

Arto Torikka

3D-lasertyöstön kehittäminen High Metal
Oy:ssä

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Konetekniikka

Insinööriytyö

11.4.2018

Tekijä Otsikko	Arto Torikka 3D-lasertyöstön kehittäminen High Metal Oy:ssä
Sivumäärä Aika	35 sivua + 1 liite 11.4.2018
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Konetekniikka
Ammatillinen pääaine	Koneensuunnittelu
Ohjaajat	Operatiivinen päällikkö Mikko Marjosalmi Yliopettaja Jyrki Kullaa
<p>Tämän insinööriyön tarkoituksena oli parantaa High Metal Oy:n kykyä työstää kolmiulotteisia kappaleita uudella lasertyöstökoneella. Lisäksi yritykseen hankittiin ohjelmisto kolmiulotteisten kappaleiden työstämistä varten. Tavoitteena oli saada yritykseen henkilö, joka on perehtynyt sekä CAM-ohjelmaan, että hallitsee myös lasertyöstön yleisemmin.</p> <p>Työ toteutettiin tutkimustyönä, jossa oli mukana myös käytännönläheisyys, sillä ohjelman käyttöä voitiin kokeilla varsinaisella työstökoneella, jos tarve niin vaati.</p> <p>Raportin käydään aluksi läpi yleisesti laserlaitteisto sekä lasertyöstettävät materiaalit ja suunnitteluun vaikuttavat vaatimukset, joita lasertyöstettäville kappaleille asetetaan. Tässä raportissa keskitytään vain hiilidioksidilaseriin, jollainen yrityksessä on.</p> <p>Tämän jälkeen esitellään itse ohjelmistoa sekä pohditaan minkälaisissa töissä siitä olisi hyötyä yritykselle.</p> <p>Työn aikana myös tehtiin onnistuneesti joitain asiakastöitä ohjelmistolla tehdyillä ohjelmilla. Tulevaisuudessa työn tekijä jatkaa yrityksen palveluksessa mekaniikkasuunnittelijana ja tarkoituksena on, että hän toimii ohjelmiston varsinaisena käyttäjänä ja kolmiulotteisten ohjelmien laatijana yrityksessä, johtuen aikaisemmasta kokemuksestaan lasertyöstökoneiden parissa.</p> <p>Työn tuloksena High Metal Oy:n kyky työstää kolmiulotteisia kappaleita parani merkittävästi. Entistäkin monimutkaisempien työstöratojen ohjelmoiminen onnistuu helpommin ja nopeammin, eikä työstökoneita tarvitse enää pysäyttää ohjelmoinnin ajaksi.</p>	
Avainsanat	Lasertyöstö, 3D, TruTops,

Author Title	Arto Torikka Development of 3D Laser Machining for High Metal Oy
Number of Pages Date	35 pages + 1 appendix 11 April 2018
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical Engineering
Professional Major	Machine Design
Instructors	Mikko Marjosalmi, Operative Manager Jyrki Kullaa, Principal Lecturer
<p>The objective of this Bachelor's thesis was to further develop High Metal Oy's capabilities in three-dimensional laser cutting and welding. The company has purchased a new laser machine and CAM-software for three-dimensional parts.</p> <p>In first stage of the project the author of this thesis participated in the equipment manufacturer's training course for the CAM -software.</p> <p>The thesis was carried out as a practical research work and new ideas could be tested with the laser machine. Also a few jobs for clients were carried out by using the new CAM-software and three-dimensional cutting.</p> <p>The first stage of this study focuses on theory. It includes laser theory, equipment presentation and some designing guidelines that must be considered when designing laser machinable parts. The focus is on the carbon dioxide lasers.</p> <p>The second stage of this study focuses on the CAM-software and the benefits that it brings for the company.</p> <p>In the future the author of this thesis continues to work for High Metal Oy as a mechanical engineer and will be the main programmer in creating three-dimensional programs.</p> <p>As a result, High metal Oy's capability to machine three-dimensional parts with a laser increased significantly. It was discovered that programming complex 3D-parts is now easier and faster and, furthermore, the machine tool does not have to be stopped or switched off for the programming period.</p>	
Keywords	Laser machining, 3D, TruTops

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Työn taustaa	1
1.2	High Metal Oy	1
2	Laser	2
3	Lasertyöstö	3
3.1	Laserhitsaus	4
3.1.1	Sulattava laserhitsaus	5
3.1.2	Syvätunkeumahitsaus	6
3.1.3	Hybridihitsaus	7
3.2	Laserleikkaus	8
3.2.1	Polttoleikkaus	9
3.2.2	Sulattava laserleikkaus	9
3.2.3	Höyrystävä laserleikkaus	10
4	Laserlaitteisto High Metal Oy:ssä	10
5	Työstökoneen ohjelmointi	11
5.1	2D-ohjelmointi	11
5.2	3D-ohjelmointi	12
5.2.1	Opettamalla ohjelmointi	13
5.2.2	TruTops Cell	15
5.2.3	TruTops Basic	16
6	Suunnittelu lasertyöstön kannalta	17
6.1	Laserleikkaus	18
6.1.1	Materiaalien laserleikattavuus hiilidioksidilaserilla	19
6.2	Laserhitsaus	23
6.2.1	Hiilidioksidilaserilla hitsattavat materiaalit	24
6.3	Lasermerkkkaus	25
7	Kolmiulotteinen lasertyöstö TruTops Cellin avulla	25
7.1	Muovatut ohutlevytuotteet	26

