikkelin määrää seostuneella alueella (kuva 56). Sama koskee myös muita seosaineita. Tämä edellyttää, että lasertehoa on riittävästi suhteessa jauheensyöttönopeuteen, jotta lisäaine seostuu pintaan.



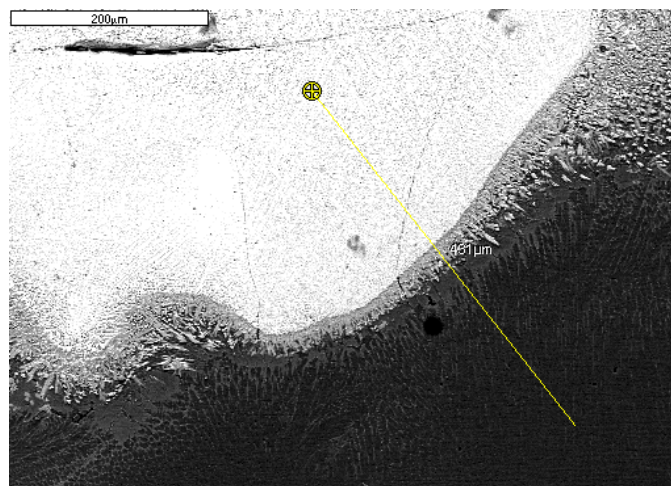
Kuva 56. Jauheensyöttönopeuden vaikutus nikkelpitoisuuteen. Inconel 625, yksipalkopintakäsittely.

Lisäaineen sulaessa tasaisesti teholla ei näyttänyt olevan suoranaista vaikutusta seostumisen määrään (kuva 57). Suuremmalla teholla seosaine leviää suuremmalle alueelle, kuten aikaisemmin on todettu (kuva 47), jolloin se suurilla tehoilla pienentää hieman seosainepitoisuuksia.

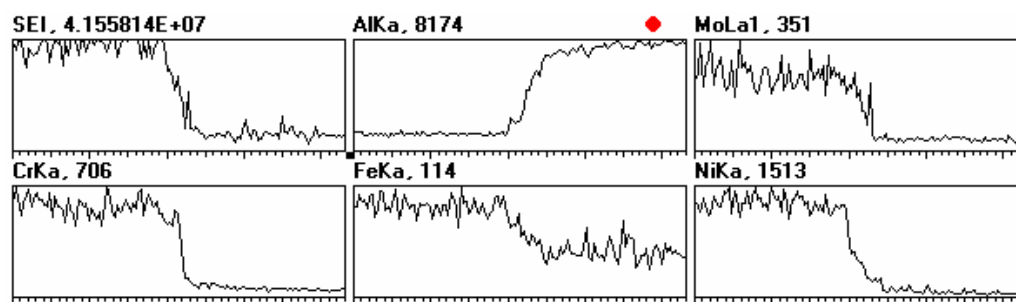


Kuva 57. Lasertehon vaikutus alkuainepitoisuuksiin. Inconel 625, yksipalkopintakäsittely.

Alkuaineanalyysissä tehdyssä viiva-analyysistä voidaan havaita, että perusaineen osuus pysyy melko tasaisena seostetulla alueella (kuva 59). Eri seosaineiden osuudet vaihtelevat hieman enemmän. Monipalkokokeissa ainepitoisuudet jakaantuvat tasaisemmin, kuin yksipalkokokeissa. Kuvissa 58 ja 59 on seosalueen ja perusaineen rajalta otettu viiva-analyysi ja taulukossa 16 on seosainepitoisuudet seostetulla alueella.



Kuva 58. Viiva-analyysi otettu seostuneen alueen ja perusaineen rajalta. Inconel 625, yksipalkopintakäsittely.



Kuva 59. Seosaineiden jakaantuminen viiva-analyysissä. Inconel 625, yksipalkopintakäsittely.

Taulukko 16. Seosainepitoisuudet kappaleessa seostetulla alueella. Inconel 625, yksipalkopintakäsittely.

	Al	Ni	Cr	Mo	Fe
Til-%	62,1	25,8	9,5	2,2	0,5

9.7 Parametrialue

Kokeet suoritettiin muuntelemalla lasertehoja ja jauheensyötön nopeutta. Muut parametrit pyrittiin pitämään vakioina. Näitä parametreja muuntelemalla haettiin parametrialueen ääriarvot. Arvostelukriteereinä käytettiin käsitellyn pinnan ulkonäköä, poikkileikkauksen muotoa, halkeamien ja huokosten määrää sekä kovuusjakaumaa.

