

LUT-YLIOPISTO
LUT School of Energy Systems
LUT Kone
BK10A0402 Kandidaatintyö

LASERMERKKKAUKSEN OPTIMOINTI LUETTAAVUUDEN PERUSTEELLA
RAKENNETERÄKSELLÄ

OPTIMAZATION OF LASER MARKING BASED ON READABLITY ON
STRUCTURAL STEEL

Lappeenrannassa 31.5.2020

Olli-Petteri Lounatmaa

Tarkastaja TkT Ilkka Poutiainen

Ohjaaja TkT Ilkka Poutiainen

TIIVISTELMÄ

LUT-Yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Olli-Petteri Lounatmaa

Rakenneteräksen lasermerkkauksen optimointi luettavuuden kannalta Kandidaatintyö

2020

29 sivua, 19 kuvaa, 7 taulukkoa ja 2 liitettä

Tarkastaja: TkT Ilkka Poutiainen

Ohjaaja: TkT Ilkka Poutiainen

Hakusanat: lasermerkkkaus, rakenneteräs

Tässä kandidaatintyössä tehtiin kirjallisuuskatsaus lasermerkkauksen nykyhetkeen ja tutkittiin laboratoriokokein lasermerkattujen kappaleiden luettavuutta kontrastin perusteella. Työn tavoitteena oli selvittää materiaalin, pinnanlaadun ja parametrien vaikutusta merkkauksen luettavuuteen. Tutkittavat materiaalit olivat rakenneteräkset S355 ja S960. Tutkittavat pinnanlaadut olivat levyn toimituspinta, hiekkapuhallettu ja hiottu pinta. Parametrien osalta tutkittiin merkkauksen nopeuden, hatch-viivavälin ja pulssin pituuden vaikutusta merkkauksiin.

Laboratoriokokeissa oli käytössä kaksi materiaalia. Jokaisesta oli kolme pinnanlaatua ja jokaisessa yhdeksän kappaletta eri parametrivaihtoehtoa. Erilaisia merkkkausvariaatioita syntyi yhteensä 108 kappaletta, joita tutkittiin käyttäen kontrastia. Kontrastia mitattiin merkatun kuvion ja taustan välillä. Suurin kontrasti merkkaukselle syntyi taustan ollessa vaalea ja merkkauksen ollessa tumma tai päinvastoin.

Työssä huomattiin, että käytetyllä materiaalilla ei ollut suurta vaikutusta merkkauksen lopulliseen tulokseen. Suurempi vaikutus oli pinnanlaaduilla sekä materiaalin valmistuksessa syntyneellä oksidikalvolla. Rakenneteräs S355:lla saatiin pienemmällä nopeudella suurempi kontrastin arvo, mutta S960:lla saatiin puolestaan suuremmalla nopeudella suurempi kontrastin arvo. Hatch-viivavälin ollessa pienin, molemmilla rakenneteräksillä saatiin suurin kontrastin arvo. Pulssin pituuden ollessa pienin sai S355 suurimman kontrastin arvon ja pulssin pituuden ollessa suurin, sai vastaavasti S960 kontrastin suurimman arvon.

ABSTRACT

LUT University
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Olli-Petteri Lounatmaa

Optimization of laser marking based on readability on structural steel

Bachelor's thesis

2020

29 pages, 19 figures, 7 tables and 2 appendices

Examiner: D. Sc. (Tech.) Ilkka Poutiainen

Supervisor: D. Sc. (Tech.) Ilkka Poutiainen

Keywords: laser marking, structural steel

The purpose of this bachelor's thesis was to do a literature review on the current state of laser marking and to examine the readability of laser-marked pieces on the basis of contrast by using laboratory experiments. The aim of this thesis was to find out the effect of material, surface quality and parameters on the legibility of laser marking. The materials studied were structural steels S355 and S960. The surface qualities examined were the manufacture's surface, the sandblasted and the grinded surface. Regarding the parameters, the effect of marking speed, hatch-line spacing and pulse length on the marking was examined.

In the laboratory experiments, two materials were used, each with three surface qualities and with 9 different parameter options. There were total of 108 different labelling variations generated, which were examined by using contrast. Contrast was measured between the marked pattern and the background. The biggest contrast for the marking arose when the background was light and the marking was dark or vice versa.

It was found out that the material used did not have a large effect on the final result of the marking, but the surface qualities and the oxide film formed in the manufacture of the material had a bigger effect. Structural steel S355 gave a higher contrast value at a lower speed, but S960 gave a higher contrast value when using a higher speed. With the smallest hatch line spacing, the highest contrast value was obtained for both structural steels. When the pulse length was the smallest, S355 gave the highest contrast value and when the pulse length was largest, S960 on the other hand gave a higher contrast value.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT.....	3
SISÄLLYSLUETTELO	4
SYMBOLILUETTELO.....	6
1 JOHDANTO.....	7
1.1 Laser.....	8
1.1.1 CO ₂ - hiilidioksidilaser	8
1.1.2 Nd-YAG- laser.....	9
1.1.3 Excimer- laser	9
1.1.4 Kuitulaser	10
1.1.5 Ultra-nopeat pulssilaserit	10
1.2 Lasermerkkaus	10
1.2.1 Kaivertaminen.....	11
1.2.2 Värin muutos.....	12
1.2.3 Päästövärjäys	12
1.2.4 Maskimerkkaus	12
1.2.5 Rasterimerkkaus.....	13
1.2.6 Vektorimerkkaus.....	13
1.3 Optiikka	14
1.3.1 Peilit	14
1.3.2 Optinen kuitu	14
1.3.3 Linssit.....	15
2 MENETELMÄ JA TEORIA	15
2.1 Materiaalit ja laitteisto	16
2.1.1 Ohjelmisto ja parametrit	16
2.1.2 Laitteisto	17
2.2 Merkkauksen luettavuus	18
3 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU	19
3.1 Materiaalin ja pinnanlaadun vaikutus	19

3.1.1	Oksidikalvon vaikutus	21
3.2	Parametrien vaikutus.....	22
3.2.1	Hatch-viivavälin vaikutus	23
3.2.2	Pulssin pituuden vaikutus	24
4	YHTEENVETO	26
	LÄHTEET	27
	LIITTEET	

Liite I: Merkkauksien kontrastit

Liite II: MatLab-koodi kontrastin laskemiseen

SYMBOLILUETTELO

A	Pinta-ala [mm ² tai cm ²]
D	Lasersäteen halkaisija linssillä [mm]
E_{pulssi}	Pulssienergia [J]
f	Polttovälin pituus
f_{rep}	Jakson pituus [Hz]
I	Intensiteetti [W/mm ² tai W/cm ²]
M	Kuidun laatu
P	Teho [W]
$P_{keskm.}$	Keskimääräinen teho [W]
P_{peak}	Piikkiteho [W]
$T_{pulssin\ pituus}$	Pulssin pituus [ns]
W_0	Lasersäteen halkaisija polttopisteessä [mm]

1 JOHDANTO

Työstölasereiden hinnat ovat viime vuosina laskeneet, joten erilaiset lasersovellukset, kuten merkkkaus kiinnostavat yrityksiä yhä enemmän. Samalla kun lasereiden hinta on laskenut, lasereiden tarkkuus ja teho ovat kasvaneet.

Lasermerkkkauksella tarkoitetaan sovellusta, jossa kappaleesta poistetaan ainetta tai aiheutetaan värinmuutos laserin avulla. Merkkkaus voi olla esimerkiksi tekstiä tai kuva. Merkattua informaatiota kappaleessa voidaan käyttää jäljittämisen ja tunnistamisen apuna. Identifiointi on teollisuudessa tärkeä asia ja esimerkiksi vialliset tuotteet voidaan jäljittää nopeasti ja selvittää mahdolliset syyt vialle. Esimerkiksi standardeissa vaaditaan merkintöjä. Rakenneteräksistä valmistettavat teräsrakenteet tulee merkitä tunnistettavasti (SFS-EN 1090-2:2018, s. 36).

Tällä hetkellä rakenneteräksen lasermerkkauksesta on vähän raportoitua tietoa.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on luoda kirjallisuustietoon perustuen kirjallisuuskatsaus lasermerkkauksen nykyhetkeen sekä laboratoriokokein testata pinnanlaatuja ja materiaalien vaikutusta merkkkaukseen.

Työssä vastataan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

1. Millaisia merkkkausmetodeja on?
2. Millä lasertyypeillä merkkkausta nykyään tehdään?
3. Voiko rakenneterästä merkata laserilla?
4. Mikäli merkkkaus on mahdollinen, niin millä parametreilla?
5. Miten materiaali, pinnanlaatu ja parametrit vaikuttavat merkkkausprosessiin ja sen lopputulokseen?

1.1 Laser

Laser on lyhenne sanoista Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Laserilla tarkoitetaan laitetta, joka vahvistaa valoa. Laser tuottaa yhdensuuntaista valoa, jossa valoalloilla on sama aallonpituus ja ne ovat samassa vaiheessa. (Silfvast 2002, s.1-2.) Laserin tuottama teho on todella laaja-alainen alkaen 10^{-9} watista aina 10^{17} wattiin saakka (Danson et al. 2019, s. 3). Laserilla on paljon sovelluksia eri teollisuuden aloilla. Laseria hyödynnetään paljon lääketieteessä sekä elektroniikka- ja metalliteollisuudessa. Metalliteollisuudessa laseria hyödynnetään esimerkiksi leikkauksessa ja hitsauksessa. Arkipäivän esimerkkejä laserin käytöstä ovat viivakoodinlukija ja etäisyysmittarit. (Silfvast 2002, s. 1.)

Laser perustuu aineen atomien elektronien virittämiseen korkeampaan energiatasoon. Korkeampi energiataso on epästabiili ja elektroni palaa takaisin alkuperäiseen energiatasoon vapauttaen fotonin, joka sisältää energiaa. Fotonien osuessa muihin virittyneiden tilan atomien elektroneihin, vapautuu taas energiaa sisältävä fotoni. Tämän ketjureaktion ansiosta syntyy laservaloa. (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005, s. 34 – 35.) Riippuen laseroivasta väliaineesta atomien virittäminen eli pumppaaminen tapahtuu esimerkiksi CO^2 -hiilidioksidilaserissa sähkövirralla, Nd-yagissa salamavalolla tai kuitulaserissa diodilaserilla. (Silfvast 2004, s. 514, 551, 570.)