7.2	Putkien ja profiilien työstäminen	27
7.3	Kaksiulotteiset ohjelmat TruTops Cellilla	28
7.4	Kiinnittimet	29
8	Esimerkki TruTops Cellin käytöstä profiilin työstössä	32
9	Yhteenveto ja pohdinta	35
	Lähteet	36
	Liitteet	
	Liite 1. Esimerkki TruTops Cellilla luodusta NC-ohjelmasta	

Lyhenteet

CAD	<i>Computer aided design</i> (tietokoneavusteinen suunnittelu).
CAM	<i>Computer aided manufacturing</i> (tietokoneavusteinen valmistus).
CNC	<i>Computerized Numerical Control</i> (tietokoneistettu numeerinen ohjaus).
CO ₂	Hiilidioksidi.
Cr ₂ O ₃	Kromioksidi.
DWG	Lyhenne sanasta <i>drawing</i> (piirustus). Tiedostomuoto, joka sisältää kaikki tiedot, jotka käyttäjä syöttää CAD-piirustukseen.
DXF	<i>Drawing Exchange Format</i> (CAD-tiedostomuoto).
HAZ	<i>Heat-affected zone</i> (muutosvyöhyke).
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i> .
MIG/MAG	<i>Metal inert gas / metal active gas welding</i> (kaasukaarihitsausprosessi).
Nd:YAG	<i>Neodymium-doped yttrium aluminum garnet</i> (infrapuna-alueella toimiva neodyymirikastettu YAG laser).
STEP	<i>Standard for the Exchange of Product Model Data</i> . Yleisesti käytetty tiedostomuoto CAD-ohjelmissa.
TIG	<i>Tungsten Inert Gas Arc Welding</i> (kaasukaarihitsausprosessi).

1 Johdanto

1.1 Työn taustaa

Vuodesta 2000 lähtien, lasertyöstö on ollut yksi High Metal Oy:n tuotannon kulmakiviä. Yrityksellä on pitkä kokemus sekä 2D- että 3D-laserleikkauksesta ja -hitsauksesta. Lasertyöstökoneiden yleistyttyä ja kehittyttyä laserleikattujen tuotteiden hinnat ovat laskeutuneet, varsinkin 2D-puolella.

Vuonna 2017 High Metal Oy hankki uuden 3D-lasertyöstökoneen ja siihen yhteensopivan CAM -ohjelman, joiden avulla kolmiulotteisten kappaleiden työstäminen nousee uudelle tasolle yrityksessä.

Tämän insinööriyön tarkoituksena oli perehtyä uuteen CAM-ohjelmaan, sekä tutkia sen mahdollisuuksia niin uusissa, kuin vanhoissakin tuotteissa, joita yrityksessä tehdään.

Työn tekijä on ollut High Metal Oy:n palveluksessa laseroperaattorina ja muissa tehtävissä jo useita vuosia ja toimii nykyisin pääosin suunnittelutehtävissä. Kokemuksesta lasertyöstökoneen parissa on suuri hyöty tutkiessani sen mahdollisuuksia. Uuteen CAM-ohjelmaan perehtymisessä auttoi ohjelman toimittajan koulutus, jossa harjoiteltiin ohjelman käyttämistä yhdessä työstökoneen kanssa.

1.2 High Metal Oy

High Metal Oy on Vantaalla sijaitseva perheyritys, jolla on yli 60 vuoden kokemus korkealaatuisten ruostumattomien ohutlevytuotteiden valmistuksesta ja kehittämisestä. High Metal Oy:n perusta on vuonna 1949 perustettu Hakaniemen Metalli Oy. Vuonna 2000 emoyhtiön rinnalle perustettiin tytäryhtiö High Metal Production Oy, jolloin myös hankittiin aikansa huippua edustanut leikkaava ja hitsaava lasertyöstökone. Yritys onkin yksi lasertyöstön edelläkävijäyrityksiä Suomessa. Vuonna 2014 yritys hankki myös MKT-dairy liiketoiminnan, joka keskittyy High Metal Oy:n suunnitteleminen juustonvalmistuslaitteiden toimituksiin, automaatioon ja palveluihin. [1.]

High Metal Oy on runsaan 60 vuoden aikana kehittynyt Suomen johtavaksi ohutlevyjärjestelmien suunnittelijaksi ja valmistajaksi. Nykyään High Metal Oy tarjoaa asiakkailleen kokonaisvaltaista palvelua, jossa tuotekehitys ja osaava valmistus tukevat toinen toisiaan. [1.]

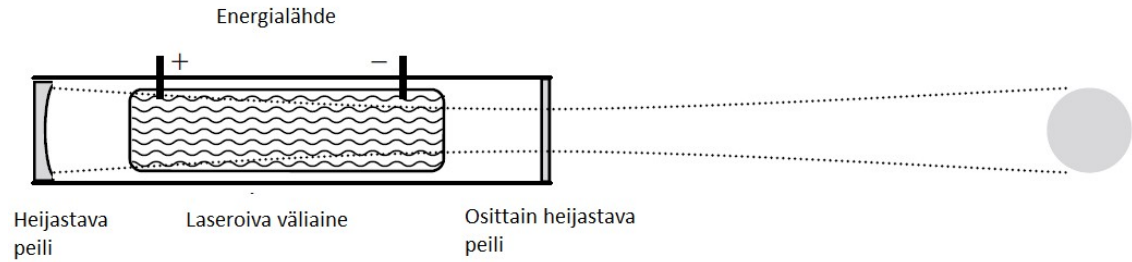
2 Laser

Laserin toiminta perustuu stimuloituksi emissioksi kutsuttuun kvanttimekaaniseen ilmiöön, jonka esitteli Albert Einstein säteilyn kvanttiteoriaa käsittelevässä julkaisussa vuonna 1917 [2, s. 6].

Sana LASER on lyhenne, joka tulee sanoista *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Suomennettuna lyhenne tarkoittaa valoa, jota vahvistetaan stimuloitun emission avulla. Maailman ensimmäisen toimivan rubiinikiteeseen perustuvan laserin esitteli Theodore Harold "Ted" Maiman vuonna 1960. [3, s. 2.]

Kaikki materiaali muodostuu atomeista. Atomi muodostuu ytimeistä ja sitä kiertävistä elektroneista. Normaalissa tilassa suurin osa elektroneista on perustasollaan. Kun atomiin tuodaan energiaa elektronit siirtyvät korkeammalle energiatasolle eli niin kutsuttuun virittyneeseen tilaan. Virittyneessä tilassa elektroni on epästabiili ja pyrkii palautumaan normaalitilaan. Kun elektroni palautuu normaalitilaan, se vapauttaa energiaa fotonin muodossa. Jos syntynyt fotoni törmää toiseen virittyneeseen elektroniin, sekin purkautuu ja toinen samanlainen fotoni vapautuu. Näin valon energia vahvistuu ja yhä lisää fotoneita vapautuu. Syntyneellä valolla on sama vaihe ja yksi suunta. [4, s. 34.]

Käytännössä lasersäde synnytetään resonaattorissa (kuva 1), joka koostuu kahdesta peilistä sekä laseroivasta väliaineesta. Laservalo syntyy peilien väliin, jossa se kulkee edestakaisin samalla voimistuen, johtuen yllämainitusta stimuloitusta emissiosta. Jotta lasersäde pääsee myös resonaattorista ulos, on toisen peileistä oltava osittain läpäisevä. [3, s. 24.] Hiilidioksidilaserin tapauksessa laseroiva väliaine koostuu hiilidioksidista, typestä ja heliumista.



Kuva 1 Resonaattori [3, s. 25]

3 Lasertyöstö

Laser on erittäin monipuolinen lämmönlähde, joka sopii useisiin erilaisiin työstöprosesseihin, kuten leikkaukseen, hitsaukseen, pintakäsittelyyn, jne. Lasersäde ohjataan resonaattorista joko peileillä tai esimerkiksi optisella kuidulla. Lopuksi säde fokusoidaan linseillä ja näin sen tehotiheys saadaan hyvin suureksi. Erilaisilla työstöoptiikoilla samaa laserlähdettä voidaan käyttää useassa eri prosessissa. Tässä työssä keskitytään laserleikkaukseen ja -hitsaukseen.

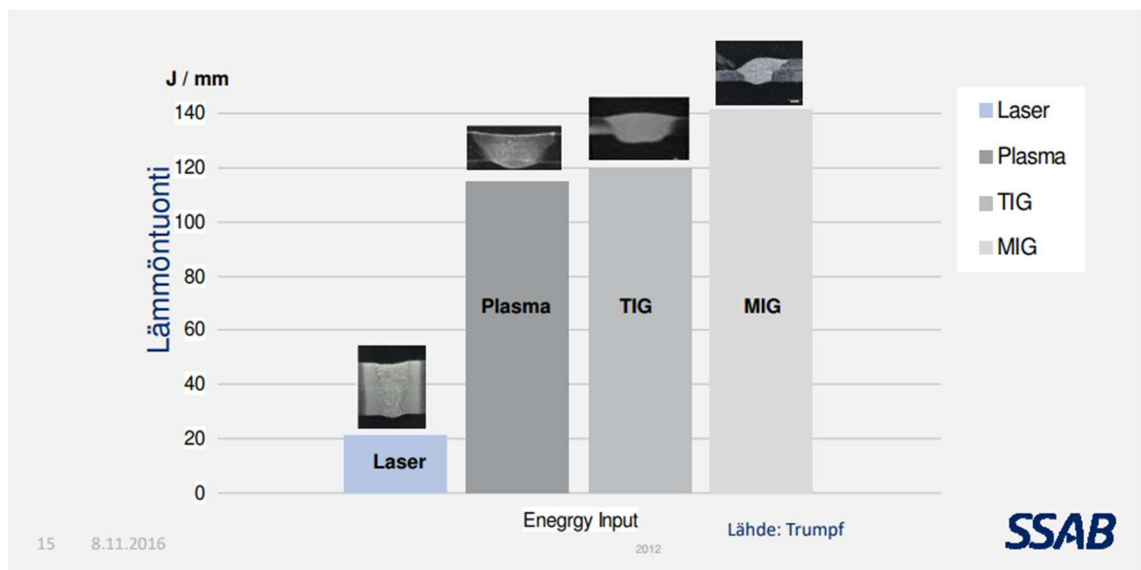
Lasertyöstömenetelmillä voidaan korvata hyvin erilaisia prosesseja. Leikkaavat prosessit korvaavat esim. lastuavaa työstöä ja muita termisiä leikkausmenetelmiä. Tyypillisesti laserleikkaus on muodon ja sarjasuuruuden suhteen joustavampi menetelmä kuin perinteiset menetelmät. Lastuavaan työstöön verrattuna laserleikkauksen etuna on työstövoimien puuttuminen, mutta heikkoutena huonompi leikatun reunan laatu. Mekaaniseen leikkaukseen verrattuna laser puolestaan tuottaa paremman tarkkuuden ja tarkemman leikatun reunan. Laserhitsaus on useimpia muita hitsausmenetelmiä nopeampi, riippumatta siitä, onko kyseessä sulattava hitsaus vai avaimenreikähitsaus. [4, s. 32.]

Lasertyöstön suurena etuna on myös sen vaikutus tuotannon läpäisyaikoihin. Tämä perustuu tarkkaan ja nopeaan työstöön. Usein lasertyöstö lyhentää läpäisyaikaa myös muista syistä. Tyypillisesti kappaleeseen tuotu lämpömäärä on optimoitu, jolloin kappaleen muodonmuutokset jäävät pieniksi. Tämä voi alentaa läpäisyaikaa, sillä tuotannosta

voidaan mahdollisesti jättää työvaiheita pois. Usein pois jäävät työvaiheet ovat manuaalista työtä tai koneistusta, joten saavutettu etu voi olla jopa merkittävämpi kuin prosessin nopeuden tuoma etu. [4, s. 31.]

3.1 Laserhitsaus

Laserhitsaus on muodostunut tärkeäksi teollisuuden liitosmenetelmäksi, jolla on lukuisia etuja perinteisiin hitsausmenetelmiin verrattuna. Laserhitsauksen suurimmiksi eduiksi voidaan lukea suuri hitsausnopeus sekä pieni lämmöntuonti (kuva 2), jolloin hitsattavan kappaleen muodonmuutokset sekä sisäiset jännitykset jäävät vähäisiksi. Hitsausprosessin aikana hitsausoptiikka ei myöskään kosketa hitsattavaa kappaletta, jolloin työkalujen kulumista ei esiinny ja prosessi on helposti automatisoitavissa. Laserhitsaukselle tunnusomaista on myös korkealaatuinen ja kapea sauma, jolloin sauman viimeistelyn tarve on vähäinen.



Kuva 2 Lämmöntuonti [5]

Taulukossa 1 on vertailtu eri hitsausprosessien etuja ja haittoja keskenään. Taulukosta voidaan tulkita, että laserhitsauksella on hyvin vähän huonoja puolia verrattuna joihinkin muihin hitsausmenetelmiin. Taulukossa X = etu ja - = haitta.

Taulukko 1 Eri hitsausprosessien vertailua [3, s. 201]

	Laser	Elektroni-suihku	TIG	Vastus	Ultra-ääni
Nopeus	X	X	-	X	-
Lämmöntuonti	X	X	-	X	X
Kapea HAZ (muutosvyöhyke)	X	X	-		X
Hitsin ulkonäkö	X	X	-		X
Laitteiston luotettavuus	X		X	X	
Hitsin tunkeuma	X	X		-	
Hitsaus ilmassa	X	-		X	
Magneettisten materiaalien-hitsaus	X	-	X	X	X
Heijastavien materiaalien hitsaus	-	X	X	X	X
Lämpöherkkien materiaalien hitsaus	X	X	-	-	X
Liitoksen luoksepäästävyys	X			X	X
Melu, kaasut	X	X	-	-	-
Laitteiston hinta	-	-	X		

3.1.1 Sulattava laserhitsaus

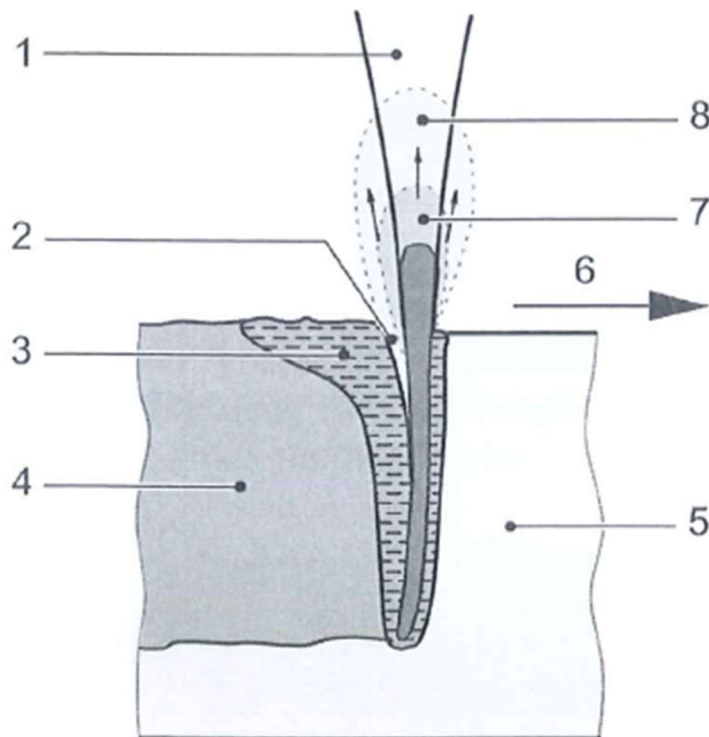
Sulatushitsauksessa materiaali sulatetaan pienellä tehotiheydellä vain pinnalta. Tällöin hitsisaumasta muodostuu vain kymmenesosamillimetrien syvyinen. Sulattavassa laserhitsauksessa hitsisaumasta muodostuu matala ja tyypillisesti leveämpi kuin syvätunkeumahitsauksessa. Leveämpi sauma mahdollistaa myös suuremmat toleranssit railon leveydelle. Sulattava hitsaus soveltuu hyvin esimerkiksi erittäin ohuiden materiaalien hitsaukseen.

3.1.2 Syvätunkeumahitsaus

Syvätunkeumahitsaus eli avaimenreikähitsaus on yleisimmin käytetty menetelmä High Metal Groupissa ja konepajasovelluksissa yleensäkin. Jotta avaimenreikä saadaan muodostettua, on kappaleen pinnalle osuvan lasersäteen ylitettävä 10^6 W/cm² suuruinen tehotiheys. Kuvassa 3 on havainnollistettu avaimenreikähitsausta.

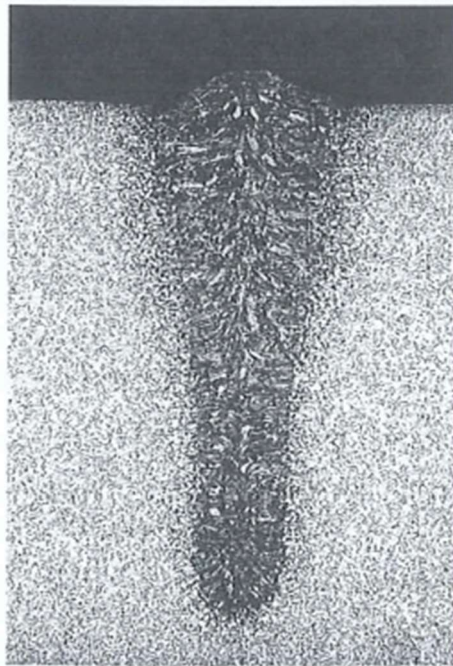
Lasersäde sulattaa materiaalia ja myös höyrystää osan siitä. Materiaalin höyrystyminen ja ulos virtaavan höyryn paine muodostavat lasersäteen taakse tunnelin, jota kutsutaan avaimenreiäksi. Lasersäde heijastuu useita kertoja avaimenreiän seinistä, jolloin lähes kaikki energia absorboituu sulaan ja hitsausprosessin hyötysuhde kasvaa. [6, 6-8.]

Kun sädettä liikutetaan työkappaletta pitkin, sula materiaali virtaa tasaisesti avaimenreiän ympärillä ja jähmettyy sen takapuolelle. Näin tuloksena on syvä ja kapea hitsisauma (kuva 4).



- | | |
|--------------------|-----------------------------|
| 1 Lasersäde | 5 Työkappale |
| 2 Avaimenreikä | 6 Hitsaussuunta |
| 3 Hitsisula | 7 Ulosvirtaava metallihöyry |
| 4 Jähmettynyt sula | 8 Plasmapiilvi |

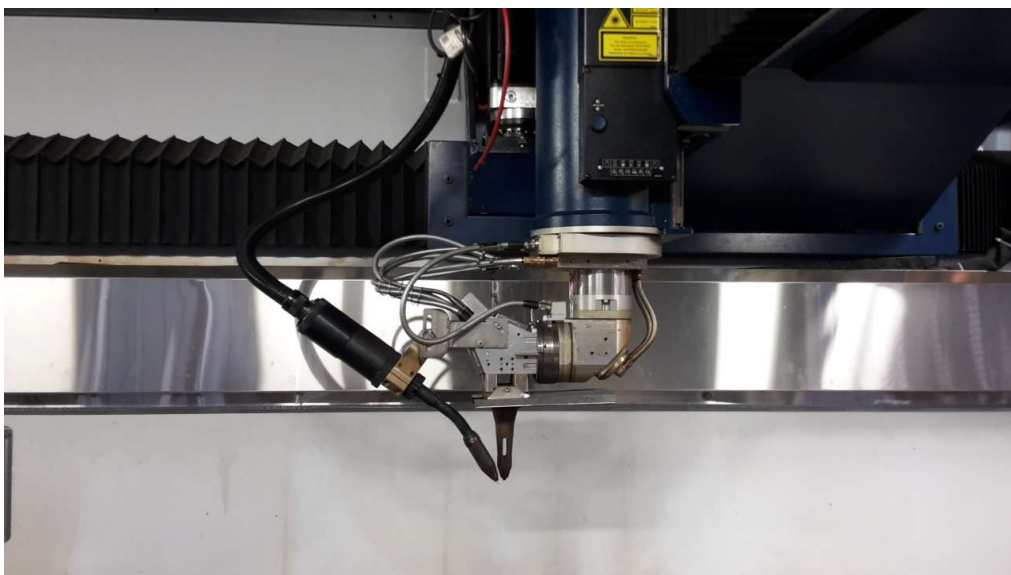
Kuva 3 Avaimenreikähitsaus [6, 6-10]



Kuva 4 Esimerkki avaimenreikähitsatusta saumasta [6, 6-10]

3.1.3 Hybridihitsaus

Jos laserhitsaukseen yhdistetään jokin toinen hitsausmenetelmä, kuten MIG- tai MAG-hitsaus, kutsutaan tätä menetelmää hybridihitsaukseksi. Kuvassa 5 on esitetty High Metal Oy:ssä hybridihitsaukseen käytetty yhdistelmä, jossa laseriin on yhdistetty MIG-hitsauspoltin.



Kuva 5 Hybridihitsauslaitteisto.

Hybridihitsaus (kuva 6) on laserhitsauksen ja kaarihitsauksen yhdistelmä, jossa lasersäde ja valokaari muodostavat yhteisen hitsisulan. Suuren tehotiheyden vuoksi lasersäde toimii useimmiten ensisijaisena lämmönlähteenä mahdollistaen hitsin syvän tunkeuman, kun taas valokaari parantaa prosessin vakautta, luotettavuutta ja tehokkuutta sekä nostaa hitsin laatua. Lisäaineen avulla voidaan myös vaikuttaa hitsin metallurgiaan ja sallia suuremmat railotoleranssit kuin pelkällä laserhitsauksella. Johtuen valokaaren tuomasta lisäenergiasta, voidaan hitsin tunkeumaa ja leveyttä kasvattaa ja samalla kasvattaa myös hitsausnopeutta. [7.]



Kuva 6 Esimerkki hybridihitsatusta tuotteesta High Metal Oy:ssä

3.2 Laserleikkaus

Laserleikkaus on vakiinnuttanut paikkansa teollisuuden työstömenetelmänä, ja sille löytyy monenlaisia sovelluksia. Laserleikkaus on terminen prosessi, jossa kappaleeseen osuva fokusoitu lasersäde sulattaa ja osin höyrystää materiaalia. Sula ja höyrystynyt materiaali puhalletaan leikkausrailosta pois leikkauskaasun avulla, joka johdetaan suutimesta yhdessä lasersäteen kanssa. Laserleikkauksen keskeisinä etuina ovat leikkauksen nopeus sekä pieni lämpövaikutus työkappaleeseen ja sitä kautta pienet muutokset kappaleen mitoissa.

Laserleikkauksessa leikkausrailon leveys on 0,1—1,0 mm sovelluksesta riippuen, mutta tyypillinen railonleveys on vain 0,2—0,3 mm [4, s. 155]. Laserleikkausprosessissa leikkauskaasulla on keskeinen merkitys ja leikkausprosesseja voidaan jaotella muun muassa käytetyn leikkauskaasun mukaan.

3.2.1 Polttoleikkaus

Polttoleikkauksessa leikkauskaasuna käytetään happea, joka reagoi leikattavan materiaalin, yleensä teräksen, kanssa, jolloin hapen ja materiaalin välille syntyy eksoterminen reaktio, joka tehostaa laserleikkausta tuomalla prosessiin lisää energiaa tavallisen polttoleikkauksen tapaan [4, s. 134]. Tämä mahdollistaa suuremmat leikkausnopeudet ja paksujen materiaalien leikkauksen.

Polttoleikkauksen haittapuolena on leikatun pinnan hapettuminen.

3.2.2 Sulattava laserleikkaus

Sulattavassa laserleikkauksessa leikkausrailon etureuna sulatetaan lasersäteellä ja sulanut materiaali puhalletaan pois korkealla paineella (jopa 20 bar) käyttäen inerttiä kaasua. Sulattamalla voidaan leikata kaikkia metalleja, erityisesti ruostumatonta terästä ja muita runsaasti seostettuja teräksiä. Myös monia polymeerejä ja keraameita voidaan leikata sulattavalla prosessilla. [4, s. 135.]

Sulattavassa laserleikkauksessa käytetään leikkauskaasuna yleensä typpeä, joka huolehtii sulan poistamisesta ja samalla suojaa kuumennutta materiaalia hapettumiselta. Poikkeuksena tähän ovat jotkin erittäin herkästi reagoivat materiaalit kuten titaani, jonka leikkauksessa on käytettävä suojakaasuna argonia, koska myös typpi reagoi voimakkaasti titaanin kanssa. [4, s. 135.]

Johtuen leikkauskaasun suuresta paineesta saavutetaan hyvin korkealaatuiset leikkaukspinnat, jolloin kappaleiden jälkikäsittelyn tarve on vähäinen.

Pääasiassa kaikki High Metal Oy:ssä tapahtuva laserleikkaus on sulattavaa laserleikkausta.

3.2.3 Höyrystävä laserleikkaus

Höyrystävässä laserleikkauksessa leikkaus tapahtuu materiaalia höyrystämällä. Tyypillisesti höyrystämällä leikataan muoveja, kumeja, akryyliä, puuta, kartonkia, nahkaa ja joitain keraameja. Metallien höyrystävä leikkaus on mahdollista vain, jos sulan määrä pidetään pienenä tehoa pulssittamalla, ja tehotehoisuus on suuri. Höyrystämällä voidaan leikata erittäin ohuita metalleja tarkasti ja alhaisella nopeudella. [4, s. 135.]

4 Laserlaitteisto High Metal Oy:ssä

Yritykseen hankittiin vuonna 2017 Trumpf TruLaser Cell 7040-lasertyöstökone (kuva 7), varustettuna Trumpfin TruFlow -sarjan 6 kW:n hiilidioksidilaserilla. Koneen suurin työalue on havainnollistettu kuvassa 8.

TruLaser Cell 7000 sarjan koneet ovat metallisten työaineiden leikkaukseen ja hitsaukseen tarkoitettuja lasertyöstölaitteistoja, joilla voidaan työstää tasaisia levyjä, putkia, profiileja, komiulotteisia tai pyörähdyssymmetrisiä työkappaleita.

Kone toimii lentävän optiikan periaatteella. ”Lentävä optiikka” tarkoittaa sitä, että työkappale pysyy paikoillaan ja työstöpää liikkuu työkappaleen päällä. [8, 3-3.]

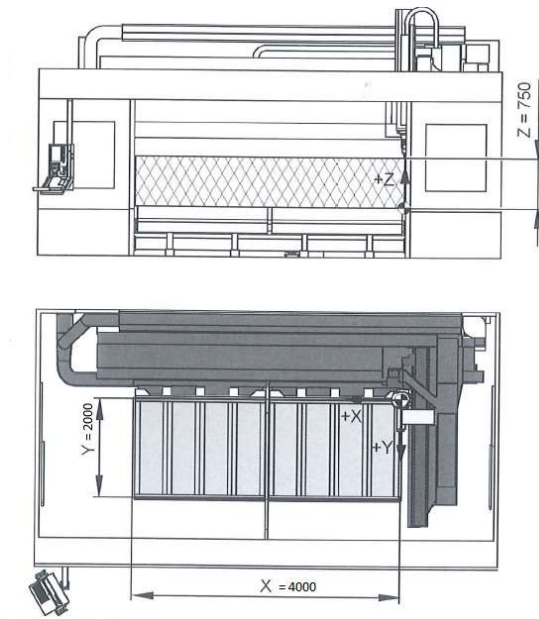


Kuva 7 TruLaser Cell 7040

TruLaser Cell 7000-sarjan koneen avoin, modulaarinen konerakenne sallii käsittelyjärjestelmien ja automaattikomponenttien liittämisen sekä manuaalista, että automaattista kappaleiden vaihtoa varten. Laitteistoa voi täydentää ja varustella lisää yksilöllisellä tai standardisoidulla automaatiotekniikalla, kuten rotaatio- tai lineaarivaihtimella. Koneen

työalue voidaan myös jakaa liikuteltavalla väliseinällä kahteen yhtä suureen työalueeseen, jolloin mahdollistetaan työkappaleiden lataaminen tai poistaminen ja työstäminen vuorotellen ilman, että työstöä tarvitsee pysäyttää. [8, 3-3.]

Työstöoptiikoita High Metal Oy:llä on tällä hetkellä käytössä: kiinteä leikkausoptiikka laserleikkaukseen, dynaaminen leikkausoptiikka laserleikkaukseen sekä modulaarinen työstöoptiikka laserhitsaukseen.



Kuva 8 Koneen suurin työalue (mm) [8]

5 Työstökoneen ohjelmointi

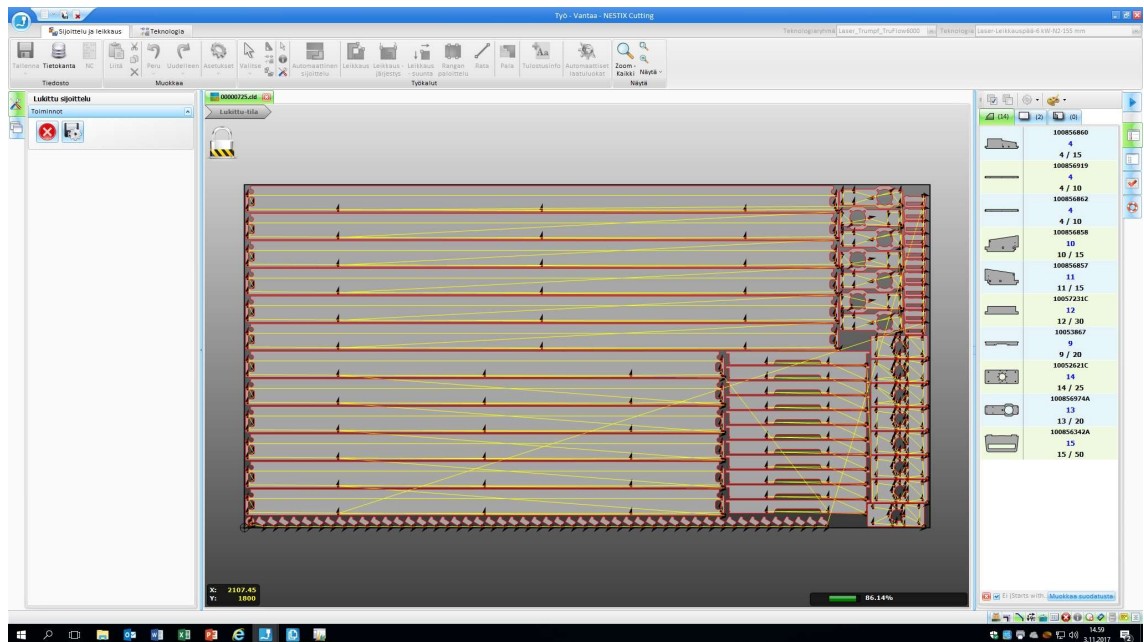
5.1 2D-ohjelmointi

Tasoleikkauksessa, eli levymäisten kappaleiden leikkauksessa, High Metal Oy käyttää suomalaista Nestix-ohjelmaa. Kaiken lähtökohtana on suunnittelijan laatimat kappaleiden 2D-piirustukset, jotka tallennetaan verkkolevyille DWG- tai DXF-tiedostomuodossa. Tämän jälkeen työnjohtajan välityksellä laseroperaattori saa lasertilauksen, jonka perusteella hän tietää mitä leikata, mistä materiaalista ja kuinka paljon.

Operaattori tuo kappaleet Nestix-ohjelmaan ja ”nestaa” eli sijoittelee ne levyille (kuva 9) parhaaksi katsomallaan tavalla, välttäen hukkamateriaalien syntymistä. Seuraavaksi luodaan leikkausradat ja mahdolliset muut työstöön vaikuttavat asetukset.

Kun operaattori on tyytyväinen leikkausohjelmaan, Nestix postprosessoi leikkausradat työstökoneen ymmärtämäksi NC-koodiksi ja ohjelma on valmis käyttöä varten.

Nestix-ohjelmasta löytyy myös työkalut kappaleiden piirtämistä varten, mutta työkalut ovat melko kankeita ja käyttöliittymä soveltuu huonosti piirtämiseen. Piirtotyökalut onkin tarkoitettu lähinnä pienien muokkausten tekemiseen, ja isommat piirtotehtävät on syytä tehdä piirtämiseen tarkoitettulla ohjelmalla.



Kuva 9 Esimerkki Nestix-sijoittelusta

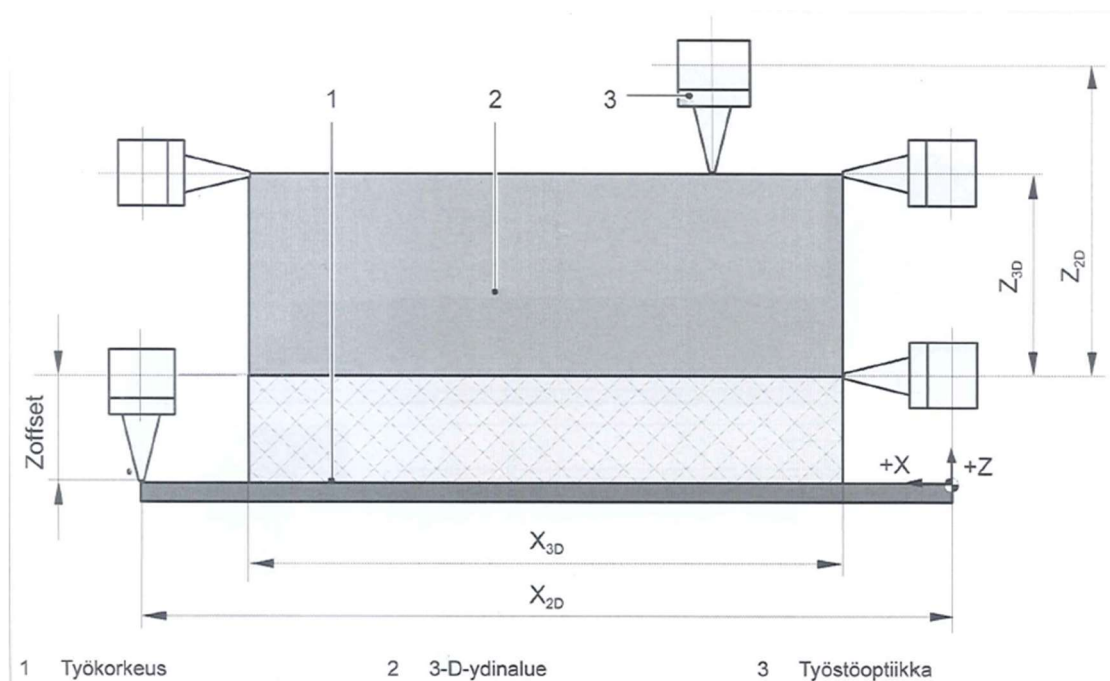
5.2 3D-ohjelmointi

3D -ohjelmoinnilla tarkoitetaan työstöratojen ohjelmoimista kolmiulotteisessa maailmassa, jolloin X-, Y- ja Z-akselien lisäksi käytössä on myös B- ja C-akselit, ja työstöoptiikka voi lähestyä työstettävää kappaletta mistä suunnasta tahansa. Kolmiulotteinen ohjelmointi on huomattavasti monimutkaisempaa, ja käytännössä ainoat tavat tehdä kolmiulotteisia ohjelmia laserille ovat opettamalla ohjelmointi tai simulointiohjelman käyttäminen.

3D-työalue (ydinalue) riippuu käytössä olevasta työstöoptiikasta. Ydinalue (kuva 10) on sellainen työalue, jota voidaan käyttää rajattomasti riippumatta B- ja C-akselien asennoista.

Ydinalue lasketaan seuraavalla tavalla:

- $X_{3D} = X_{2D} - (2 \times Z_{\text{offset}})$
- $Y_{3D} = Y_{2D} - (2 \times Z_{\text{offset}})$
- $X_{3D} = Z_{2D} - Z_{\text{offset}}$



Kuva 10 Ydinalue [8, 3-11]

5.2.1 Opettamalla ohjelmointi

Ennen kuin yritykseen hankittiin TruTops Cell -ohjelmisto, kaikki kolmiulotteiset leikkaus- ja hitsausohjelmat oli tehtävä manuaalisesti opettamalla niin kutsutulla ohjelmointipaneelilla (kuva 11). Ohjelmointipaneelista liikutetaan koneen akseleita, tallennetaan ohjelmointipisteet sekä suoritetaan kaikki ohjelmoinnissa tarvittavat toiminnot. Tämä tapa on todella aikaa vievää eikä työstökoneetta voi käyttää muuhun toimintaan opettamisen aikana.

Opetus tarkoittaa, että NC-ohjauksen tarvitsemat matkatiedot selvitetään valittujen pisteiden (opetuspisteiden) askelittain tehdyllä ajolla ja tallennuksella haluttuun muotoon. Opetettaessa voidaan ohjelmoida halutut muodot sekä vakiomalliset sisämuodot (ympyrä, pitkittäisreikä, suorakulmio, neliö).



Kuva 11 Trumf-ohjelmointipaneeli

Työkappaleeseen piirretty tai merkitty muoto ajetaan silmämääräisesti pilottilaseria apuna käyttäen ja opetuspisteet tallennetaan.

Pilottilaser on laserdiodi, joka lähettää valoa 635 nm:n aallonpituudella. Laserdiodin lasersäde yhdistetään laservalokaapelin kautta koneen säteenohjaukseen. Pilottilaser heijastaa työkappaleeseen pienen punaisen valopisteen, jonka avulla työstöoptiikka on mahdollista asemoida nopeasti ja helposti. [8, 3-19.]

Tallennettujen opetuspisteiden akselikoordinaateista ja interpolointitavasta ohjaus laskee työstettävän muodon. Liiketiedot kirjoitetaan yhdessä tarvittavien NC-jaksojen ja teknologiaparametrien kanssa NC-ohjelmaan. Opetus tehdään käytössä olevalla työstöoptiikalla, jolla myös työstö tehdään. