

LUT-yliopisto

LUT School of Energy Systems

LUT Kone

BK10A0402 Kandidaatintyö

KUPARIN LASERMERKKAUS

MARKING COPPER WITH LASER

Lappeenrannassa 11.5.2021

Eerik Hakamäki

Tarkastaja Ilkka Poutiainen

Ohjaaja Ilkka Poutiainen

TIIVISTELMÄ

LUT-yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Eerik Hakamäki

Kuparin lasermerkkaus

Kandidaatintyö

2021

19 sivua, 8 kuvaa ja 2 taulukkoa

Tarkastaja: Ilkka Poutiainen

Ohjaaja: Ilkka Poutiainen

Hakusanat: kupari, laser, merkkaus

Teollisuudessa tarvitaan kehittyneitä merkintätapoja tuotteiden aitouden ja jäljittämisen varmistamiseksi. Kappaleiden seurantaan ja tunnistamiseen käytetään yleensä erilaisia QR- ja viivakoodeja, joita voidaan merkata esimerkiksi laserilla suoraan kappaleeseen. Merkkauslasereita on saatavilla laaja kirjo erilaisille materiaaleille sekä erilaisiin tarkoituksiin. Tässä työssä tutustutaan lasermerkkaukseen tekniikkana ja keskitytään erityisesti kuparin merkkaamisen erityispiirteisiin. Kuparia käytetään paljon erilaisissa sähkökomponenteissa, joissa on erityinen tarve seurata ja tunnistaa oikea tuote. Kuparin ominaisuuksia ovat korkea heijastavuus sekä hyvä lämmön- ja sähkönjohtokyky, mitkä vaikuttavat merkittävästi sen merkattavuuteen.

ABSTRACT

LUT University
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Eerik Hakamäki

Marking copper with laser

Bachelor's thesis

2021

19 pages, 8 figures and 2 tables

Examiner: Ilkka Poutiainen

Supervisor: Ilkka Poutiainen

Keywords: copper, laser, marking

Industries need more advanced marking methods to ensure the authenticity and traceability of products. Parts are traced and identified usually with QR codes and barcodes, which can be marked, for example, with a laser directly on the part. There is a wide range of marking lasers for different materials as well as for different purposes. This thesis introduces laser marking as a technique and focuses in particular on the specific features of copper marking. Copper is used in many different electrical components where there is a special need to track and identify the right product. The properties of copper are high reflectivity and good thermal and electrical conductivity, which significantly affect its ability to be marked.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	1
ABSTRACT.....	2
SISÄLLYSLUETTELO	4
1 JOHDANTO.....	5
2 MIKSI LASERMERKKAUS	7
3 LASERLAITTEET.....	9
4 MERKKAUSPROSESSIT	14
4.1 Päästövärjäys	14
4.2 Laser-etsaus	15
4.3 Kaiverrus.....	16
4.4 Värimerkkaus.....	18
5 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET.....	21
LÄHTEET	22

1 JOHDANTO

Lasertyöstö on jatkuvasti kehittyvä tekniikka, jota voidaan hyödyntää eri tieteenoilla kuten auto-, lääke- tai pakkausteollisuudessa. Sen käyttö yleistyy jatkuvasti ja markkinoiden arvioidaan kasvavan kolmeen miljardiin Yhdysvaltain dollariin vuoteen 2024 mennessä. (Markets and markets 2019) Lasertyöstön etuja ovat sen nopeus, kosketukseton työstö ja mukautuvuus. Lasermerkkaus on noussut yleiseksi tavaksi merkitä tuotteita, sillä laserilla on helppo merkata QR-koodeja, viivakoodeja ja muita tunnistetietoja sekä logoja tuotteisiin.

Laser on lyhenne, ja se tulee sanoista *Light amplification by stimulated emission of radiation* (Dixit, Joshi & Davim 2019), suomeksi vapaasti käännettynä *Valon vahvistaminen stimuloitulla säteilyemissiolla*. Laserin ominaisuuksiin kuuluu se, että siinä esiintyy yhtä aallonpituutta, se on yhdensuuntaista ja saman vaiheista. Tämän takia lasersäde voidaan fokusoida erittäin pieneen pisteeseen, jolloin saavutetaan erittäin korkeita tehotiheyksiä. Korkean tehotiheyden ansiosta laser soveltuu hyvin erilaisten materiaalien työstöön. Lasersäteen tuottava resonattori tarvitsee kolme komponenttia: laseroiva väliaine, kaksi peiliä, joista ainakin toinen on puoliläpäisevä sekä pumppausenergiaa. Pumppausenergia voidaan toteuttaa sähköllä, valolla tai laserdiodeilla. Pumppausenergia nostaa laserväliaineen atomien elektronit korkeammalle energiatasolle. Koska tila ei ole stabiili, elektronit palautuvat takasin alemmalle energiatasolle. Elektronin palautuessa vapautuu energiaa fotonin muodossa. Fotonin törmätessä muihin virittyneisiin atomeihin syntyy ketjureaktio, jossa atomit vapauttavat saman suuntaista ja samassa vaiheessa olevaa valoa.

Työn tavoitteena on perehtyä tuoreimpiin julkaisuihin lasermerkkauksesta ja koostaa opittu asia yhdeksi tutkielmaksi. Julkaisuissa keskitytään kuparin lasermerkkaukseen, sillä kupari on korkean heijastavuuden materiaali, mikä tekee siitä erikoisemman tutkimuskohteen. Aihe on pyritty rajaamaan kuparin lasermerkkaukseen, sen menetelmiin, laitteisiin sekä mahdollisiin käyttökohteisiin. Aiheelle asetetut tutkimuskysymykset ovat:

- Miten lasermerkkaus toimii?
- Mitä lasermerkkausprosessia kannattaa käyttää kuparille?
- Mitä laitteita voidaan käyttää kuparin merkkaukseen?