1.1.1 CO^2 -hiilidioksidilaser

Hiilidioksidilaserilla tarkoitetaan lasertyyppiä, jonka laseroivana materiaalina on hiilidioksidi. Laserissa käytetään kaasuseosta, joka sisältää hiilidioksidin lisäksi typpeä ja heliumia. Nimestään huolimatta kaasuseoksessa hiilidioksidia on edellä mainituista kaasuista vähiten, noin 1 – 9 %. Kaasuseoksen tyyppi tehostaa pumppauksessa siirtyvän energian pääsyä hiilidioksidi molekyyliin. Kaasuseoksen kolmas kaasu, helium toimii eräänlaisena jäädyttäjänä. (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005, s. 54 – 55.) Kaasuseosta pumpataan eli viritetään tasa- tai vaihtosähkövirralla. Hiilidioksidilaser tuottaa valoa 10.6 μm aallonpituudella. (Silfvast 2004, s. 513 – 514.) CO_2 laservaloa johdetaan peileillä, koska säde absorboituu lasiin, jota käytetään kuitujohtimissa. (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005, s. 54 - 55.)

Teräksiä merkatessa hiilidioksidilaserilla tulee kappale ensin käsitellä lisäaineella. Hiilidioksidilaserin tuottama aallonpituus heijastuu paljaan teräksen pinnalta takaisin ja absorboituu huonosti. Pelkästään teräksiä merkatessa hiilidioksidilaser on kallis vaihtoehto, laserlaitteisto on itsessään halpa, mutta lisäaine kallista ja sen käyttö on hankalaa. (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005, s. 45.)

1.1.2 Nd-YAG- laser

Nd-YAGissa laseroivana aineena neodyymi- kide. Nd-YAG laseria merkkaukstaroituksessa pumpataan salamavalolla tai diodilla. Laservalon aallonpituus on 1064 nm. (Silfvast 2004, s. 549 – 552.) Nd-YAG lasereilla taajuus voidaan kaksin- tai kolminkertaistaa. Tällöin laservalon aallonpituus on 534 nm tai 355 nm. Usein ultravioletti-laserit ovat Nd-YAG-pohjaisia. Merkkauksessa käytettävät Nd-YAG laserit ovat pääasiassa pulssitettuja ja Q-kytkimellä varustettuja. (Kujanpää, Salminen & Vihinen, 2005 s. 212.) Q-kytkin on optinen laite, joka vahvistaa pulssin energiaa. Q-kytkin päästää valoa lävitseen ja heijastaa sitä takaisin. Yksi pulssi syntyy aina, kun kytkin päästää valoa lävitseen. Laservalo heijastuu Q-kytkimestä takaisin ja etenee takaisin kiteen läpi putken toiseen peiliin, mistä se heijastuu taas takaisin kiteen kautta Q-kytkimelle. Takaisin heijastunut laservalo virittää lisää lasersoivaa kidettä. Tällä periaatteella Q-kytkimen vahvistus syntyy. (Silfvast 2004, s. 439-441.) Nd-YAGin synnyttämää laservaloa voidaan ohjata kuitukaapelia pitkin, mikä on usein helpompi ratkaisu kuin peilit (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005, s. 58).

1.1.3 Excimer- laser

Excimer -lasereissa on hiilidioksidilaserin tapaan kaasumainen laseroiva aine. Laseroivat aineet ovat excimer-sovelluksessa jalokaasun ja halogeenin sekoitusta. Epästabiilien kaasujen takia pumppaaminen tehdään epäsuorana. (Silfvast 2004, s. 516, 518.) Pumppausmetodeina käytetään elektronisädettä, mikroaaltopurkausta tai sähköistä kaasun korkeapainepumppausta. Laservaloa synnyttävä fotoni syntyy kun esimerkiksi käytettävä kaasuyhdiste KrF ionisoituu kryptoniksi ja fluoriksi. Aineet yhdistyvät uudelleen nopeasti. (Von Bergmann & Stamm 2005, s. 41-43.) Yhden KrF molekyylin elinikä on noin $10 \cdot 10^{-8}$ s. Yksi pulssi siis syntyy edellä mainitun ajan välein. Excimerin tuottama valon aallonpituus riippuu käytetyistä jalokaasuseoksista. Aallonpituus excimer-laserilla on 1.57-2.22 μm . KrF-sekoitusta käytetään metallien merkkauksessa. (Silfvast 2004, s. 519.)

Metallia merkataan KrF excimer-laserilla kaivertamalla ja uudelleenkiteyttämällä. Maskimerkkauksessa käytetään pääasiassa excimer -laseria. (Wehner 2005, s. 321, 323.)

1.1.4 Kuitulaser

Kuitulaserissa säde synnytetään suoraan kuidun sisään. Tästä johtuen kuidusta voidaan tehdä hyvin ohut. Ohut kuitu tarkoittaa tarkkaa ja laadukasta sädettä. Laservalo muodostetaan pumppaamalla diodilaserilla laserväliaineella rikastettua kuitua. Diodien lukumäärä riippuu halutusta tehosta. (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005, s. 68.) Optisen kuidun laseroiva ydin rikastetaan laseroivalla aineella, ytterbiumilla, erbiumilla, thuliumilla, neodmiumilla tai holmiumilla (Zervas & Codemard 2014, s. 2). Kuitulasereissa käytettävä diodi on puolijohde, joka on yleensä alumiinin, galliumin ja kadmiumin yhdistelmä (Silfvast 2004, s. 57). Diodilaserin valo perustuu puolijohdeiden energiatasojen muutoksiin, kun n-puolijohde luovuttaa elektroneja p-puolijohdelle (Behringer 2007, s. 8).

1.1.5 Ultra-nopeat pulssilaserit

Ultranopeilla pulssilasereilla saadaan värinmuutos kappaleeseen. Pico-sekunnin ja femto-sekunnin pulssilaserit ovat yleisimmät. Esimerkiksi femto-sekunnin laseroivana materiaalina on yleensä Ti:Sa (titaani:safiiri). Tällä materiaalilla saadaan 800 nm aallonpituus. (Dusser et al. 2010, s. 3.) Pico-sekunnin pulssilaserissa käytetään esimerkiksi Nd-YAG laseria (Jaworski et al. 2015, s. 4). Pulssin lyhyiden takia merkattu riviväli voi olla aallonpituutta lyhyempi. Tämän takia voidaan merkata hyvin pieniä merkkauksia, jopa nanometrin tarkkuudella. Lyhyen pulssin pituuden takia piikkiteho on korkea. (Dusser et al. 2010, s. 3.)

1.2 Lasermerkkkaus

Lasermerkkauksella tarkoitetaan lasertyöstön sovellusta, jossa kappaleeseen tehdään erilaisia merkintöjä. Merkinnät tehdään yleensä kappaleen identifioinnin takaamiseksi. Merkinnät ovat esimerkiksi viivakoodeja, QR-koodeja, numerosarjoja tai muita vastaavia koodeja.

Lasermerkkauksella on useita etuja verrattuna muihin merkkausmenetelmiin, taulukko 1. Laserilla tehty merkkkaus ei esimerkiksi kulu musteen lailla pois eikä rasita materiaalia

mekaanisen kaivertamisen lailla. Merkkkaus voidaan tehdä vaikeapääsyiseen paikkaan, jonne esimerkiksi leimauskoneella ei päästä.

Taulukko 1. Merkkaustekniikoiden vertailu (Lazov, Deneva & Narica 2015, s. 1).

	Tyyppi	Integroitavuus	Investointi	Joustavuus	Kulutuksen kestävyys	Liikutettavuus	Lämpö tai kemiallinen vaikutus
Sähkökemiallinen etsaus	Kontakti	Matala	Matala	Matala	Korkea	Korkea	Kyllä
Pistemerkkaus	Kontakti	Keskim.	Matala	Keskim.	Korkea	Korkea	Ei
Mustesuihku	Ei kontakti	Korkea	Keskim.	Keskim.	Matala	Korkea	Ei
Laser	Ei kontakti	Korkea	Korkea	Korkea	Korkea	Matala	Ei

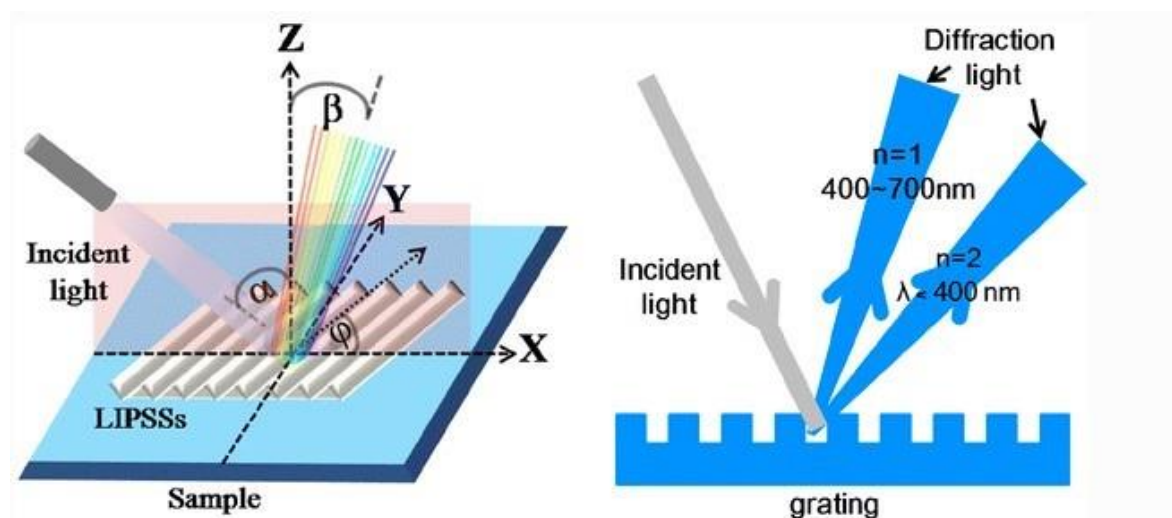
Nykyään teollisuudessa on jo useiden kilowattien tehoisia suurteholasereita. Merkkauksessa käytetään kuitenkin vain noin 10-250 W jatkuvatehoisia lasereita riippuen lasertyyppistä (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005, s. 211). Lasermerkkausta käytetään erityisesti automatisoidussa teollisuudessa. Merkintää on helppo ja nopea muuttaa esimerkiksi juoksevan numerosarjan merkkaamiseen.

1.2.1 Kaivertaminen

Kaivertamisessa laserin säde kohdistetaan pieneen pisteeseen eli polttopisteeseen. Polttopisteessä laserin energiatiheys on suurimmillaan. Tällä energialla materiaali alkaa höyrystymään absorption ollessa suuri. Kaivertaminen voi olla kylmätyöstöä, jos absorptioenergia on tarpeeksi suuri ja reaktioaika riittävä. Kylmätyöstö tarkoittaa sitä, että muuhun kappaleeseen ei tule lämmöstä johtuvia vaurioita tai muodonmuutoksia. Materiaalia höyrystetään ja sulatetaan kappaleesta pois, jolloin kappaleeseen syntyy ura. Kaivertamisella voidaan merkata kappaleisiin esimerkiksi erilaisia ääri viivoja tai tekstiä. (Lazov, Deneva & Narica 2015, s. 3.)

1.2.2 Värin muutos

Ultranopeilla pulssilaserilla voidaan merkata kappaleita eri värillä. Pulssin lyhyden takia kappaleeseen saadaan aikaseksi vain pieniä rakoja, eikä kaiverrusta. Värimuutos perustuu valon diffraktioon, kuva 1. Ulkoisen valonlähteen valo osuu laserilla tehtyyn rako, jolloin valo hajoo eri aallonpituuksiksi eli väreiksi. Eri aallonpituudet heijastuvat sitten takaisin raosta, jolloin rako näyttää tietyn väriseltä. Jokainen rako muodostaa oman pikselin, jonka silmä näkee. (Li et al 2004, s. 3 – 4.)



Kuva 1. Ulkopuolisen valon diffraktio raosta (Li et al 2004, s. 4).

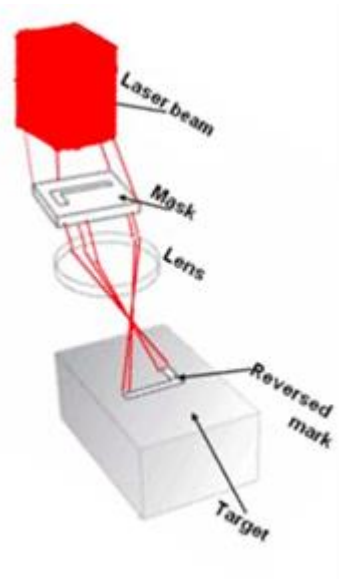
1.2.3 Päästövärjäys

Päästövärjäystä käytetään teräksillä, joihin korotetun lämpötilan aiheuttama väriero saadaan aikaseksi. Laserilla kappaletta lämmitetään korkeaan lämpötilaan, josta se jäähtyy huoneenlämpötilaan. Lämpötila ei kuitenkaan nouse sulamispisteeseen asti, vaan materiaali pysyy koko ajan kiinteänä. Merkintätapa perustuu teräksen pinnan hapettumiseen ja siitä muodostuvaan väriin. Päästövärjäyksessä materiaalia ei poistuta kappaleesta ollenkaan, mikä on erona muihin menetelmiin. (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005, s. 209.)

1.2.4 Maskimerkkaus

Maskimerkkauksessa käytetään eräänlaista sapluunaa lasersäteen edessä. Sapluuna eli maski päästää vain halutun osan lasersäteestä lävitseen, kuva 2. Näin kappaleeseen syntyy maskin muotoinen merkkaus. (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2004 s. 207.) Maskitekniikkaa käytetään, kun merkataan sarjatuotannossa jokaiseen kappaleeseen sama merkkaus. Tekniikka on nopeampi kuin vektorimerkkaus, mutta merkintää vaihdettaessa täytyy

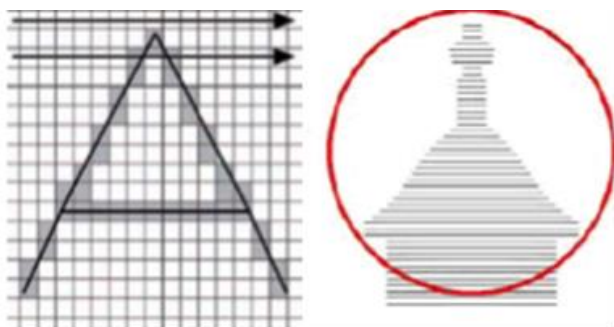
valmistaa uusi maski. Joustavuus tekniikassa on huono. (Lazov, Deneva & Narica 2015, s. 3.)



Kuva 2. Maskimerkkauksen periaate (Lazov, Deneva, & Narica 2015, s. 3).

1.2.5 Rasterimerkkaus

Rasterimerkkaus on nopeampi, mutta laatu on huonompi verrattuna vektorimerkkaukseen (Lazov, Deneva & Narica 2015, s. 2). Rasterimerkkausmetodissa kappaleeseen tehdään pieniä pisteitä, pikseleitä, kuva 3. Pienistä pikseleistä syntyy merkkaus. Yksi pikseli syntyy yhdestä laserin pulssista. (Li et al 2014, s. 3).

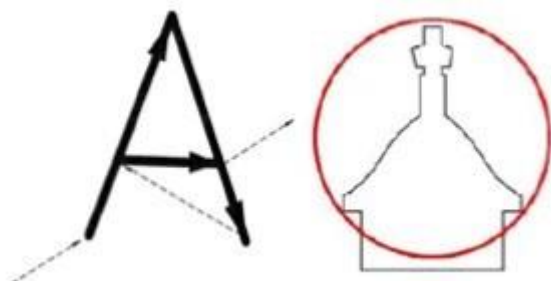


Kuva 3. Rasterimerkattu kuva (Lazov, Deneva & Narica 2015 s. 2).

1.2.6 Vektorimerkkaus

Vektorimerkkaus on käytetyin merkkausmenetelmä. Sitä käytetään erilaisten koodien, logojen ja kirjainten tekemisessä, kuva 4. Vektorimerkkauksessa lasersädettä ohjataan linssien ja peilien avulla eli niin sanotulla skannerioptiikalla x- ja y-suunnassa. Tietokoneohjelmistoilla ohjataan linssien ja peilien liikettä, jolloin lasersäteellä saadaan

merkattua erilaisia 2D-muotoja kappaleeseen. Vektorimerkattu kuvio on koko ajan jatkuva. (Li et al 2014, s. 3.)



Kuva 4. Vektorimerkkauksen periaate (Lazov, Deneva & Narica 2015 s. 2).

1.3 Optiikka

Lasersädettä tuottavasta yksiköstä säde täytyy johtaa kappaleen pintaan. Lasersädettä ohjataan peileillä ja optisella kuidulla. Merkkauksen onnistumiseen vaaditaan polttopisteeltään hyvä ja tarkka säde. Tämä vaatii korkealaatuista optiikkaa. Merkkauksessa lasersädettä täytyy kuljettaa, jotta saadaan tehtyä erilaisia muotoja. Tämä toteutetaan skannerioptiikalla, jossa voidaan liikuttaa lasersädettä tarkasti ja suurilla nopeuksilla. Merkkauksessa peilit yleensä liikkuvat x- ja y-suunnassa, jolloin saadaan aikaan 2D-muotoja. Säteen kuljettamisen lisäksi lasersäde tulee esimerkiksi kollimoida, joka tapahtuu linssillä ennen skannerioptiikkaa.

1.3.1 Peilit

Laserkäyttöön peilit valmistetaan yleensä kuparista tai piistä. Peilejä on mahdollista myös pinnoittaa. Pinnoituksella saadaan aikaan hyvä heijastuvuus ja kovuutta, jolloin peilin naarmuuntuminen on vähäisempää. Kovuus saadaan aikaan pinnoittamalla peili molybdeenilla. Toinen materiaali pinnoitukselle on kulta, joka parantaa heijastuvuutta. Peilejä tulee jäähdyttää sillä ne kuumenevat, koska peilin absorptio on noin 1 %. Jäähdytys on pääasiassa toteutettu vesijäähdytyksellä. (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005, s. 75.)

1.3.2 Optinen kuitu

Optisella kuidulla lasersäteen johtaminen työstökohteeseen on huomattavasti helpompaa kuin peileillä. Optinen kuitu voidaan liittää suoraan erilaisiin laitteisiin. Optisen kuidun ansiosta lasersädettä tuottavan yksikön ei tarvitse olla välttämättä samassa tilassa. Valon

kulkeminen kuidussa perustuu kokonaisheijastukseen. Optinen kuitu valmistetaan kvartsilasista. Kuidun paksuus on 50-1000 μm . Kuidussa on useita erilaisia kerroksia, joilla on erilaisia tehtäviä. Päällimmäiset kerrokset esimerkiksi suojaavat kuitua mekaaniselta rasitukselta. (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005, s. 76.)

1.3.3 Linssit

Lasersäteen säteet tulee esimerkiksi kuituoptiikkaa käytettäessä koota yhdensuuntaisiksi eli kollimoida (Jokela et al. 2015, s. 77). Kollimoinnin lisäksi lasersäde tulee fokusoida, jotta säteestä saadaan tarpeeksi tehokas merkkaukseen. Säteen pienentäminen nostattaa intensiteettiä, intensiteetin yhtälön ollessa:

$$I = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Intensiteetti tarkoittaa tehotiheyttä, joka ilmoitetaan W/mm^2 tai W/cm^2 . Yhtälössä 1 P tarkoittaa lasertehoa (W) ja A säteen pinta-alaa kappaleen pinnalla (mm^2 tai cm^2) Tarkin merkkaukseen saadaan, kun polttopiste on täysin kappaleen pinnalla. Polttoväli lasermerkkaukselaitteissa on linssistä riippuvainen. Polttovälin pidentyessä laserin polttopisteen koko myös kasvaa, jolloin esimerkiksi kaiveruksessa käytetään lyhyempiä polttovälejä tarvittavan intensiteetin aikaansaamiseksi. Säteen halkaisijan yhtälön ollessa:

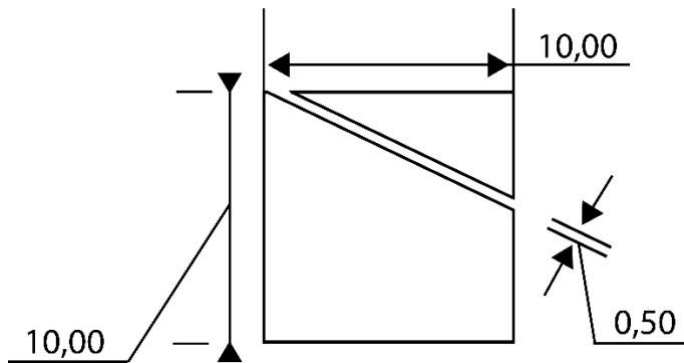
$$2w_0 = \frac{4M^2\lambda f}{\pi D} \quad (2)$$

Yhtälössä 2 w_0 on lasersäteiden halkaisija polttopisteessä, M_2 on kuidun laatu (0-1), λ on laserin aallonpituus, f on polttovälin pituus ja D on lasersäteiden halkaisija linssissä. Kasvattamalla lasersäteiden halkaisijaa eli kollimoitua lasersädettä ennen linssiä, lasersäteiden halkaisija polttopisteessä pienenee. Aallonpituutta kasvattamalla polttopisteen halkaisija kasvaa. (Rissanen 2020, s. 1.)

2 MENETELMÄ JA TEORIA

Laboratoriokokeet toteutettiin LUT-yliopiston lasertyöstölaboratoriossa Lappeenrannassa. Laboratoriokokeen tarkoituksena oli tutkia pinnanlaadun ja materiaalin vaikutusta merkkaukselle. Kappaleisiin merkattiin kuvassa 5 oleva geometria. Geometriassa on

useita teräviä kulmia ja väli kahden geometrian välillä. Terävistä kulmista ja tarkoista geometrioista voidaan tutkia, miten pinnanlaadun ja parametrien vaikutus muuttaa tällaisten vaikeiden geometrioiden luettavuutta. Lisäksi geometrioita erottava väli määriteltiin pieneksi, 0,5 mm, jotta voidaan arvioida sen näkyvyyttä merkkauksessa.



Kuva 5. CAD-malli merkkauksesta.

2.1 Materiaalit ja laitteisto

Erilaisia rakenneteräksiä on olemassa suuri määrä. Tässä työssä testattavat rakenneteräkset ovat SSAB:n S355 Multisteel ja Strenx 960 MC. Materiaalien myötörajat ovat 355 MPa ja 960 MPa. Materiaalien ohella myös pinnanlaatuja on rajattu tässä kandidaatintyössä. Vertaillut pinnanlaadut ovat levyn toimituspinta, hiekkapuhallettu pinta ja hiottu pinta.

2.1.1 Ohjelmisto ja parametrit

Skannerin ohjelmistona laboratoriokeissa oli SAMLight. SAMLight on SCAPS-yrityksen kehittämä ohjelmisto merkkaukseen. Ohjelmiston kautta muokattiin merkkauksen parametreja, pulssin pituutta, jakson pituutta, nopeutta ja hatch-viivaväliä. Hatch-viivavälillä tarkoitetaan sitä, kuinka lähellä uusi merkattu viiva kulkee edellistä. Nopeudella voidaan vaikuttaa siihen, kuinka nopeasti merkkauksen valmistuu. Suurempi vaikutus nopeudella on kuitenkin, kuinka suurelle alueelle yksi pulssi vaikuttaa. Toisin sanoen, pienellä nopeudella saadaan enemmän energiaa pituusyksikköä kohden. Pienellä nopeudella pulssit menevät osin päällekkäin (eng. overlapping), joka tehostaa merkkausta. Jakson pituus (eng. repetition rate) vaikuttaa pulssienergiaan, eli kuinka paljon energiaa laserin yhdessä pulssissa on. Pulssienergia lasketaan yhtälöstä:

$$E_{\text{pulssi}} = P_{\text{keskm.}} \times \frac{1}{f_{\text{rep}}} \quad (3)$$

Yhtälössä 3 $P_{keskm.}$ (W) tarkoittaa keskimääräistä tehoa ja f_{rep} jakson pituutta (Hz). (Thorlabs 2020, s. 6.) Piikkiteho lasketaan yhtälöstä:

$$P_{peak} = \frac{E_{pulsssi}}{T_{pulsstin\ pituus}} \quad (4)$$

Yhtälössä 4 $E_{pulsssi}$ (J) on edellä mainittu pulssienergia ja $T_{pulsstin\ pituus}$ on pulssin pituus (Hz) (Thorlabs 2020, s. 6). Yhtälöstä nähdään, että lyhyempi pulssin pituus kasvattaa piikkitehoa.

2.1.2 Laitteisto

Laboratoriokokeissa käytetty laser oli IPG Photonics:in valmistama pulssikuitulaser, kuva 6, taulukko 2. Valmistaja on rajoittanut laitteen pulssin energiaa, maksimienergia on 1 mJ. Yhtälöstä 2 laskemalla saadaan selville, että jakson pituuden pudotessa alle 20 kHz pulssin maksimienergiat nousevat reilusti yli ilmoitetun maksimin. Tässä vaiheessa laite alkaa pienentämään keskitehoa, jotta pulssienergia pysyy ilmoitetussa 1 mJ.

Taulukko 2. Laserin tekniset tiedot.

Teho	20 W
Aallonpituus	1064 nm (1055 - 1075 nm)
Pulssin maksimienergia	1 mJ
Laseroiva aine	Ytterbium
Pulssin pituudet	4, 8, 13, 20, 30, 50, 100 ja 200 ns
Jakson pituudet	10 - 1000 kHz



Kuva 6. Kuitulaser (IPG Photonics gallery 2020).

Skannerina kokeessa oli SCANLAB:in valmistama hurrySCAN II 14, kuva 7. Valmistajan mukaan Hurriscan tuoteperhe on suunniteltu teollisuuteen, esimerkiksi merkkaukseen ja materiaalien prosessoimiseen. Valmistaja on ilmoittanut skannerin linssin aukkosuhteeksi 14. (Scanlab 2014, s. 4). Aukkosuhteella tarkotetaan polttovälin ja aukon välistä suhdetta. Käytetty linssi oli polttoväliltään 110 mm telesentrinen linssi. Telesentrinen tarkoittaa

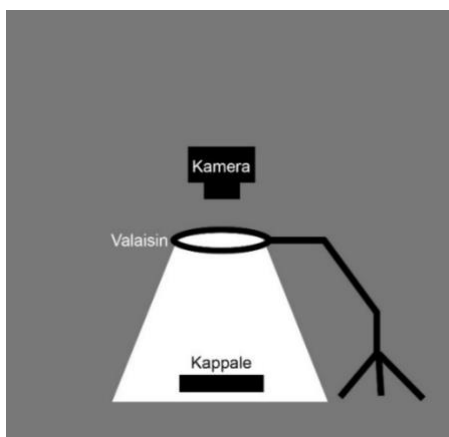
ominaisuutta, joka hävittää perspektiivin. Lasersäteen halkaisija fokuspisteessä oli noin 40 μm (Manninen et al 2017, s. 3).



Kuva 7. Skanneri ilman linssiä (Scanlab 2014, s. 1).

2.2 Merkkauksen luettavuus

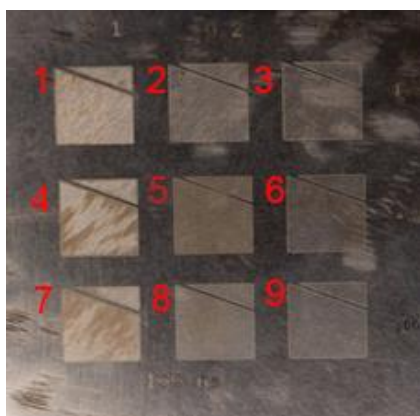
Luettavuutta merkkauksen välillä vertailtiin visuaalisesti. Visuaalisessa tarkastelussa merkatuista kappaleista otetaan valokuvat. Kuvauksessa käytettiin 6000 K värilämpötilan kuvausvaloa. Kuvaaminen toteutettiin kuvassa 8 esitetyllä tavalla varjojen välttämiseksi. Valokuvien perusteella määritetään kontrasti merkkauksen ja taustan välille. Tässä metodissa (Fraser, Maltais & Xavier 2018, s. 937.) käytetään MatLab R2019b-ohjelmistoa. Liitteessä II on esitetty mittauksessa käytetty MatLab-koodi. Taustoja tutkittiin valokuvan kolmesta eri kohdasta. Valokuvien RGB-värikartta muunnettiin mustavalkoiseksi. Mustavalkoisesta kuvatiedosta MatLab muodosti matriisin, jossa on arvoja 0:n ja 255:n välillä. 0 tarkoittaa mustaa ja 255 valkoista. Matriisista otettiin keskiarvo taustalle ja merkkaukselle. Kontrasti laskettiin merkkauksen ja taustan erotuksen itseisarvosta. Suurempi arvo tarkoittaa paremmin luettavaa merkkausta.



Kuva 8. Valokuvaustapahtuma.

3 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELO

Erilaisia merkkauksivariaatioita syntyi 108 kappaletta. Kaksi materiaalia, jokaisesta kolme pinnanlaatua ja jokaisessa 9 kappaletta eri parametrivaihtoehtoa, kuva 9. Käytetyt parametrit olivat: pulssin pituus 100 ns tai 200 ns, hatch-viivaväli 0,1 mm, 0,2 mm tai 0,3 mm ja nopeus 1000 mm/s, 2000 mm/s tai 3000 mm/s. Jakson pituus merkkauksissa oli 60 kHz. Teho oli jokaisessa merkkauksessa 20 W, jolloin pulssienergia oli 0,32 mJ. Taulukossa 3 on esitetty tapa, jolla tulokset kirjattiin.



Taulukko 3. Merkkauksien kirjaaminen.

Hatch-viivaväli 0,1 mm	Hatch-viivaväli 0,2 mm	Hatch-viivaväli 0,3 mm	Nopeus
1	2	3	1000 mm/s
4	5	6	2000 mm/s
7	8	9	3000 mm/s

Kuva 9. 9 Kpl merkkauksia hiotulla S355 materiaalilla.

Suuri kontrasti merkkaukselle syntyy, kun tausta on vaalea ja merkkaukset tummia tai toisinpäin. Liitteessä 1 on esitetty saadut tulokset jokaisesta merkkauksesta ja kuvat merkatuista kappaleista.

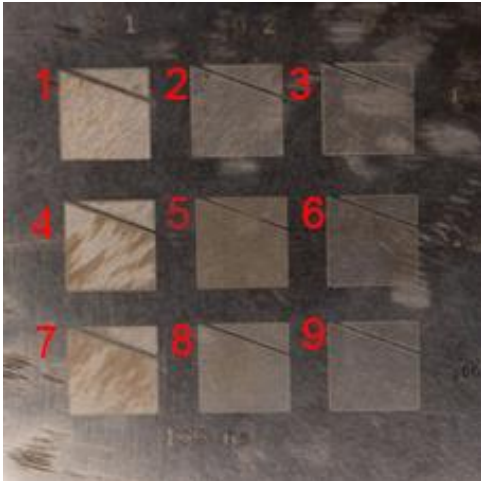
3.1 Materiaalin ja pinnanlaadun vaikutus

Materiaalilla ei ollut suurta vaikutusta merkkauksen lopputulokseen. Suurempi vaikutus oli pinnanlaadulla ja käytetyillä parametreilla. Kontrastien keskiarvo kaikilla pinnanlaaduilla ja pulssin pituudella merkkauksen ja taustan välillä materiaalilla S355 on 25,44 ja materiaalilla S960 on 15,52. Materiaalilla S355 merkkauksen kontrasti verrattuna taustaan on 64 % suurempi verrattuna materiaaliin S960. Levyn toimituspinnat kuitenkin vääristävät keskiarvoja. Materiaalilla S960 levyn toimituspinta oli hyvin tumma, mikä pienensi erotusta merkkauksen ja taustan kontrastien välillä. Materiaalilla S355 oli merkkauksiin vaikuttava

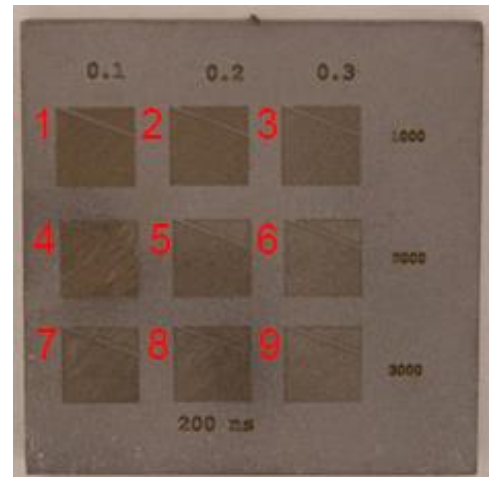
kova oksidikalvo. Materiaalin S355 levyn toimituspinta sai noin 5-kertaisia tuloksia verrattuna materiaalin S960 levyn toimituspintaan. Taulukossa 4 on ilmoitettu keskiarvoiset kontrastit materiaaleilla S355 ja S960. Mittauksessa käytettiin taulukon 3 mukaisia parametrivaihtoehtoja. Merkkauksen ja taustan välinen kontrastin keskiarvo hiotulla ja hiekkapuhalletulla pinnalla molemmilla pulssin pituuksilla oli materiaalilla S355 16,74 ja materiaalilla S960 19,15. Kontrasti S960 materiaalilla oli tässä tarkastelussa vain 16,5 % suurempi. Tästä syystä levyn toimituspinnat jätetään materiaalien välisestä vertailusta pois. Visuaaliseen tarkasteluun valitut yksilöt olivat suurimman kontrastin arvon 38,6 saanut hiottu materiaali S355 pulssin pituudella 100 ns, pienimmän kontrastin arvon 4,4 saanut hiekkapuhallettu materiaali S355 pulssin pituudella 100 ns ja keskiarvoisen kontrastin arvon 20 saanut hiekkapuhallettu materiaali S960 pulssin pituudella 200 ns. Suurimman kontrastin arvon saaneella materiaalilla S355, hiottu pinta (kuva 10), erottuvat selkeästi kaikki välit ja terävät kulmat. Keskiarvoisen kontrastin arvon saaneessa materiaalissa S960, hiekkapuhallettu pinta (kuva 11), terävät kulmat erottuvat, mutta väli ei erotu tapauksissa 4 ja 8. Pienimmän kontrastin arvon saaneessa materiaalissa S355, hiekkapuhallettu pinta (kuva 12), väli erottuu vain tapauksessa 1 ja terävät kulmat eivät erotu missään tapauksessa. Visuaalinen tarkastelu siis tukee kontrastin arvoja.

Taulukko 4. Kontrastien keskiarvot materiaaleilla S355 ja S960.

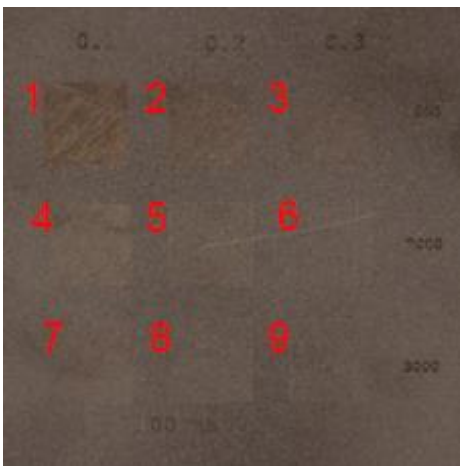
Materiaali	Pulssin pituus	Levyn toimituspinta	Hiekkapuhallettu	Hiottu
S355	100 ns	38,6	3,85	38,6
S355	200 ns	47,2	4,4	20,1
S960	100 ns	7,81	15,36	18,37
S960	200 ns	8,73	20	22,89



Kuva 10. Hiottu materiaali S355, pulssin pituus 100 ns.



Kuva 11. Hiekkapuhallettu S960, pulssin pituus 200 ns.

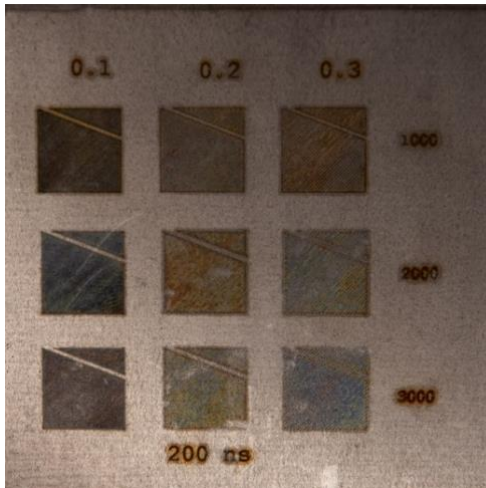


Kuva 12. Hiekkapuhallettu materiaali S355, pulssin pituus 100 ns.

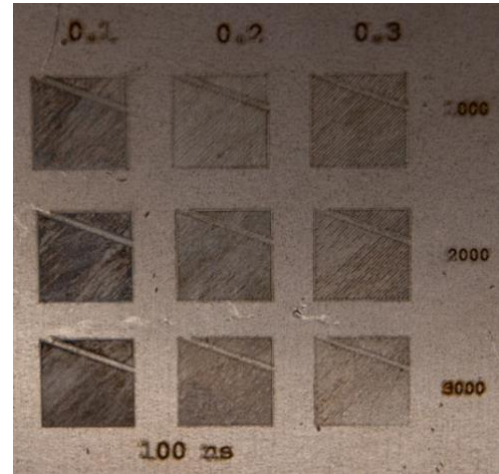
3.1.1 Oksidikalvon vaikutus

Materiaalien pinnassa oli valmistuksen yhteydessä syntynyt kova oksidikalvo. Kalvo oli kovempi materiaalissa S355 kuin materiaalissa S960. Kalvolla oli suuri vaikutus merkkaukseen silmämääräisen värimuutoksen ja kontrastien vertailun perusteella. Tämä käy ilmi vertaillen S355 levyn toimituspinnanlaadulla molempia pulssin pituuksia, kuvat 13 ja 14. 200 ns pulssin pituudella muodostui levyn toimituspinnanlaadulle sinertäviä ja vihertäviä värimuutoksia. 100 ns pulssin pituudella värimuutoksia syntyi merkkaukseen vähemmän. Oksidikalvo vaikutti myös hiekkapuhalletussa pinnassa. Kontrasti merkkauksen

ja taustan välillä hiekkapuhalletulla pinnoilla oli noin 4-kertaa suurempi materiaalissa S960 verrattuna materiaaliin S355, mutta hiotuilla pinnoille ero oli vain 42 %.



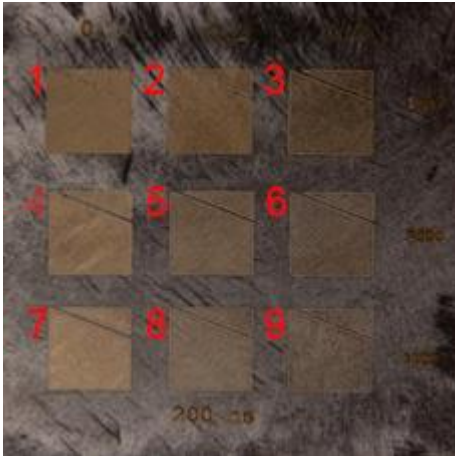
Kuva 13. Materiaalin S355 levyn toimituspinta pulssin pituus 200ns.



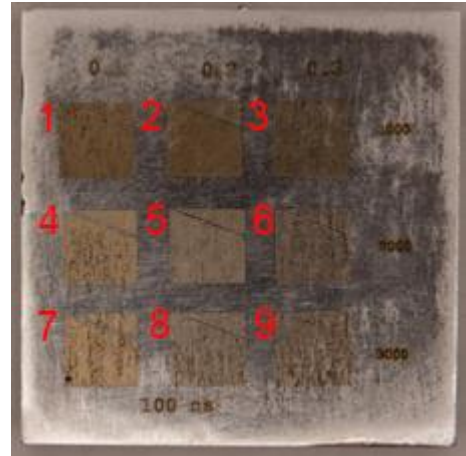
Kuva 14. Materiaalin S355 levyn toimituspinta, pulssin pituus 100 ns.

3.2 Parametrien vaikutus

Nopeudella oli suuri vaikutus vertaillessa kontrasteja. Tämä todennettiin laskemalla kontrastien keskiarvot molemmille materiaaleille erikseen jokaisella pinnanlaadulla ja pulssin pituudella, taulukko 5. Nopeuksista voidaan päätellä, että suuremmalla nopeudella saadaan aikaan kontrastiltaan pienempi merkkaus. Materiaalilla S355 1000 mm/s nopeudessa kontrasti oli 58% suurempi verrattuna sitä 3000 mm/s nopeuteen. Materiaalilla S960 nopeuden vaikutus oli pienempi. Taulukosta 5 nähdään, että hitaammalla nopeudella on saatu kontrastin arvolta suurempia arvoja materiaalilla S355. Visuaalisessa tarkastelussa nähdään, että nopeuden kasvaessa materiaalilla S355, kuva 15, geometrioiden väli ja terävät kulmat erottuvat paremmin. Epätarkimmat välit ja kulmat ovat tapauksissa 1 ja 2, jolloin nopeus oli 1000 mm/s. Materiaalilla S960, kuva 16, välit ja terävät kulmat eivät erotu ollenkaan 1000 mm/s nopeudella, tapaukset 1,2 ja 3. Erotettavuus paranee hieman nopeuden kasvaessa. Geometrioiden ja kontrastin hyvyys ei mene nopeuden osalta samaan tapaan, vaan riippuu pinnanlaadusta. Tämä voidaan todeta kontrastien keskiarvoista ja edellä visuaalisesti tutkituista kappaleista.



Kuva 15. Materiaali S355 hiottu pinta, pulssin pituus 200 ns.



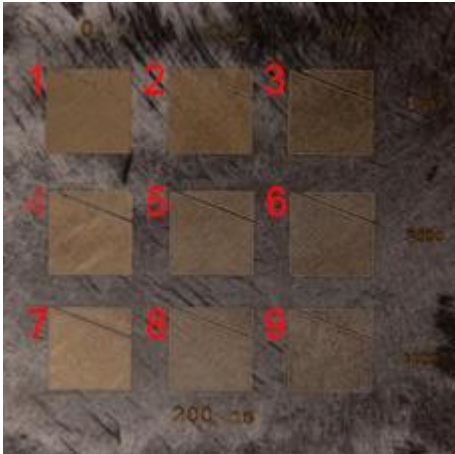
Kuva 16. Materiaali S960 hiottu pinta, pulssin pituus 100 ns.

Taulukko 5. Merkkauksenopeuden vaikutus kontrastien keskiarvoon materiaaleilla S355 ja S960.

Materiaali	1000 mm/s	2000 mm/s	3000 mm/s
S355	31,36	26,00	19,79
S960	13,26	15,40	17,93

3.2.1 Hatch-viivavälin vaikutus

Nopeuden lisäksi hatch-viivavälin suuruudella oli merkkauksenteissä suuri vaikutus kontrastin tulokseen. Saaduista tuloksista laskettiin kontrastien keskiarvot molemmille materiaaleille erikseen jokaisella pinnanlaadulla ja pulssin pituudella, taulukko 6. Viivavälin muutos oli tässä testissä suoraan verrannollinen kontrastin suuruuteen. Viivavälin ollessa 0,1 mm, kontrasti oli taustaan verrattuna 87 % suurempi kuin viivavälin ollessa 0,3 mm. Materiaalilla S960 vaikutus oli hieman pienempi, viivavälillä 0,1 mm merkkauksen kontrasti oli 76 % suurempi verrattuna 0,3 mm viivaväliin. Tuloksista voidaan päätellä, että merkkaukseen saadaan pienemmällä hatch-viivavälillä suurempi kontrasti. Hatch-viivavälin vaikutukset nähdään selkeästi merkkauksissa. Vertaillessa visuaalisesti hatch-viivaväliä, kuva 17, huomataan 0,1 mm viivavälin muodostavan tasaisemman merkkauksen. 0,3 mm viivavälillä huomataan erillisiä viivoja merkkauksessa. Visuaalisessa tarkastelussa hatch-viivavälillä ei ole vaikutusta välien, terävien kulmien ja geometrioiden tarkkuuteen. Esimerkiksi nopeudella 2000 mm/s (tapaukset 4,5 ja 6) havaitaan eri hatch-viivavälin tapauksessa pienemmän geometrian ja välin erottuvan selkeästi.



Kuva 17. Materiaali S355 hiottu pinta, pulssin pituus 200 ns.

Taulukko 6. Hatch-viivavälin vaikutus kontrastin keskiarvoon materiaaleilla S355 ja S960.

Materiaali	0,1 mm	0,2 mm	0,3 mm
S355	38,97	22,42	20,8
S960	20,09	15,07	11,41

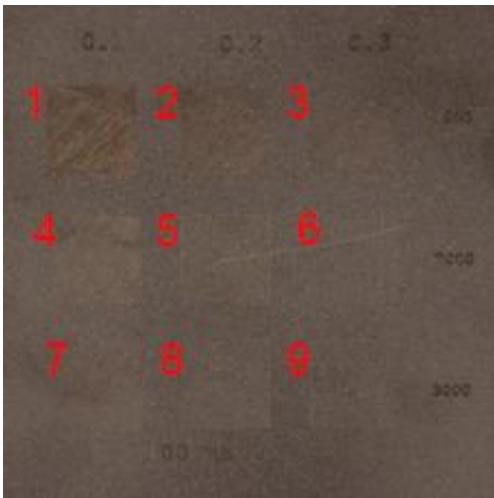
3.2.2 Pulssin pituuden vaikutus

Pulssin pituudella ei ollut keskiarvillisesti yhtä suuria eikä suoraan verrannollisia vaikutuksia merkkauksien kontrastiin verrattuna muihin parametreihin. Saaduista tuloksista laskettiin kontrastien keskiarvot molemmille materiaaleille erikseen jokaisella pinnanlaadulla, taulukot 19 ja 20. Materiaalilla S355 saatiin suurempi kontrasti merkkauksen ja taustan välille 100 ns pulssin pituudella. Kontrasti oli keskimäärin 25% suurempi 100 ns pulssin pituudella verrattuna 200 ns pulssin pituuteen. Tämä johtui pääasiassa värinmuutoksista levyn toimituspinnalla. Pienemmällä pulssin pituudella saavutetaan suurempi piikkiteho. Jotta kova oksidikalvo läpäistään, tarvitaan paljon tehoa. Värinmuutoksella kontrastin arvot olivat suurempia verrattuna muihin merkkauksiin, joten kontrastin keskiarvo nousi. S960 materiaalilla keskimäärin suurempi kontrasti saatiin pidemmällä pulssin pituudella. Pulssin pituudella 200 ns kontrasti oli keskimäärin 24 % suurempi verrattuna 100 ns pulssin pituuteen. Materiaalilla S960 ei ollut yhtä kovaa oksidikalvoa materiaalin pinnalla, joten korkeammasta piikkitehosta ei ollut hyötyä. Tässä tapauksessa pulssin pituutta kasvattamalla eli vaikutusaikaa pidentämällä saatiin kontrastiltaan suurempia merkkauksia. Pulssin pituuden vaikutus merkkauksen kontrastiin on riippuvainen pinnanlaadusta. Visuaalisella tarkastelulla huomataan pulssin pituudella olevan suuri merkitys merkkauksen luettavuuteen. Pulssin pituuden ollessa 100 ns, kuva 18,

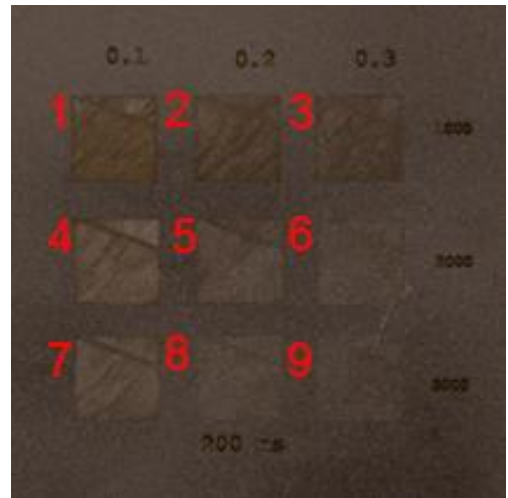
merkkauksista ei erotu yksikään väli geometrioiden välillä. Pulssin pituuden ollessa 200 ns merkkauksissa, kuva 19, erotuttavuus on parempi. Väli ja terävät kulmat erottuvat tapauksissa 1, 4, 5, 7 ja 8.

Taulukko 7. Pulssin pituuden vaikutus kontrastien keskiarvoon materiaaleilla S355 ja S960.

Materiaali	100 ns	200 ns
S355	29,91	23,88
S960	13,84	17,21



Kuva 18. Materiaali S355, hiekkapuhallettu pinta, pulssin pituus 100 ns.



Kuva 19. Materiaali S355, hiekkapuhallettu pinta, pulssin pituus 200 ns.

4 YHTEENVETO

Tässä kandidaatintyössä tarkasteltiin kahden materiaalin, niiden pinnanlaadun ja parametrien vaikutuksia lasermerkkauksen luettavuuteen. Erilaisia variaatioita syntyi yhteensä 108 kappaletta, joita tutkittiin valokuvista kontrastia käyttäen. Kontrastia mitattiin lasermerkatun kuvion ja kappaleen taustan välillä.

Laboratoriokokeissa molempia materiaaleja ja pinnanlaatuja merkattiin jokaisella parametrivariaatiolla. Tutkittujen materiaalien välillä oli vain vähän vaikutusta merkkauksen luettavuuteen. Suurin vaikutus oli kappaleiden pinnanlaadulla ja materiaalin valmistuksessa syntyneellä oksidikalvolla. Parametrien vaikutus luettavuuteen riippui kappaleen materiaalista, pinnalaadusta ja oksidikalvosta. Materiaalilla S355 pienemmällä nopeudella saatiin suurempi kontrastin arvo, mutta materiaalilla S960 saatiin suuremmalla nopeudella suurempi kontrastin arvo. Hatch-viivavälin ollessa pienin, 0,1 mm, molemmat materiaalit S355 ja S960 suurimman kontrastin arvon. Materiaali S355 sai suurimman kontrastin arvon pulssin pituuden ollessa pienin ja materiaali S960 sai suurimman kontrastin arvon pulssin pituuden ollessa suurin.

Rakenneteräksiä merkatessa kappaleen pinnan tulisi olla mahdollisimman puhdas, jotta merkkkaus erottuu taustasta. Tuloksista voidaan päätellä, että suuren kontrastin saa, kun parametreiksi asettaa pienen nopeuden ja pienen hatch-viivavälin. Pulssin pituuden vaikutus täytyy tarkastaa materiaalienkohtaisesti.

Merkkauksien kulutuskestävyyttä ei tutkittu tässä kandidaatintyössä. Esimerkiksi merkkaukset, jotka tehtiin oksidikalvon päälle, tulisi tarkastella kulutuskestävyyden kannalta. Kulutuskestävyys korostuu, mikäli tätä tutkimusta hyödynnetään muiden kuin rakenneterästen merkkaukseen. Tutkimuksessa kaikkien merkkauksien kontrasti ei ollut riittävän hyvä, eli merkkkaus jäi epäselväksi. Jokainen merkkkaus tehtiin vain yhdellä työkierrolla. Lisätutkimuksella voisi selvittää miten useampi työkierto vaikuttaisi kontrastiin. Useamman työkierron määrä lisää vaiheaikaa, joten työkiertojen määrää ei ole järkevää kasvattaa liikaa.

LÄHTEET

Behringer. M High-Power Diode Laser Technology and Characteristics, 2018 Teoksessa Bachmann. F., Loosen. P., Poprawe. R. High Power Diode Lasers Springer. s. 8.

Danson, C.N., Haefner, C., Bromage, J., Butcher, T., Chanteloup, J.F., Chowdhury, E.A., Galvanauskas, A., Gizzi, L.A., Hein, J., Hillier, D.I., Hopps, N.W., Kato, Y., Khazanov, E.A., Kodama, R., Korn, G., Li, R., Li, Y., Limpert, J., Ma, J., Nam, C.H., Neely, D., Papadopoulos, D., Penman, R.R., Qian, L., Rocca, J.J., Shaykin, A.A., Siders, C.W., Spindloe, C., Szatmári, S., Trines, Raoul M. G. M, Zhu, J., Zhu, P. & Zuegel, J.D. 2019, "Petawatt and exawatt class lasers worldwide", *High Power Laser Science and Engineering*, vol. 7. s. 3.

Dusser.B., Sagan. S., Soder. H., Faure. N, Colombier. J., Jourlin. M., Audouard. E. 2010 Controlled nanostructures formation by ultra-fast laser pulses for colour marking. Optics Express, Optical Society of America, 2010. s. 3-4.

Fraser. A., Maltais. J., & Godmaire. X. 2018. Analysis of Laser Marking Performance on various Non-ferrous Metals teoksessa Martin. O. Light Metals 2018. Springer. s. 937.

IPG Photonics gallery. 2020. [yrietyksen www-sivuilla] [Viitattu 5.5.2020] [saatavissa: [https://www.ipgphotonics.com/en/products/lasers/nanosecond-fiber-lasers/1-06-micron/ylpn-1x200-ns-10-100-w#\[gallery-2\]](https://www.ipgphotonics.com/en/products/lasers/nanosecond-fiber-lasers/1-06-micron/ylpn-1x200-ns-10-100-w#[gallery-2])]

Jaworski. P, Yu. F., Carter. R., Knight. J., Shephard. J., Hand. D. 2015. High energy green nanosecond and picosecond pulse delivery through a Negative Curvature Fiber for precision micro-machining. s. 4.

Jokela. K., Ylianttila. L., Visuri. R., Hietanen. M. 2015. [Luku 3:] Laserturvallisuus teoksessa UV- ja Lasersäteily. STUK. s. 77.

Kujanpää. V, Salminen. A. & Vihinen. J. 2005. Lasertyöstö. s. 34 - 35, 54 - 55, 45, 58, 66, 68, 75, 76, 207, 209, 211, 212.

Lazov, L., Deneva, H. & Narica, P. 2015. "Laser Marking Methods", Environment. Technology. Resources. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, vol. 1, s.1, 2-3.

Li, G., Li, J, Hu, Y., Zhang, C, Li, X., Chu, J., Huang, W. 2014. "Femtosecond laser color marking stainless steel surface with different wavelengths", Applied Physics A, vol. 118, no. 4, s. 3.

Li, X., He, W., Lei, L., Wang, J., Guo, G., Zhang, T. & Yue, T. 2015. "Laser direct marking applied to rasterizing miniature Data Matrix Code on aluminium alloy", Optics and Laser Technology, vol. 77, s. 3.

Manninen. M., Hirvimäki. M., Matilainen. V., Salminen. A. 2017. Comparison of Laser-Engraved Hole Properties between Cold-Rolled and Laser Additive Manufactured Stainless Steel Sheets. s.3.

Rissanen. J. 2020. Laser beam spot size calculator [verkkodokumentti]. [Viitattu 22.5.2020]
Saatavissa: <https://www.lasercalculator.com/laser-spot-size-calculator/>

Scanlab. 2014. hurrySCAN III + hurrySCAN data sheet. s. 1, 4.

SFS-EN 1090-2:2018. 2018. Teräs- ja alumiinirakenteiden toteutus. Osa 2: Teräsrakenteiden tekniset vaatimukset. s. 36.

Silfvast. W. 2004. Laser Fundamentals, Second edition. s. 1, 514 - 515, 439 - 441, 516, 518, 549 - 552, 570, 577.

Thorlabs. 2020. Pulsed Lasers – Introduction to Power and Energy Calculations. s. 6.

Von Bergmann. H & Stamm U. 2005. [Principles of Excimer Laser. Teoksessa D. Basting, G. Marowsky. Excimer Laser Technology [New York] Springer. s. 41-43.

Wehner. M. 2005. [Luku 16:] Marking. Teoksessa D. Basting, G. Marowsky. Excimer Laser Technology [New York] Springer. s. 321, 323.

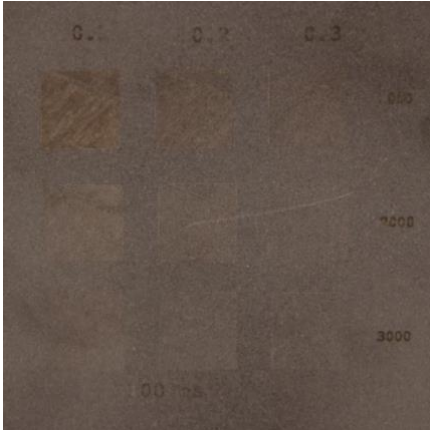
Zervas. M & Codemard. A. 2014. "High Power Fiber Lasers: A Review", IEEE Journal of Selected Topics teoksessa Quantum Electronics, vol. 20, no. 5, s. 2.

LIITTEET

Liite I: Merkkauksien kontrastit

Liite II: MatLab-koodi kontrastien laskemiseen

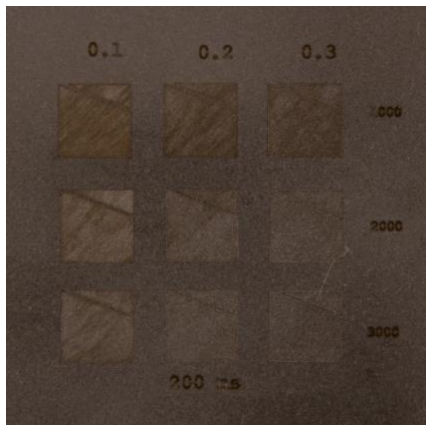
LIITE I



Kuva I. S355 hiekkapuhallettu, pulssin pituus 100 ns.

Taulukko I. Merkkauksien kontrasteja S355 hiekkapuhallettu, pulssin pituus 100 ns.

Hatch-viivaväli 0,1mm	Hatch-viivaväli 0,2mm	Hatch-viivaväli 0,3mm	Nopeus
4,1	3,8	3,6	1000 mm/s
7,1	4,2	4,2	2000 mm/s
2,8	1,1	1,5	3000 mm/s



Kuva II. S355 hiekkapuhallettu, pulssin pituus 200 ns.

Taulukko II. Merkkauksien kontrasteja S355 hiekkapuhallettu, pulssin pituus 200 ns.

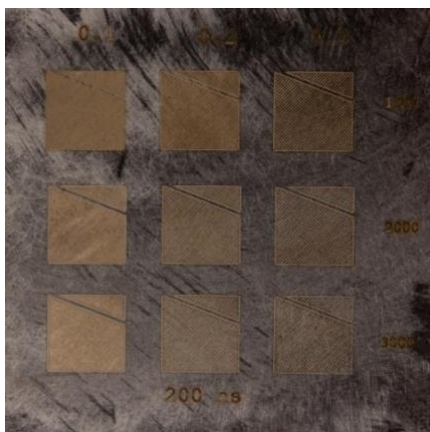
Hatch-viivaväli 0,1mm	Hatch-viivaväli 0,2mm	Hatch-viivaväli 0,3mm	Nopeus
2,6	0,8	2,9	1000 mm/s
10,8	5,1	3,7	2000 mm/s
7,2	5,4	1,1	3000 mm/s



Kuva III. S355 hiottu, pulssin pituus 100 ns.

Taulukko III. Merkkauksien kontrasteja S355 hiottu pinta, pulssin pituus 100 ns.

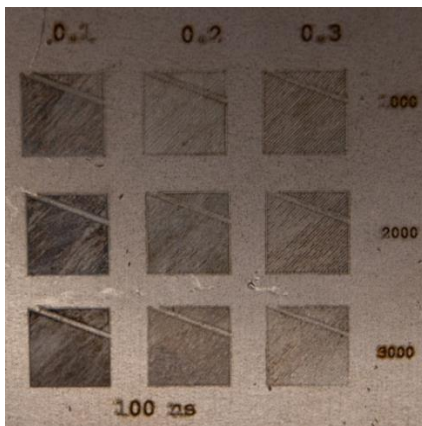
Hatch-viivaväli 0,1mm	Hatch-viivaväli 0,2mm	Hatch-viivaväli 0,3mm	Nopeus
54,9	39,1	54,9	1000 mm/s
53	37,3	37,3	2000 mm/s
43,9	21,4	5,6	3000 mm/s



Kuva IV. S355 hiottu pinta, pulssin pituus 200 ns.

Taulukko IV. Merkkauksien kontrasteja S355 hiottu pinta, pulssin pituus 200 ns.

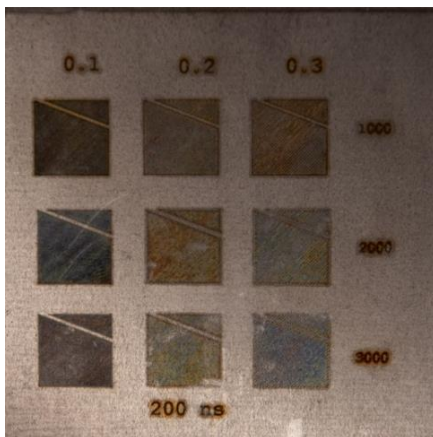
Hatch-viivaväli 0,1mm	Hatch-viivaväli 0,2 mm	Hatch-viivaväli 0,3 mm	Nopeus
7,8	12,6	8	1000 mm/s
36,2	18,8	6,5	2000 mm/s
49,7	28,6	12,6	3000 mm/s



Kuva V. S355 levyn toimituspinta, pulssin pituus 100 ns.

Taulukko V. Merkkauksien kontrasteja, S355 levyn toimituspinta, pulssin pituus 100 ns.

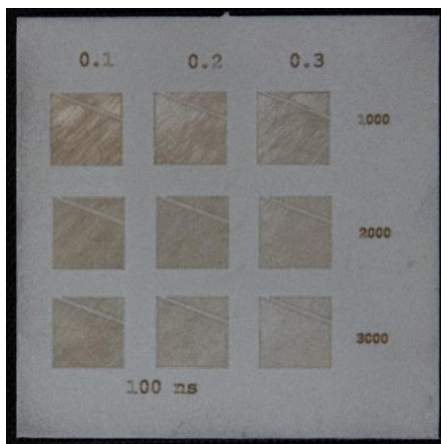
Hatch-viivaväli 0,1mm	Hatch-viivaväli 0,2mm	Hatch-viivaväli 0,3mm	Nopeus
54,9	39,1	54,9	1000 mm/s
53	37,3	37,3	2000 mm/s
43,9	21,4	5,6	3000 mm/s



Kuva VI. S355 levyn toimituspinta, pulssin pituus 200 ns.

Taulukko VI. Merkkauksien kontrasteja, S355 levyn toimituspinta, pulssin pituus 200 ns.

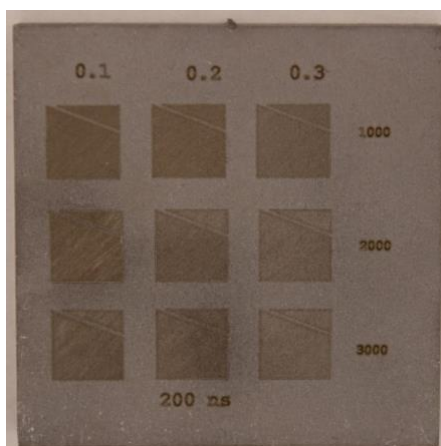
Hatch-viivaväli 0,1mm	Hatch-viivaväli 0,2mm	Hatch-viivaväli 0,3mm	Nopeus
71,5	57,9	63,2	1000 mm/s
56,3	45,7	43,6	2000 mm/s
38,9	19,1	28,2	3000 mm/s



Kuva VII. S960 hiekkapuhallettu, pulssin pituus 100 ns.

Taulukko VII. Merkkauksien kontrasteja, S960 hiekkapuhallettu pinta, pulssin pituus 100 ns.

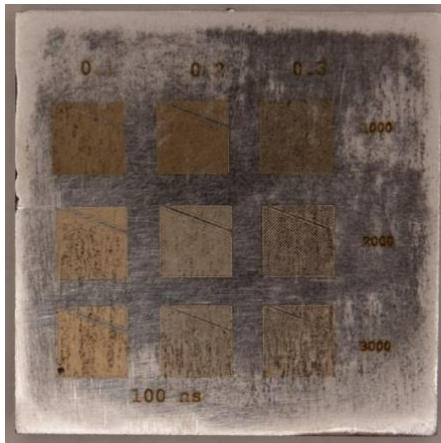
Hatch-viivaväli 0,1mm	Hatch-viivaväli 0,2mm	Hatch-viivaväli 0,3mm	Nopeus
16,8	15,3	17,6	1000 mm/s
19,8	20,1	15,7	2000 mm/s
15,5	10,1	7,3	3000 mm/s



Kuva VIII. S960 hiekkapuhallettu, pulssin pituus 200 ns

Taulukko VIII. Merkkauksien kontrasteja, S960 hiekkapuhallettupinta, pulssin pituus 200 ns.

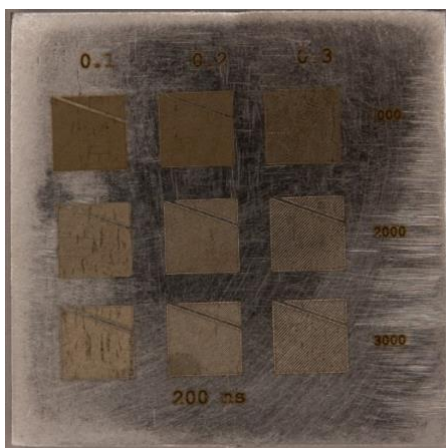
Hatch- viivaväli 0,1 mm	Hatch- viivaväli 0,2 mm	Hatch- viivaväli 0,3 mm	Nopeus
23,2	19,3	16,1	1000 mm/s
25,1	20,1	13,8	2000 mm/s
23	25,9	13,5	3000 mm/s



Kuva IX. S960 Hiottu pinta, pulssin pituus 100 ns.

Taulukko IX. S960 hiottu pinta, pulssin pituus 100 ns.

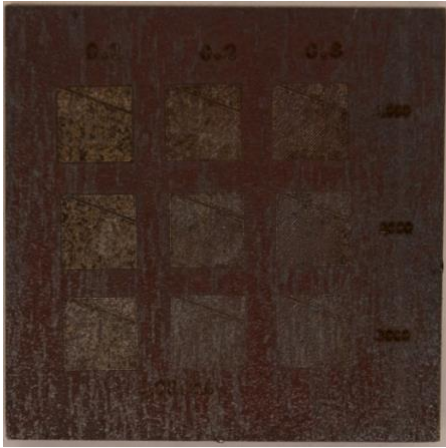
Hatch- viivaväli 0,1 mm	Hatch- viivaväli 0,2 mm	Hatch- viivaväli 0,3 mm	Nopeus
18,1	12,4	18,1	1000 mm/s
25,6	15,7	6,1	2000 mm/s
36,9	25,6	6,8	3000 mm/s



Kuva X. S960 hiottu pinta, pulssin pituus 200 ns.

Taulukko X. S960 hiottu pinta, pulssin pituus 200 ns.

Hatch-viivaväli 0,1 mm	Hatch-viivaväli 0,2 mm	Hatch-viivaväli 0,3 mm	Nopeus
30,7	4,7	4,4	1000 mm/s
30,7	19,7	14,8	2000 mm/s
41,1	32,3	27,6	3000 mm/s



Kuva XI. S960 levyn toimituspinta, pulssin pituus 100 ns.

Taulukko XI. S960 levyn toimituspinta, pulssin pituus 100ns.

Hatch-viivaväli 0,1 mm	Hatch-viivaväli 0,2 mm	Hatch-viivaväli 0,3 mm	Nopeus
0,7	4,5	0,7	1000 mm/s
10,7	8,6	4,2	2000 mm/s
18,3	13,2	9,4	3000 mm/s



Kuva XII. S960 levyn toimituspinta, pulssin pituus 200 ns.

Taulukko XII. S960 levyn toimituspinta, pulssin pituus 200 ns.

Hatch- viivaväli 0,1 mm	Hatch- viivaväli 0,2 mm	Hatch- viivaväli 0,3 mm	Nopeus
11	11,4	13,6	1000 mm/s
9,2	7,9	9,2	2000 mm/s
5,3	4,5	6,5	3000 mm/s

Liite II

```
clc
clear all
tausta= imread('tausta.png'); %1. rajattu kuva taustasta avataan
I=rgb2gray(tausta); % Kuva muunnetaan 0-255 asteikolle. 0 musta 255 valkoinen
contrast=mean(I); %Lasketaan keskiarvo matriisiin jokaisesta sarakkeesta
contrast1tausta=mean(contrast) %Lasketaan keskiarvo rivistä, jossa keskiarvot sarakkeista

tausta1= imread('tausta1.png');
I1=rgb2gray(tausta1);
contrasttausta1=mean(I1);
contrast1tausta1=mean(contrasttausta1)

tausta2= imread('tausta2.png');
I2=rgb2gray(tausta2);
contrasttausta2=mean(I2);
contrast1tausta2=mean(contrasttausta2)

taustankontrasti=(contrast1tausta+contrast1tausta1+contrast1tausta2)/3 %Lasketaan kontrasti taustalle käyttäen kolmea edellä saatua kontrastin arvoa.

merkkkaus= imread('oikeeala.png'); %avataan rajattu kuva merkkauksesta
J=rgb2gray(merkkkaus);
contrastmerkkkaus=mean(J);
contrast12=mean(contrastmerkkkaus)

kokonaiskontrasti=abs(contrast12-taustankontrasti) %Lasketaan itseisarvo merkkauksen ja taustan välille
```

Kuva XIII. Kontrastin mittaamiseen käytetty MatLab-koodi.