9.7.1 Laserteho

Lasertehon alaraja kulki 1800 W:n kohdalla. Alle tämän tehon ei perusaineen pintaan seostunut eikä tarttunut lisäainetta. Tehon arvo vastaa käytetyillä säteen halkaisijalla ja kuljetusnopeudella 474 W/mm²:n tehosiheyttä ja 125 J/mm²:n ominaisenergiaa. Energiaa pituusyksikköä kohti kappaleelle yhdellä palolla tulee tällöin 2,16 kJ/cm.

Suurin laserteho yhden palon kokeissa oli laserin maksimiteho eli 3000 W. Tällä teholla ei vielä tapahtunut läpisulamista. Monipalkokokeissa suurin teho jolla

läpissulamista ei tapahtunut oli 2200 W. Lämpisulamista ehkäistiin hidastamalla hieman robotin liikenopecta sen palatessa aloituskohtaan palkojen välillä. Jauheensyöttönopeus vaikuttaa myös läpissulamiseen. Suuremmilla jauheensyöttönopeuksilla lasertehoa absorboituu vähemmän kappaleeseen, ja enemmän jauheeseen, jolloin lämmöntuonti pienenee ja sulaminen vähenee.

Lasertehon käyttö riippuu myös käytetystä jauheensyöttönopeudesta. Teho pitää olla riittävä käytettyyn jauheensyöttönopeuteen verrattuna. Tehon ollessa liian pieni lisäainejauhe jää kappaleen pintaan edellä mainitulla tavalla.

9.7.2 Jauheensyöttönopeus

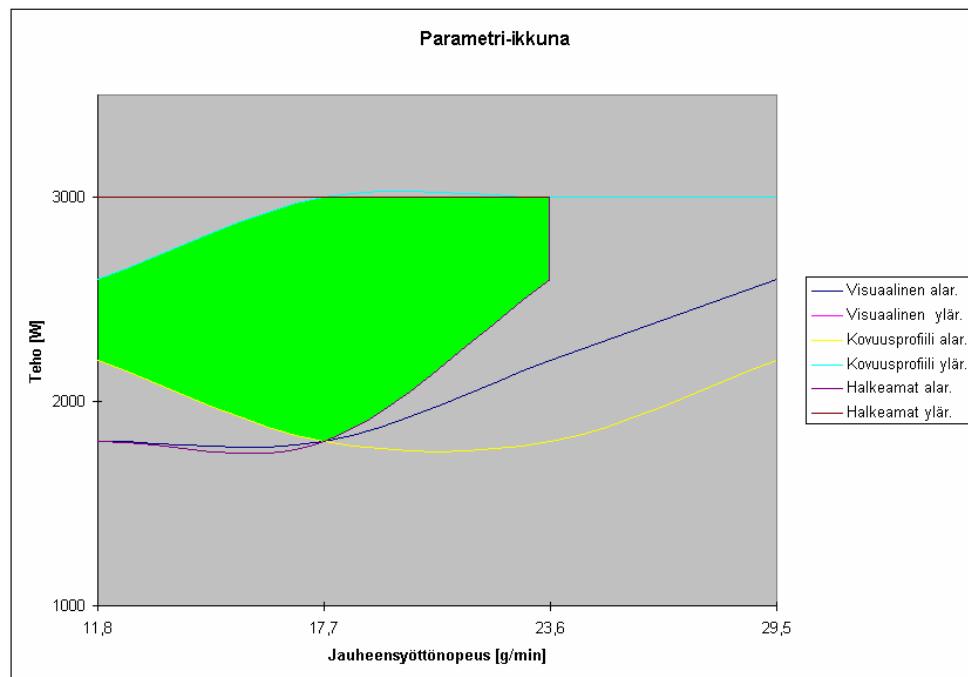
Jauheensyöttönopeutta vaihdeltiin välillä 11,8-35,4 g/min Inconel 625-lisäainejauheella. Suuremmilla jauheensyöttöarvoilla ongelmaksi muodostui taipumus halkeiluun, jos pinta saatiin tasaisesti seostumaan. Halkeilua muodostui herkemmin monipalkokäsittelyissä. Jauheensyöttönopeuden ollessa alle 11,8 g/min seostumisaste jäi niin pieneksi, että kovuudet olivat alhaiset.

Nikkeli-piikarbidi-jauheella pienillä jauheensyöttöarvoilla myöskään ei lisäainetta seostunut riittävästi ja kovuudet jäivät mataliksi tai epähomogeenisesti jakautuneiksi.

Jauheensyöttönopeuden arvoa ei voida päätellä suoraan suuttimesta tulevan jauheen määrästä, jota kokeissa mitattiin, koska kaikki jauhe ei päädy sulaan eikä edes sen alueelle. Suuttimen kohdistuksella on siis merkitystä miten paljon jauhetta kulkeutuu säteen vaikutusalueelle. Tämän vuoksi ilmoitetut jauheensyöttöarvot ovat osittain suhteellisia.

9.7.3 Parametri-ikkuna

Yksipalkokokeiden parametri-ikkuna on esitetty kuvassa 60. Parametri-ikkuna pätee vain kokeissa käytetyillä ainevahvuuksilla ja kappalesuuruuksilla. Mittojen vaihtuessa myös parametri-ikkuna muuttuu jonkin verran, koska lämmönjohtumisnopeus muuttuu.



Kuva 60. Yksipalkokokeiden parametri-ikkuna. Vakionopeudella 500 mm/min ja säteenhalkaisijalla 2,2 mm. Lisäaineella Inconel 625.

Monipalkokokeissa vastaavaa parametri-ikkunaa ei voida suoranaisesti muodostaa, koska siinä on enemmän parametreja. Monipalkokokeiden parametreihin vaikuttavat myös palkojen pituus ja käsiteltävän kappaleen koko.

Monipalkokokeissa parametri-ikkunan tulisi olla pienempi, koska suurilla jauheensyöttönopeuksilla syntyy helpommin halkeamia ja suurilla tehoilla läpikulamista. Monipalkokokeissa paras tulos saavutetaan valitsemalla jauheensyöttönopeudelle ja laserteholle arvot yhdenpalkokokeiden parametri-

ikkunan alaosasta. Tulee myös huomioida, että monipalkokokeissa kappaleen lämpäminen laajentaa hieman parametri-ikkunaa, koska laservalo absorboituu paremmin ja lisäainetta seostuu enemmän lämpötilan noustessa. Parhaan laatuinen pinta monipalkokokeissa saavutettiin laserteholla 1800-2000 W ja jauheensyöttönopeudella 11,8 g/min. Tällöin syntyy riittävän kova pinta ja kovuudet ovat tasaisesti jakautuneet. Halkeilua ei myöskään esiintynyt näillä arvoilla tutkituissa viidenpalon kokeissa. Palkojen limitykselle myös kokeiltiin eri arvoja. Parhaaksi osoittautui n. 14 %:n limitys.

10 Johtopäätökset

Alumiinin laserpinnanseostuksella, nikkelpohjaisilla lisäaineilla, suhteellisen pienillä seosainemäärillä saadaan aikaan merkittävää kovuuden ja kulumiskestävyyden kasvua. Alumiinin laserseostus vaatii korkean lasersäteen tehotiheyden johtuen perusaineen ominaisuuksista.

Eri seosaineyhdistelmävaihtoehtoja on lukemattomia. Diplomityön kokeissa käytetyllä kaupallisella Inconel 625-seosaineella saadaan aikaan hyvänlaatuista ja erittäin kovaa seospintaa. Ratkaisevinta kovuuden kannalta on seostetussa pinnassa nikkelpitoisuus. 20 %:n nikkelpitoisuuksilla saadaan kovuus kohoamaan yli 10-kertaiseksi verrattuna perusaineeseen. Yli 20 %:n nikkelpitoisuuksilla kovuus ei enää merkittävästi nouse. Sama tulos on esitetty teoriaosassa.

Abrasiivinen kulumiskestävyys saatiin parantumaan parhaimmillaan yli 3,5-kertaiseksi verrattuna käsittelemättömään perusaineeseen. Teoriaosassa on esitetty injektointitekniikalla saavutetun vieläkin korkeampia kulumiskestävyyksiä. Kulumiskokeissa ja niiden suorittamisessa on kuitenkin hyvinkin suuria eroja. Diplomityön tutkimuksissa käytetty kulumiskoe osoittautui melko rajuksi, mikä on pääteltävissä anodisoitujen vertailukappaleiden heikosta tuloksesta. Sovelluskohteessa laserkäsitelty pinta kestäisi todennäköisesti huomattavasti käsittelemätöntä paremmin.

Ainoaksi ongelmaksi jäi suuremmilla pinta-aloilla eli useampien palkojen käsittelyissä halkeilutaipumus. Halkeilun syntymisen syyt eivät täysin selvinneet. Viiden palon kokeissa vielä onnistuttiin välttämään halkeilu riittävän pienellä jauheensyöttönopeudella. Palkojen määrän kasvaessa halkeilua kuitenkin muodostui pienilläkin jauheensyöttöarvoilla. Syynä saattaa olla ohuen materiaalin muodonmuutokset, jotka kasvavat suurempien pinta-alojen käsittelyssä lisääntyneen

lämmöntuonnin takia. Myös perusaineen ja lisäaineen toisistaan suuresti poikkeavat ominaisuudet vaikuttavat halkeilutaipumukseen. Halkeilun syitä voitaisiin selvittää ja määrää vähentää lisätutkimuksia tekemällä.

Myös kokeissa käytetyllä Ni-SiC-lisäaineella saavutetaan kovia rakenteita. Tällä jauheella ongelmana oli huokoisuus sularajalla ja kovuuksien epähomogeeninen jakautuminen. Näihin syynä saattoi olla karbidin läsnäolo.

11 Jatkokehitys

Alumiinin pinnan laserseostusmenetelmä vaatii lisätutkimuksia varsinkin suurempien pinta-alojen käsittelyissä. Diplomityössä ongelmaksi jäi halkeilutaipumus. Ongelmaan saattaa löytyä useampia ratkaisuja, mutta ne vaativat runsaasti lisäkokeita.

Esilämmitystä on usein käytetty laserpintakäsittelyissä ehkäisemään halkeilua. Se saattaa olla tässäkin tapauksessa tutkimisen arvoinen vaihtoehto. Diplomityön sovelluskohteessa sen käyttö on hankalaa suurien kappalekokojen takia, muttei mahdotonta.

Uudelleen käsittelyä eli seostetun pinnan uudelleen sulatusta on myös käytetty pintaan jääneiden virheiden poistamiseksi. Tässä on ongelmana lisääntyvä kokonaislämmöntuonti, joka suurilla kappaleilla ja ohuilla materiaaleilla lisää muodonmuutoksia.

Helpoin ratkaisu on löytää sellainen lisäaine, jolla ei ole halkeilutaipumusta ja silti sillä saavutetaan tarpeellisen korkeat kovuus- ja kulumiskestävyysarvot. Eri lisäainemateriaali tai -seosvaihtoehtoja on lukemattomia. Esimerkiksi perusainemateriaalin lisääminen lisäaineeseen saattaa vähentää halkeilua.

Diplomityössä käytetyillä lisäaineilla varmasti päästään parempaan tulokseen suurien pinta-alojen käsittelyssä, kun kokeita tehdään vielä lisää ja parametreja hiotaan.

Prosessin aikana parametrien muunteleminen saattaa olla tarpeen, koska kappaleen lämpötila muuttuu käsittelyn edetessä. Tähän vaaditaan jonkinlainen automaattinen prosessin aikaiseen valvontaan ja parametrien muuttamiseen kykenevä laitteisto tai paljon esikokeita, jotta muunneltavat arvot voidaan määrätä etukäteen.

Eri menetelmien kokeileminen vaatii erilaisen pintakäsittelylaitteiston. Esimerkiksi kovien partikkelien injektointiin vaaditaan hieman eri tyyppinen pintakäsittelylaitteisto, jossa on mm. sykloni erottamassa kantokaasun ja lisäaineen toisistaan.

Koaksaalisen jauheensyötön (kuva 19) käyttäminen saattaa myös tuoda etuja. Sitä käytettäessä lisäaineen seostuminen voi olla paremmin hallittavissa.

Tutkimusta Inconel 625-lisäaineella seostamisesta voi syventää analysoimalla tarkemmin mikrorakennetta. Tarkemman mikrorakenneanalyysin avulla saadaan selville, mitä yhdisteitä seostettu pinta sisältää, ja mistä suuri kovuuden nousu johtuu. Selviää myös, mikä rakenne aiheuttaa halkeilun. Ilman analyysiä rakenne jää osittain arvioinnin varaan.

Inconel 625-lisäainetta saa myös lankana. Tämänkin käyttöä saattaa olla kannattavaa kokeilla. Lankana lisäainetta voi kokeilla lisäaineellisen laserhitsauksen tai hybridihitsauksen tapaan.

12 Yhteenveto

Alumiinin laserpinnanseostus nikkeli pohjaisilla seosaineilla on potentiaalinen vaihtoehto sen kovuuden ja kulumiskestävyyden parantamiseen. Diplomityön kokeissa saavutettiin paras tulos laserpinnanseostustekniikalla seosaineella Inconel 625.

Kovuudessa saavutettiin yli 10-kertainen paraneminen laserpinnanseostuksella verrattuna seostamattomaan perusaineeseen. Kovuudet olivat seostetussa pinnassa tasaisesti jakaantuneita. Kovuudet saavutettiin sekä yhden palon että monipalkokokeissa. Saavutetut kovuudet ovat huomattavasti korkeampia tavoitteisiin ja ennakko-odotuksiin nähden.

Abrasiivista kulumista simuloivissa kulumiskokeissa saavutettiin keskimäärin n. 2,5-kertainen kulumiskestävyys verrattuna sekä anodisoituihin koekappaleisiin että käsittelemättömiin kappaleisiin. Diplomityön kokeellisen osan tavoitteeksi oli asetettu paremman kulumiskestävyyden saavuttaminen kuin anodisoinnilla saavutetaan. Tämä tavoite saavutettiin.

Muita tavoitteita oli prosessin parametrien vaikutusten tunteminen. Myös tämä tavoite saavutettiin ja eri parametrien vaikutuksia pintakäsittelyn lopputulokseen saatiin selville. Toki tutkittavaa, selvitettävää ja avoimia kysymyksiä jäi vielä paljon jäljelle.

Erittäin kovista ja hauraista rakenteista johtuen ongelmaksi jäi suurempien pinta-alojen monipalkokokeissa halkeilutaipumus. Tätäkin ongelmaa voidaan varmasti ehkäistä erilaisin keinoin, mutta ratkaisu vaatii lisätutkimuksia.

Diplomityö oli haasteellinen ja mielenkiintoinen. Asetetut tavoitteet saavutettiin osittain jopa huomattavasti odotettua paremmin.

Diplomityössä tehty tutkimus toimii hyvänä pohjana jatkotutkimuksille, koska vastaavaa tutkimusta ei ollut ennen Suomessa tehty. Lisäkokeita tekemällä voidaan menetelmää kokeilla myös käytännön sovelluskohteissa.

LÄHDELUETTELO

1. Metso Paper Turku Works Oy. Esite
2. Verkkodokumentti: <http://www.lut.fi/kote/laser/>. Luettu 17.5.2003
3. Kivioja, S. et al. Tribologia – kitka, kuluminen ja voitelu. Helsinki. Otatieto. 1997. 351 s. ISBN 951-672-240-7
4. Koivisto, K. et al. Konetekniikan materiaalioppi. Helsinki. Edita Oyj. 2001. 336 s. ISBN 951-37-2912-5
5. Sundquist, H. Tribologian perusteet. Helsinki. Kuriiri Oy. 1986. 300 s. ISBN 951-671-377-7
6. Tekninen Tiedotus 1/86. Materiaalinvalinta – Kulumista kestävät materiaalit ja pinnoitteet. Helsinki. Metalliteollisuuden Kustannus Oy. 88 s. ISBN 951-817-288-9
7. Jokinen, T. Koneenosien kulumiskestävyyden parantaminen elektronisuihkupintakäsittelyillä. Diplomityö. LTKK. Lappeenranta. 1995. 101 s.
8. Zolotarevski, A. Laser-Arc Surface Treatment of Aluminium Alloys. Doctoral Thesis. Luleå University of Technology. Luleå. 1999. 113 s.
9. Raaka-ainekäsikirja. Osa 3. Kuparit, kevytmetallit. Tampere. 1985. Suomen Metalliteollisuuden Keskusliitto. 252 s. ISBN 951-95880-2-7
10. Valorinta, V. Koneenrakentajan metallioppi. Tampere. 1985. Kustannusyhtymä. 261 s. ISBN 951-9316-27-2
11. Raaka-aine käsikirja. Osa 5. Alumiinit. Tampere. 2002. Metalliteollisuuden Kustannus Oy. 235 s. ISBN 951-817-892-9
12. Staia, M. H. et al. Tungsten laser alloying of A356 Al alloy – tribological performance and characterisation. Surface Engineering. 2002. Vol. 18: 4. S. 270-276.
13. Verkkodokumentti: <http://www.purso.fi>. Luettu 13.4.2003
14. Lindroos, V. et al. Uudistettu Miekk-ojan metallioppi. Keuruu. Otava. 1986. 841 s. ISBN 951-666-216-1

15. Metals Handbook. Ninth Edition. Vol. 2. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals. USA. American Society for Metals. 1979. 855 s. ISBN 0-87170-008-5
16. Stachowiak, G. W. Engineering Tribology. Second Edition. USA. British Library Cataloguing. 2001. 744 s. ISBN 0-7506-7304-4
17. Tunturi, P. J. Pinnoitteiden ominaisuudet ja käyttö. Teoksessa: Tunturi, P. Metallien pinnoitteet ja pintakäsittely. Tampere. Metalliteollisuuden Kustannus Oy. 1999. S. 8-17. ISBN 951-817-696-5
18. Höglund, K. et al. Alumiinin anodisointi. Teoksessa: Tunturi, P. Metallien pinnoitteet ja pintakäsittely. Tampere. Metalliteollisuuden Kustannus Oy. 1999. S. 116-124. ISBN 951-817-696-5
19. Höglund, K. Alumiinin anodisointi. Teoksessa: Tunturi P. J. Korroosio käsikirja. Hanko. Suomen Korroosioyhdistys. 1988. S. 636-644. ISBN 951-99916-7-0
20. Verkkodokumentti: <http://www.bodycote.fi>. Luettu 10.4.2003
21. Verkkodokumentti:
<http://kerppu.hut.fi/opiskelu/materiaali/kurssimateriaali/mak85/mak85144/pintakas4-anodisointi.PDF>. Luettu 29.5.2003
22. Budinski, K. G. Surface engineering for wear resistance. New Jersey, USA. 420 s. ISBN 0-13-877937-6
23. Vuoristo, P. Terminen ruiskutus. Teoksessa: Tunturi, P. Metallien pinnoitteet ja pintakäsittely. Tampere. Metalliteollisuuden Kustannus Oy. 1999. S. 69-82. ISBN 951-817-696-5
24. Tenkula, J. Muut metalliset pinnoitteet. Teoksessa: Tunturi P. J. Korroosio käsikirja. Hanko. Suomen Korroosioyhdistys. 1988. S. 624-634. ISBN 951-99916-7-0
25. Metal powders for thermal surfacing. Esite. Höganäs AB. 16 s.
26. Deuis, R. et al. Metal-matrix composite coatings by pta surfacing. Composites science and technology. 1998. Vol 58. S. 299-309
27. Keränen, M. Jauheplasmalla hitsattujen korroosiota ja kulumista kestävien pinnoitteiden abrasiivinen kulumiskestävyys kumipyöräabraasiokulutuskokeessa. Hitsaustekniikka. 2002: 5. S. 20-22

28. Kinoshita, T. Alumiinin ja sen seosten käyttö termisesti ruiskutettavien pinnoitteiden alusmateriaalina. TTKK. Raportti 45/1992. 1992. 20 s.
29. Mäntylä, T. Kaasufaasipinnoitus (CVD ja PVD). Teoksessa: Tunturi, P. Metallien pinnoitteet ja pintakäsittely. Tampere. Metalliteollisuuden Kustannus Oy. 1999. S. 125-132. ISBN 951-817-696-5
30. Laitinen K. Diffuusiopinnoitus. Teoksessa: Tunturi, P. Metallien pinnoitteet ja pintakäsittely. Tampere. Metalliteollisuuden Kustannus Oy. 1999. S. 107-113. ISBN 951-817-696-5
31. Dahotre, N. B. Laser surface engineering. Advanced materials & processes. 2002. July
32. Tuominen et al. Microstructure and corrosion behavior of high power diode laser deposited Inconel 625 coatings. Journal of laser applications. 2003. Vol 15: 1. S. 55-61
33. Kauppila, J. Laseripinnoitus. Teoksessa: Tunturi, P. Metallien pinnoitteet ja pintakäsittely. Tampere. Metalliteollisuuden Kustannus Oy. 1999. S. 143-144. ISBN 951-817-696-5
34. Vreeling J.A. et al. Laser melt injection in aluminum alloys: on the role of the oxide skin. Acta Materialia. 2000. Vol 48. S. 4225-4233
35. Kujanpää, V. & Salminen A. Suuritehoisen Nd:YAG-laserin käyttö konepajateollisuudessa. Helsinki. 1998. Metalliteollisuuden Kustannus Oy. Tekninen tiedote 5/ 98. 53 s. ISBN 951-817-686-8
36. Toikkanen, H. Kulutus- ja korroosiokestävien materiaalien laserpinnoitus. Diplomityö. LTKK. Lappeenranta. 2000. 98 s.
37. Verkkodokumentti: <http://www.rofin.com>. Luettu 3.3.2003
38. Salminen, A. & Kujanpää V. CO₂-laserhitsaus konepajateollisuudessa. Helsinki. 1997. Metalliteollisuuden Kustannus Oy. Tekninen tiedote 7/97. 66 s. ISBN 951-817-67
39. Salminen, A & Jansson, A. Diodilaserin käyttösovellukset konepajateollisuudessa. Hitsaustekniikka. 2001. Vol. 51: 2. S. 48-51. ISSN 0437-6056
40. Verkkodokumentti: <http://www.laserline.de>. Luettu 4.3.2003
41. Steen, W. M. Laser Material Processing. 1991. 266 s. UK. Springer-Verlag London Limited. 266 s. ISBN 0-387-19670-6

42. Kujanpää, V. & Salminen A. Absorption phenomena in laser welding. Lappeenranta. 2003. Welding Conference LUT Join 2003
43. Hügel, H. et al. Basic coupling mechanism in laser surface treatment. Teoksessa: Mazumder, J et al. (toim.) Laser Processing: Surface treatment and film deposition. Alankomaat. Kluwer Academic Publisher. 1996. S. 21-46. ISBN 0-7923-3901-0
44. Gedda, H. et al. A Process Efficiency Comparison of Nd:YAG and CO₂ Laser Cladding. Welding in the World. 2002. July. S. 75-86
45. Gedda, H. et al. Energy redistribution during CO₂ laser cladding. Journal of laser applications. 2002. Vol. 14: 2. S. 78-82
46. Steen, W. M. Laser Cladding, Alloying And Melting. Teoksessa: Belforte D. (toim.). The industrial laser annual handbook. 1986. USA. S.158-184. ISSN 0886-0106
47. Schneider, M. Laser cladding with powder. Doctoral Thesis. 1998. University of Twente. Alankomaat. 177 s.
48. Powell, J. et al. Laser surface treatment, Mechanisms & techniques. The Fabricator. 1994. Vol 24: 5. S. 24-27. ISSN 0888-0301
49. Yellup, J. M. Laser cladding using the powder blowing technique. Surface and Coatings Technology. 1995. Vol. 71. S.121-128.
50. Man, H.C. Cavitation and corrosion behaviour of laser surface alloyed MMC of SiC and Si₃N₄ on Al alloy AA6061. Surface and coatings technology. 2000. Vol. 132. S. 11-20
51. Wong T.T. Wear resistance of laser-clad Ni-Cr-B-Si alloy on aluminium alloy. Journal of Materials Processing Technology. 2000. Vol. 100. S. 142-146
52. Gasser, A et al. Dispersion of hard particles in light alloys with CO₂ laser radiation. 1990. ECLAT 90
53. Sallamand, P. Laser cladding on aluminium-base alloys: microstructural features. Materials Science and Engineering A. 1993. Vol 171. S. 263-270
54. Sexton, C. L. et al. Alloy development by laser cladding: An overview. Journal of laser applications. 2001. Vol. 13: 1. S. 2-11.

55. Fellowes, F. et al Laser surface treatment. Teoksessa: Rickerby D.S. (toim.) Advanced Surface Coatings: a Handbook of Surface Engineering. New York, USA, 1991. S. 244-277. ISBN 0-216-92899-0.
56. Pei, Y.T. et al. Functionally graded materials produced by laser cladding. Acta materialia. 2000. Vol 48. S. 2617-2624
57. Kreutz, E et al. Surface remelting and alloying of Al-based alloys with CO₂-laser radiation. LAMP 92.
58. Mordike, S. Laser Surface Melting of Al-Alloys. 6th international conference on power laser applications. 1990. S. 99-108.
59. Watkins K. G. et al. Microstructure and corrosion properties of laser surface processed aluminium alloys: a review. Materials Science and Engineering A. 1997. Vol. 231. S. 55-61.
60. Verkkodokumentti: <http://web.met.kth.se/dct/pd/element/Al-Ni.html>. Luettu 16.6.2003
61. Hasan, R. & Arnesen T. Laser surface treatment of aluminium. Senter for Industriforkning. Norja
62. Leinenbach, C. et al. Nd:YAG- Laser Surface Treatment Improves Surface Properties of Cast AlSi10 Alloy. 1999. Proceeding of Nolamp 7th. S. 516-525.
63. Almeida, A, et al. Laser alloying of aluminium with chromium. Surface and coatings technology,. 1995. Vol. 70. S. 221-229.
64. Almeida, A. et al. Structure and properties of Al-Nb Alloys produced by laser surface alloying. Materials Science and Engineering A. 2001. Vol. 303. S. 273-280.
65. Laser alloying of AlSi9Cu3 with Silicon. Fraunhofer Institut Lasertechnik.
66. Chong, P. et al. Microstructure and wear properties of laser surface-cladded Mo-WC MMC on AA6061 aluminium alloy. Surface and coatings technology. 2001. Vol. 145. S. 51-59.
67. Chong, P. et al. Laser fabrication of Mo-TiC MMC on AA6061 aluminum alloy surface. Surface and coatings technology. 2002. Vol. 154 S. 268-275.
68. Kaunisto, P. Metalliseos- ja komposiittipinnoitteet. Teoksessa: Tunturi P. J. (toim.) Korroosio käsikirja. Hanko. Suomen Korroosioyhdistys. 1988. S. 616-620. ISBN 951-99916-7-0

69. Flinkfeldt, J. Surface impregnation by particle injection – laser impregnation., Optics and laser technology. 1988. Vol 20: 1. S. 33-35
70. Kloosterman, A. et al. Electron microscopy of reaction layers between SiC and Ti-6Al-4V after laser embedding. Acta materialia. 1998. Vol. 46: 17. S. 6205-6217.
71. Kadolkar, P. et al. Variation of structure with input energy during laser surface engineering of ceramic coatings on aluminum alloys, Applied surface science. 2002. Vol 199. S. 222-233
72. Hu, C. et al. Laser processing of an aluminium AA6061 alloy involving injection of SiC particulate. Journal of materials science. 1995. Vol 30. S. 5985-5990
73. Staia M.H.. et al. Wear resistance of a laser alloyed A-256 aluminum/ WC composite. Wear. 2001. Vol 251. S. 1459-1468
74. Missori, S. & Varani V. Laser Surface Alloying of Structural Aluminium-Based Material. MAT-TEC 91. IITT-International. S. 241-248. ISBN 2-907669-19-2
75. Dearnley, P. A. The sliding wear resistance and frictional characteristics of surface modified aluminium alloys under extreme pressure. Wear. 1999. Vol 225-229. S. 127-134
76. Amende, W. Laserpintakäsittely. Teoksessa Anderson, H et al. Lasertyöstö. Keuruu. Keuruun aikuiskoulutusosasto. 1996. S. 3.4.2-2. ISBN 952-90-7692-4
77. Chong, P. H. & Man, H. C. Laser wire cladding of aluminum alloy. Laser Materials Processing Conference: Proceedings on the Conference ICALEO'99. San Diego, USA. 1999. Vol 87. Laser Institute of America. Section F, s. 207-215. ISBN 0-912035-60-9
78. Hyppölä, T. Alumiinien lasertyöstöt. Loppuraportti. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. 1996.
79. Peyre, P. et al. Laser shock processing of aluminium alloys. Application to high cycle fatigue behaviour. Materials Science and engineering A. 1996. Vol 210. S. 102-113
80. McCay, M. Plasma Assisted Laser Surface Alloying. Journal of laser applications. 2003. Vol 15. S. 84-88. ISSN: 1042-346X

81. Verkkodokumentti: Kovuuksien muunnos taulukko:
<http://www.tribologie.nl/SOFTWARE/CONVERT/hardness.htm>.
82. Nykänen, O. Toimivaa tekstiä. Helsinki. Tekniikan Akateemisten Liitto.
2002. 212 s. ISBN 952-5005-64-X