Työ suoritettiin kirjallisuuskatsauksena. Tietoa haettiin yleisesti lasertyöstöstä sekä merkkauksesta, ja lähdemateriaaleista valittiin käyttöön olennaisimmat julkaisut kuparin merkkauksesta. Julkaisuja haettiin erilaisista tietokannoista ja hakusanoina käytettiin esimerkiksi laser, engraving, etching, marking, copper, fiber, optical, properties, treatment. Akateemisten lähteiden lisäksi työssä hyödynnettiin kaupallisia lähteitä esimerkkeinä erilaisista lasertyöstöasemista.

2 MIKSI LASERMERKKAUS

Lähes kaikissa tuotteissa on jonkinlainen tunniste. Yksinkertaisimmissa osissa riittää yleensä malli- tai osanumero, mutta monimutkaisempiin tuotteisiin merkitään usein valmistuserä, päivämäärä tai sarjanumero. Yksilöllisen merkkauksen tekemisessä laser on erittäin tehokas menetelmä sen joustavuuden ansiosta. Tuotteita on tärkeä pystyä jäljittämään, joten niiden tunnistamisesta onkin tulossa kriittinen osa valmistusprosessia. Merkittäviä tunnistetietoja ovat esimerkiksi tuotteen sarjanumero ja valmistuspäivä, jotka voidaan merkitä viiva- tai QR-koodilla helpottamaan tiedon lukemista koneellisesti. Myös yrityksen logoja ja muita esteettisiä merkintöjä voidaan tehdä. (Laserax 2020; Naumova et al. 2018; Odintsova et al. 2019)

Eräs vaihtoehto tuotteen merkinnälle on suora lasermerkintä sen monien hyötyjen vuoksi. Laserit ovatkin nostaneet suosiotaan, sillä ne ovat yksi käytetyimmistä direct part marking, eli DPM-menetelmistä: jopa 48 prosenttia merkkauksista tehdään laserilla. (Laserax 2020; Naumova et al. 2018; Odintsova et al. 2019) DPM-menetelmät voivat tuoda merkittäviä säästöjä yrityksille pienentyneinä virheinä kirjanpidossa ja parempana varaston hallintana (Albright 2004). Lisäksi tuotteiden jäljitettävyyys paranee esimerkiksi takuuasioissa, reklamaatioissa sekä takaisinvetojen yhteydessä.

DPM-merkintöjä voidaan tehdä myös esimerkiksi painamalla musteella, sideaineilla, erilaisilla päällysteillä tai hapetuksella (Ahearne 2020; Antonczak et al. 2013). Lasermerkkaus on menetelmänä monia vaihtoehtoja ympäristöystävällisempi, sillä lasermerkkauksessa ei tarvita lisäaineita eikä myrkyllisiä liuoksia. Lasermerkkaus suojaa tuotteita väärentämiseltä, sillä lasermerkkaus on yksi luotettavimmista ja siten parhaimmista tavoista todistaa tuotteen aitous. (Laserax 2020; Naumova et al. 2018; Odintsova et al. 2019)

Koska kupari reagoi suhteellisen heikosti kemikaalien kanssa, on lasermerkintä varteenotettava tekniikka DPM-merkinnän suhteen. Mekaanisilta ja fysikaalisilta ominaisuuksiltaan kupari on sopiva erilaisiin käyttökohteisiin, joten sitä käytetään laajasti eri teollisuuden aloilla. (Copperalliance 2018; Naboka & Giordano 2011)

Metallien lasermerkinnässä on tärkeä huomioida materiaalin kyky absorboida käytettävän laserin aallonpituutta. Absorptio tarkoittaa kerrointa, joka kertoo kuinka iso osa siihen kohdistetusta tehosta siirtyy materiaaliin. Suurin osa kupariin osuvasta valosta heijastuu sen rajapinnalta, mutta osa valosta kuitenkin absorboituu. (Laserax 2020) Suuren heijastavuuden takia esimerkiksi CO₂-laser ei sovellu kiiltävien metallien merkkaukseen (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005, 299). Absorptio paranee hieman materiaalin lämmitessä (Kujanpää et al. 2005, 44), kuitenkin kuparin tapauksessa tämän merkitys on pienempi, koska kupari johtaa lämpöä erittäin hyvin.

3 LASERLAITTEET

Käytössä olevia työstölaseireita ovat esimerkiksi kuitu-, CO₂-, Nd:YAG-, diodi- ja kiekkolaser. Lasersäde voi olla jatkuvatehoista tai pulssitettua, mutta merkkaukssovelluksissa käytetään yleensä pulssitettua laseria. (Kujanpää et al. 2005, 39-68)

Yksi tapa lasermerkata on käyttää kuitulaseria, jonka markkinaosuus oli suurin 2018 vuoden lasermarkkinoista (Markets and markets 2019). Kuitulaserlaitteet ovat kompakteja, mutta mikä tärkeintä, sädettä voidaan siirtää kuitujen avulla (Naumova et al. 2018). Kuitulaserissa lasersäde syntyy suoraan aktiivikuidun sisään. Syntyneen säteen halkaisija on pieni ja laatu on suhteellisen hyvä. Merkkauksprosesseissa kuitulaser on yleinen. (Kujanpää et al. 2005, 68) Kuitulaserin säteenlaatua rajoittaa optinen kuitu. Yleensä kuitulaserien aallonpituus on 1030-1100 nanometriä.

CO₂-laser on myös yleinen merkkauksessa, koska sitä voidaan käyttää läpinäkyville materiaaleille kuten lasille ja akryylille, ja sen säteenlaatu on hyvä. CO₂-laser soveltuu kuitenkin heikosti metallien merkkaukseen, sillä sen 10 600 nanometrin aallonpituus absorboituu huonosti kiiltäville metallipinoille. Maalattuja ja anodisoituja metalleja kuitenkin merkataan myös CO₂-lasereilla. Myös metallien merkkausta voidaan tehdä lisäaineilla ja pinnoitteilla, mutta se ei yleensä ole kannattavaa. (Kujanpää et al. 2005, 54-58, 211)

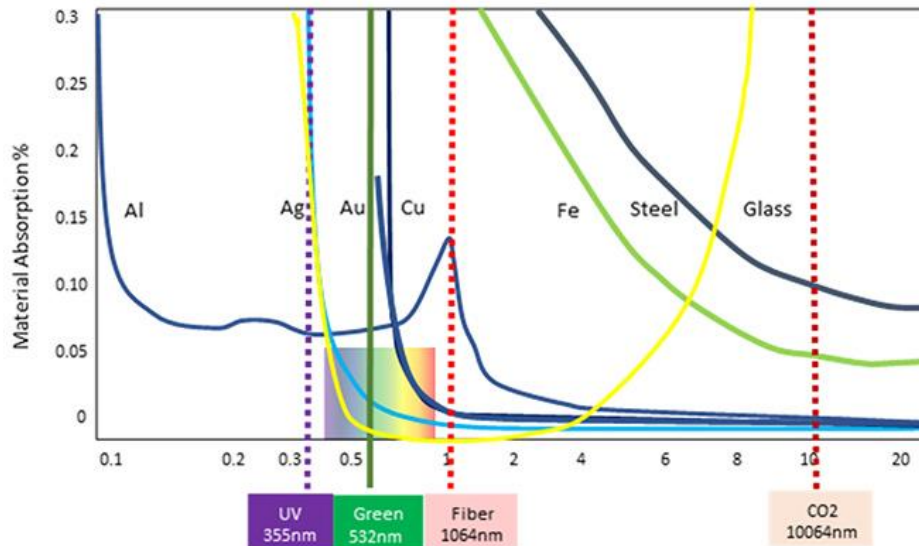
Diodilaseri perustuu puolijohderesonaattoriin. Yksittäisen diodin teho on muutamia watteja, joten työstölaseireissa käytetään moduuleita, jotka muodostuvat useammasta diodista. Moduuleita voi olla useita. Diodilaserien säteen laatu on heikompi kuin esimerkiksi kuitu- tai CO₂-laserin. Diodilaserilla saadaan useita eri aallonpituuksia, mutta käytetyimpiä ovat 808 ja 940 nanometriä. Diodilaserit ovat pieniä ja kevyitä, niiden hyötysuhde on hyvä ja niiden sädettä voidaan siirtää kuidulla, tai diodilaser voidaan kiinnittää suoraan työstöpäähän. Koska diodilaserien säteen laatu on usein heikko, sen käyttäminen kuparin tai muiden heijastavien materiaalien merkkaukseen ei ole suositeltavaa. (Kujanpää et al. 2005, 65-67)

Nd:YAG-lasereissa on kiinteä kide, joka sisältää neodyymi atomeita, jotka toimivat laseraineena. Tyypillinen aallonpituus Nd:YAG-laserille on 1064 nanometriä, ja sitä voidaan kuljettaa optisessa kuidussa. Nd:YAG:n hyötysuhde on heikko, mikä johtaa tehokkaissa työstölasereissa suureen jäädytystarpeeseen. Merkkausovelluksissa vaadittu laserteho on kuitenkin huomattavasti pienempi kuin esimerkiksi leikkaus- tai hitsaussovelluksissa. Nd:YAG-lasereilla saadaan hyvä säteen laatu, joka on eduksi merkkausovelluksissa. Modernit Nd:YAG-merkkauaslaserit ovat laserdiodipumpattuja, mikä nostaa niiden hyötysuhdetta ja parantaa säteenlaatua, lisäksi pumppauksessa käytettyjen laserdiodien elinikä on paljon korkeampi kuin lamppujen. Nd:YAG-laserit voivat olla varustettu Q-kytkimellä, jolla voidaan katkoa sädettä ja saadaan korkeaenergisiä pulsseja. (Kujanpää et al. 2005, 58-64, 212)

Moni valmistaja myy valmiita merkkaukseen sopivia lasereita, mutta valmistajat tarjoavat yleensä myös kokonaisratkaisuna erillistä merkkauksasemaa. Pelkän laserin hankinta voi olla tarpeellista, jos laser halutaan integroida jo olemassa olevaan työstökoneeseen tai räätälöidä tiettyyn tarkoitukseen sopiva laite. Tällöin pitää huomioida laserturvallisuus, laitteen kiinnitys sekä mahdollisten neste-, kaasu- tai kuituletkujen reitit. Markkinoilla on laaja kirjo merkkaukseen soveltuvia lasereita eri tarkoituksiin, minkä takia kannattaa kiinnittää huomiota siihen, että hankkii omaan tarkoitukseen sopivan laserin. Yhdellä laserilla ei voi merkata kaikkia materiaaleja, joten laserin hankintavaiheessa kannattaa määrittää mahdollisimman tarkasti sen käyttötarkoitus, käytettävät prosessit ja materiaalit. Merkkauksprosessi kannattaa suunnitella etukäteen muiden valmistusvaiheiden kanssa, jotta pystytään määrittämään missä kohtaa ja kuinka nopeasti kappale kannattaa merkata.

Erilaiset parametrit vaikuttavat lasersäteen ja materiaalin väliseen vuorovaikutukseen. Lasersäteen tärkeimpiä parametrejä ovat teho, säteenlaatu, aallonpituus, pulssin kesto sekä toistotaajuus. Materiaalin suhteen vaikuttavimpia tekijöitä ovat materiaalin eri ominaisuudet kuten absorptiokerroin, terminen diffuusiokerroin sekä sulamispiste. Materiaalin ominaisuudet huomioiden ja laserin ominaisuudet optimoiden saadaan paras toivottu tulos. (Laserax 2020) Kuparin ominaisuuksiin kuuluvat korkea heijastuvuus ja hyvä lämmönjohtokyky, jotka vaikeuttavat lasertyöstöä merkittävästi. Kuten kuvasta 1 nähdään, kupari absorboi infrapuna-alueen säteitä heikosti. Työaseman tärkeitä tietoja on työalueen

koko, kappaleen maksimitilat, liikenopeus ja, että siitä löytyvät tarpeelliset suojaukset laserin käyttöön.



Kuva 1. Erilaisten metallien absorptio (Control Laser 2018)

Merkkauslaserit ovat yleensä pulsitettuja. Pulssitetun laserin etuna on se, että yksittäisen pulssin hetkellinen teho voi olla todella korkea (Kujanpää et al. 2005, 39). Pulssin energia määrittää sen vaikutuksen kappaleeseen. Pienienerginen pulssi vain lämmittää materiaalia, kun taas tarpeeksi korkeaenergisellä pulssilla materiaali höyrystyy (Kujanpää et al. 2005, 43). Pienempi toistotaajuus ja lyhyemmät pulssit luo tehokkaampia pulsseja. Pulssin energiaa voidaan muuttaa joko teholla tai toistotaajuudella. Merkkausovelluksissa on tärkeää pystyä hallitsemaan pulssien energiaa, esimerkiksi päästövärjyksessä laserilla lämmitetään materiaalia, mutta sitä ei saa sulattaa tai höyrystää, kun taas kaiveruksessa halutaan usein höyrystää materiaalia mahdollisimman tehokkaasti lämmittämättä muuta materiaalia.

Säteen laatu vaikuttaa siihen, kuinka hyvin säde saadaan fokuusoitua (Kujanpää et al. 2005, 47). Pienempään pisteeseen fokusoidulla säteellä on suurempi intensiteetti, mikä tarkoittaa sitä, että samaan vaikutukseen tarvitaan vähemmän tehoa tai vastaavasti voidaan samalla teholla saavuttaa suurempia nopeuksia. Merkkausovelluksissa pienemmällä polttopisteellä saadaan myös suurempiresoluutioisia merkkauksia (Kujanpää et al. 2005, 211).

Jotta laserilla voidaan merkata, täytyy lasersädettä pystyä liikuttamaan kappaleen pinnalla. Vaihtoehtoina on liikuttaa joko kappaletta tai sädettä. Sädettä voidaan liikuttaa joko skannerioptiikalla tai työstöpäätä liikuttamalla. Skannerioptiikka on edellä mainituista tavoista nopein ja joustavin, mutta sen työstöalue on usein rajallinen. Kappaletta tai työstöpäätä liikuttamalla saadaan usein isompi työstöalue. Usein merkkauksessa käytetään kuitenkin skannerioptiikkaa sen joustavuuden ansiosta. Skanneria voidaan käyttää myös yhdistelmänä muiden liikutusjärjestelmien kanssa. Tällöin saadaan kummankin tekniikan edut, mutta järjestelmän hinta nousee.

Taulukkoon 1 on listattu esimerkkejä valmiista lasermerkkauksasemista. Kyseisillä merkkauksasemilla on valmistajien mukaan mahdollista merkata kuparia, mutta ne soveltuvat myös muuhunkin käyttöön. Yhteistä kaikille taulukon laitteille on se, että ne käyttävät kuitulaseria sekä skannerioptiikkaa. Mainituilta valmistajilta on saatavilla merkkauksasemia eri tarkoituksiin, mikä tarkoittaa yleensä eri lasertyyppiä. Tarkkaa hintaa laitteille ei valmistajien sivuilla ole listattu, sillä niitä voidaan konfiguroida eri tavoin. Tämän lisäksi laitteet on tarkoitettu teollisuuskäyttöön, mikä tarkoittaa yleensä sitä, että hinnat on mahdollista saada vasta yritykseltä-yritykselle hankintaprosessissa.

Taulukko 1. Vertailu eri merkkisistä laserlaitteista (Gravotech n.d.; Mecco n.d.; Trumpf n.d.a)

Valmistaja/malli	Aallonpituus (nm)	Teho (W)	Laatu M2	Toistotaajuus (kHz)	Työalue (mm)
Mecco fiber laser	1064	10–200	<1.4	20–200	330x330
Trumpf TruMark Station 1000	1064	240	<1.5	15–100	110x110
Gravotech welase fibre	1064	20 tai 30	-	30–60	110x110

Taulukon valmistajista Mecco ja Trumpf ovat kuvanneet nimenomaan kuparin lasermerkkauksesta demovideoita, joiden tuloksia voidaan tarkastella kuvassa 2. Vasemmalla kuvassa nähdään esimerkimerkkaus Meccon lasermerkkauksasemalla. Laite kykenee monenlaiseen merkkaukseen ja kuva havainnollistaa hyvin erilaisten merkkauksen vaatimaa aikaa (*cycle time*). Tumma merkkaus (*dark mark*) pystytään tuottamaan

nopeammin kuin esimerkiksi tumma merkkkaus vaalealla taustalla (*dark w/ Background*).
Kuvassa oikealla on Trumpfin lasermerkkkausasemalla merkattu mustavalkoinen QR-koodi.



Kuva 2. Esimerkkejä lasermerkkauksesta (MECCO 2017; TRUMPFtube 2015)

4 MERKKAUSPROSESSIT

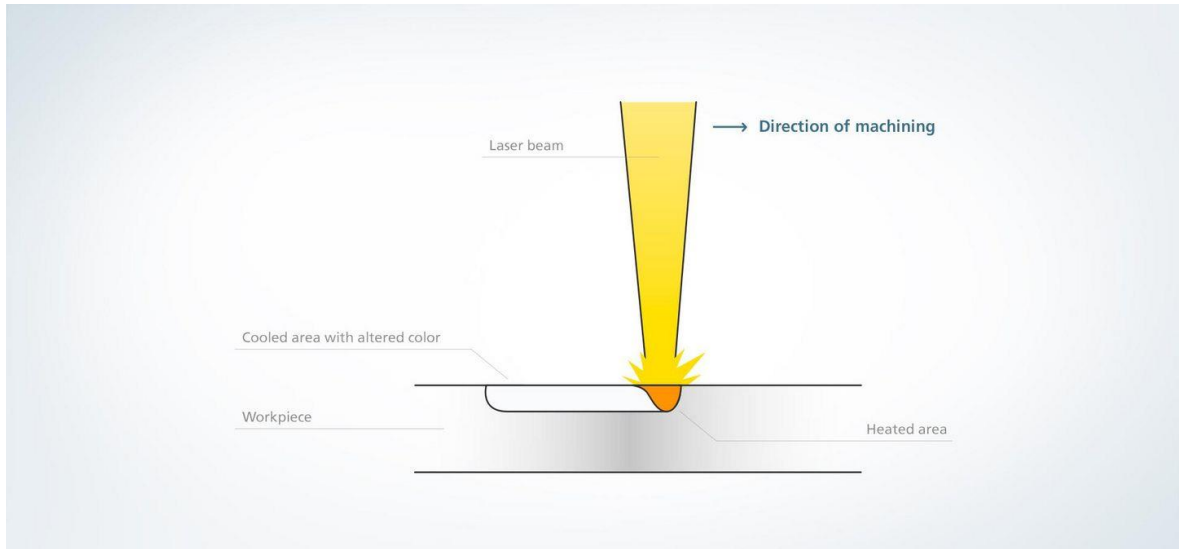
Lasermerkkaus voidaan tehdä kahdella tavalla joko käyttämällä maskia tai liikuttamalla sädettä kappaleen pinnalla. Maskia käytettäessä voidaan käyttää jatkuvatoimista laseria. Maskin idea on muovata lasersäde halutun merkkauksen muotoiseksi, jolloin merkintä voidaan tehdä yhdellä pulssilla. Maski toimii silloin, kun halutaan tehdä sama merkkaus useaan kappaleeseen. (Kujanpää et al. 2005, 208) Sädettä tai kappaletta liikuttamalla merkkaus kestää pidempään, mutta se mahdollistaa erilaisen, vaikkapa sarjanumeron merkkaamisen jokaiseen kappaleeseen. Vaikka suuritehoisilla työstölasereilla pystytään merkkaamaan, käytetään yleensä teholtaan maltillisempia lasereita, noin 10–250 wattia, joilla säteen laatu ja fokuositavuus on parempia (Kujanpää et al. 2005, 211).

Lasermerkkausprosesseja ovat päästövärjäys, kaiverrus, materiaalin poisto, värin muutos ja vaahdotus. Näistä metalleille käytetään yleensä kaiverrusta, mutta myös päästövärjäys ja materiaalinpoisto toimivat metalleille. Värimuutosta ja vaahdotusta käytetään yleensä vain polymeereille ja keraameille. Materiaalinpoisto toimii pinnoitetuille materiaaleille. Idea on poistaa pinnoite, jolloin perusmateriaali jää näkyviin. Värimuutoksessa käytetään pigmenttiä, joka vaihtaa väriä, kun se aktivoidaan laserilla. Vaahdotus toimii lähinnä muoveille. Muovia sulattaessa laserilla, se vaahdotuu, jolloin syntyy kohokuvio. (Kujanpää et al. 2005, 208-211)

4.1 Päästövärjäys

Päästövärjäyksessä materiaalin pintaa lämmitetään niin, että se vaihtaa väriä. Sen etuna on ettei materiaalia poistu, mutta vaatii enemmän aikaa kuin kaiverrus. Päästövärjäystä käytetään usein lääketeollisuudessa, koska sillä saadaan hyvin pysyvä merkki vaurioittamatta kappaleen pintaa. (Kujanpää et al. 2005, 209) Päästövärjäyksessä merkattavan kappaleen pinnan tulisi olla tasainen, jotta merkkauksen luettavuus ei heikkenisi (RMI Laser n.d.). Normaalisti päästövärjäyksellä tehdään musta tai tumma merkintä, mutta riippuen materiaalista voidaan saada erilaisia värejä aikaan. Syntyneen merkinnän sävy riippuu siitä, mihin lämpötilaan materiaali kuumenee. Merkinnän syvyys on

yleensä joitakin kymmeniä mikrometrejä. (FOBA n.d.) Kuvassa 3 on esimerkki prosessista, jossa lasersäde lämmittää kappaleen pinnan ja jättää jälkeensä merkin.

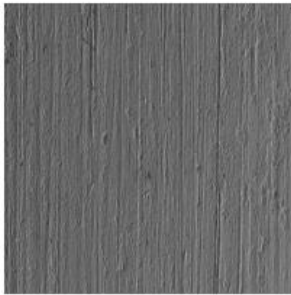


Kuva 3. Havainnekuva päästövärjäysprosessista (Trumpf n.d.b)

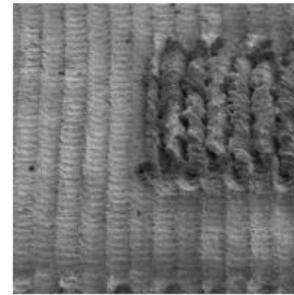
4.2 Laser-etsaus

Laser-etsaus on prosessi, jossa merkattavan kappaleen pinta sulatetaan laserilla. Sulanut alue laajenee ja sen pintarakenne muuttuu, minkä seurauksena myös sen väri muuttuu. Merkintä voi olla musta, harmaa tai valkoinen. Laser-etsaus on nopea prosessi, ja se on suosittu erilaisten tunnisteiden, esimerkiksi viiva- tai QR-koodien merkkauksessa, koska sillä voidaan tehdä suurikontrastisia merkkauksia. Laser-etsauksen kulutuskestävyys on merkittävästi heikompi kuin kaiveruksessa. (Landry 2020) Kuvassa 4 näkyy materiaalin pinta mikroskoopilla kuvattuna ennen (vasen) ja jälkeen (oikea) etsausmerkinnän.

Before the Laser Etching Process



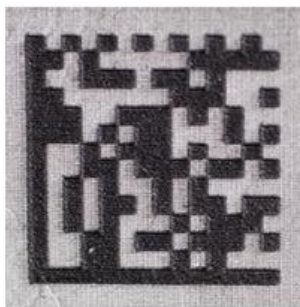
After the Laser Etching Process



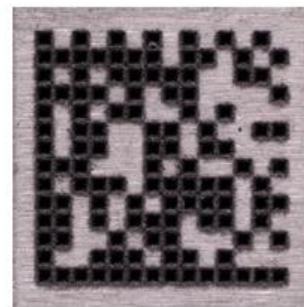
Kuva 4. Materiaalin pintarakenne ennen ja jälkeen etsauksen (Landry 2020)

4.3 Kaiverrus

Kaiverruksessa laserilla poistetaan materiaalia höyrystämällä. Lopputuloksena on merkintä, joka on väritön ura. Kaiverruksen yhteydessä voi myös syntyä päästövärjäys, jos perusmateriaali lämpenee niin, että syntyy oksidikerros. (Kujanpää et. al 2005, 210) Värjäytynyt ura parantaa merkkauksen kontrastia, mikä on usein haluttu lopputulos. Sopivilla parametreilla saadaan myös tehtyä kaiverrus ilman oksidikerrosta. Kaiverruksen syvyys vaihtelee sovelluksesta riippuen. Kuvasta 5 nähdään, että kaiverruksella saadaan parempi kontrasti kuin etsaamalla.



Laser Etching



Laser Engraving

Kuva 5. Etsauksen ja kaiverruksen erot (Landry 2020)

Syväkaiverrus on muuten samanlainen prosessi kuin kaiverrus, mutta tarkoituksena on saada syvämpi merkkäus. Syvämpi merkkäus voidaan toteuttaa toistamalla kaiverrus useampaan kertaan (Landry 2020). Syvän merkin aikaan saamiseen tarvitaan enemmän aikaa, ja syväkaiverrusta voidaan käyttää tilanteissa, joissa tarvitaan kaiverrusta isompi kontrasti tai kulutuskestävyys (Dallman 2017). Syväkaiverruksella voidaan tehdä myös kuvan 6 (yläosa) tapaisia leimasimia. Merkkäus voi olla jopa useita millimetrejä syvä. Kuvan 6 (alaosa) laserilla on poistettu materiaalia ja saatu suhteellisen suuria korkeuseroja.



Kuva 6. Esimerkkejä syväkaiverruksesta (RMI Laser n.d.)

4.4 Värimerkkaus

Laservärimerkkaus, CLM eli *Color laser marking*, tapahtuu ohuen oksidikalvon muodostumisesta sekä LIPSS:sta eli *Laser-induced periodic surface structures* (laserin aiheuttamista jaksottaisista pintarakenteista). LIPSS:n muodostamiseen käytetään erittäin lyhytpulssisia lasereita. Pintaruudukkotyyppi ja -jakso sekä muodostumismekanismi vaihtelevat materiaalista riippuen. (Odintsova et al. 2019)

Metallipintojen värimerkintöjä tehdään muillakin laitteilla kuin lasereilla. Esimerkkejä menetelmistä ovat painaminen, emulsiopäällystäminen sekä elektrolyyttinen hapetus. Näissä tulostusmenetelmissä on kuitenkin huonot puolensa. Merkinnät kestävät kulutusta heikommin ja esimerkiksi värit haalistuvat ajan mittaa. (Antonczak et al. 2013) Menetelmien heikkoudet ovat ajaneet tiedettä kokeilemaan parempia vaihtoehtoja.

Laservärimerkkauksessa on omat huonot puolensa, jotka voivat olla esteenä tekniikan käyttöönotolle. Laitteet ja komponentit, jotka käyttävät ultralyhyitä lasereita, ovat kalliita. Myös huolto on monimutkaista ja vaatii siten enemmän resursseja. Vaikka lasermerkkaus itsessään on nopea prosessi, värimerkkaus vähentää tuottavuutta, eikä esimerkiksi värivirheitä voida korjata luotettavasti. (Odintsova et al. 2019)

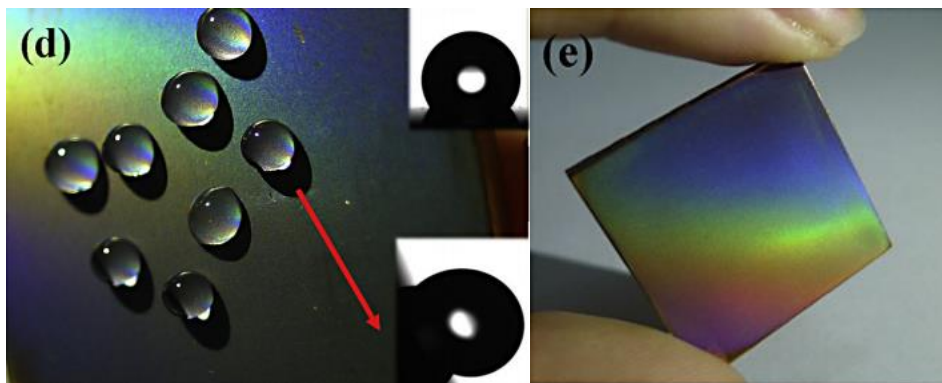
Laservärimerkkausta ei ole kaupallistettu, mikä voi osittain johtua esimerkiksi edellä mainituista seikoista, mutta myös tieteellisen tiedon puutteesta. Menetelmää ei ole tutkittu tarpeeksi, jotta siitä saataisiin aikaan standardoitu prosessi. Odintsovan et al. (2019) tutkimuksessa saatiin lisättyä tuottavuutta nostamalla toistotiheyttä (*repetition rate*). Toistotiheys tarkoittaa tässä pulssien määrää sekunnissa. Vastaavanlaiset tutkimukset tuovat kaupallistamisvaihetta yhä lähemmäs. Antonczak et al. (2013) kuitenkin huomauttavat eräästä tutkimusten isosta ongelmasta eli toistettavuudesta. Heidän mukaansa tutkimuksissa keskitytään usein yhteen laitteeseen ja muutamaaan materiaaliin, jolloin data kerätään vain kyseisen laitteen toiminnasta kyseisten materiaalien kanssa. Tuloksia ei tällöin saada siirrettyä kaupalliseen jatkokäyttöön, mikäli laitteita ja parametreja ei pidetä samoina. Kaikki julkaisut eivät myöskään sisällä käytettyjä parametreja ja niiden vaikutusta värien

toistettavuuteen (Antonczak et al. 2013). Taulukkoon 2 on koottu esimerkkejä kahdesta tutkimuksesta ja niissä käytetyistä laitteista sekä koemenetelmistä.

Taulukko 2. Esimerkkejä tutkimusten laitteista ja koemenetelmistä (Long et al. 2014; Murzin, Liedl & Pospichal 2019)

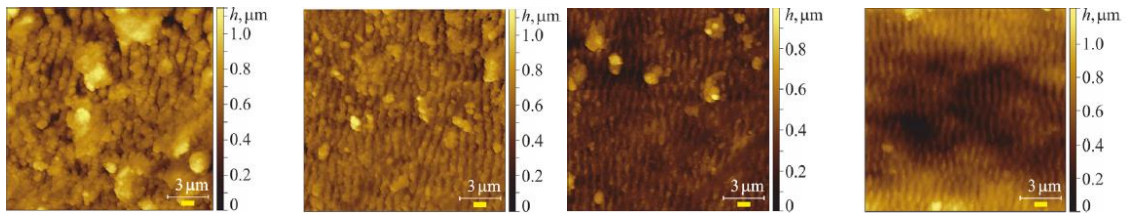
Laite	Aallonpituus	Toistotaajuus	Pulssin pituus
Edgewave-pikosekuntilaser	1064 nm	203,6 kHz	Noin 10 ps
Femtosekuntilaser, Ti: Sapphire-oskillaattori	800 nm	1 kHz	Alle 30 fs

Edgewave-laserilla saatiin aikaan vettä erittäin hyvin hylkivä (*superhydrophobic*) pinta sekä väriskaalaltaan sateenkaariefekti (Long et al. 2014), jotka voidaan nähdä kuvassa 7.



Kuva 7. Sateenkaariefekti (Long et al. 2014)

Femtosekuntilaserilla löydettiin neljä värialueita (sini-turkoosi, oranssi, harmaa-vihreä, puna-violetti), jotka ovat kuvassa 8 järjestyksessä vasemmalta oikealle (Murzin, Liedl & Pospichal 2019).



Kuva 8. Kuparin värimerkkauksessa saavutettuja värialueita (Murzin, Liedl & Pospichal 2019)

5 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Kuparin lasertyöstö on haastavaa johtuen sen materiaaliominaisuuksista. Merkkausovelluksissa tarvitaan laserilta hyvää säteen laatua, pulssitusta ja hyvää tehon säätöä. Yleensä laserteho ei merkkauksissa ole ongelma. Useita kuparin merkkaamiseen soveltuvia lasereita on monilla valmistajilla. Resonaattorina on usein joko aktiivikuitu tai diodipumpattu Nd:YAG, ja niiden tehot vaihtelevat viiden ja 250 watin välillä. Myös CO₂-lasereita on paljon tarjolla merkkausovelluksiin, mutta mikäli tarkoituksena on kuparin merkkaaminen, ei se ole sopiva ratkaisu.

Merkkauksprosessia suunnitellessa kannattaa ensin kartoittaa tarpeet, jotta voidaan valita käyttöön sopiva prosessi sekä laitteisto. Prosessia valittaessa nousee yleensä kriteereiksi merkkauksen kontrastin tarve sekä merkkaukseen kuluva aika, myös kosmeettiset seikat voivat joissain tapauksissa vaikuttaa.

Lasermerkkkaus on kehittyvä teknologia, jota tutkitaan jatkuvasti. Tuoreimmat tutkimukset ja julkaisut keskittyvät erityisesti värimerkkaukseen. Värimerkkauksen kaupallisia sovellutuksia estää sen tuntemattomuus ja heikko tuottavuus. Tutkimuksissa saadut tulokset tulisi saada kaupalliseen käyttöön toistettavuuden avulla, mutta nykytutkimukset keskittyvät pääosin kerrallaan vain yhden tietynmerkkisen laitteen tutkimustuloksiin, eikä laajempaa akateemista tietoutta ole kerätty. Tutkimuksissa on onnistuttu parantamaan huolenaiheena ollutta tuottavuutta nostamalla toistotaajuutta. Vastaavanlaiset tutkimukset tuovat kaupallisia sovellutuksia yhä lähemmäs.

LÄHTEET

Ahearne, E. 2020. Engineering the surface for direct part marking (DPM). *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 29. pp. 1-10.

Albright, B.. 2004. Parts Marking Makes a Dent in Manufacturing. *Frontline* 2004, October edition, 22–26.

Antonczak, A., Stepak, B., Koziol, P. & Abramski, K. 2013. The influence of process parameters on the laser-induced coloring of titanium. *Applied Physics A*, Vol. 115. pp. 1003-1013.

Control Laser. 2018. How can I select the right laser source for my application?. [blogiteksti] 22.11.2018 [viitattu 6.4.2021]. Saatavissa: <https://www.controllaser.com/blog/2018/11/22/how-can-i-select-the-right-laser-source-for-my-application/>

Copperalliance. 2018. Kupari ja kupariseokset. Ominaisuudet. [verkkodokumentti] [viitattu 23.11.2020]. Saatavissa: <https://copperalliance.fi/kupari-ja-kupariseokset/ominaisuudet/>

Dallman, A. 2017. Considerations when Marking Metal with a Laser. [verkkoartikkeli] [viitattu 21.4.2021]. Saatavissa: <https://www.epiloglaser.com/blog/considerations-when-marking-metal-with-a-laser/>

Dixit, U., Joshi, S. & Davim, J. 2019. *Application of Lasers in Manufacturing*. Springer.

FOBA. n.d. Technologies for Laser Marking. [verkkosivusto] [viitattu 21.4.2021]. Saatavissa: <https://www.fobalaser.com/applications/processes/laser-marking/>

Gravotech. n.d. Welase. Laser engravers and laser cutters. [verkkosivusto] [viitattu 6.4.2021]. Saatavissa: <https://www.gravotech.com/products/laser-stations-laser-tables/welase>

Kujanpää, V., Salminen, A. & Vihinen, J. 2005. *Lasertyöstö*. Teknologiateollisuus ry, Helsinki.

Landry, J. 2020. Laser etching: everything you need to know. [verkkoartikkeli] [viitattu 21.4.2021]. Saatavissa: <https://www.laserax.com/blog/laser-etching>

Laserax. 2020. Surface analysis study of laser marking of aluminum. [verkkodokumentti] [viitattu 20.11.2020]. Saatavissa: <https://www.laserax.com/surface-analysis-study-laser-marking-aluminum-0>

Long, J., Fan, P., Zhong, M., Zhang, H., Xie, Y. & Lin, C. 2014. Superhydrophobic and colorful copper surfaces fabricated by picosecond laser induced periodic nanostructures. *Applied Surface Science*, Vol. 311. pp. 461-467.

Markets and markets. 2019. Laser Marking Market by Laser Type (Fiber Laser, Diode Laser, Solid State Laser, and CO2 Laser), Offering (Hardware, Software, and Services), End User (Machine Tools, Semiconductor & Electronics, Automotive), and Geography - Global Forecast to 2024. [verkkodokumentti] [viitattu 20.11.2020]. Saatavissa: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/laser-marking-market-167085735.html>

MECCO. n.d. SMARTmark® Fiber Laser Marking Machine. Products. [verkkosivusto] [viitattu 6.4.2021]. Saatavissa: <https://www.mecco.com/product-fiber-laser-engraving-machine#form>

MECCO. 2017. Demo: Fiber Laser Marking Capabilities on Copper. [video] [viitattu 6.4.2021]. Saatavissa: https://www.youtube.com/watch?v=8PSC_4ZPMAg

Murzin, S., Liedl, G. & Pospichal, R. 2019. Coloration of a copper surface by nanostructuring with femtosecond laser pulses. *Optics and Laser Technology*, Vol. 119.

Naboka, M. & Giordano, J. 2011. Copper alloys: Preparation, properties and applications. Materials science and technologies. Nova Science Publishers, Inc.

Naumova, M., Morozova, I., Zarapin, A. & Borisov, P. 2018. Copper alloy marking by altering its surface topology using laser heat treatment. *Metallurgist*, Vol. 62, Iss. 5. pp. 56-60.

Odintsova, G., Andreeva, Y., Salminen, A., Roozbahani, H., Van Cuong, L. Yatsuk, R., Golubeva, V., Romanov, V. & Veiko, V. 2019. Investigation of production related impact on the optical properties of color laser marking. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 27.

RMI Laser. n.d. Materials. [verkkosivusto] [viitattu 21.4.2021]. Saatavissa: https://www.rmilaser.com/applications/materials?tab=jl_magic_tabs_brass_and_copper_gi_x2

Trumpf. n.d.a. TruMark Station 1000. Marking systems. [verkkosivusto] [viitattu 6.4.2021]. Saatavissa: https://www.trumpf.com/en_US/products/machines-systems/markingsystems/trumark-station-1000/

Trumpf. n.d.b. Annealing: using the laser to apply long-lasting markings to metal. [verkkosivusto] [viitattu 21.4.2021]. Saatavissa: https://www.trumpf.com/en_US/products/machines-systems/markingsystems/trumark-station-1000/

TRUMPFtube. 2015. TRUMPF Laser marking: TruMark - Engraving of non-ferrous metals. [video] [viitattu 6.4.2021]. Saatavissa: <https://www.youtube.com/watch?v=msQWfSf9YmE>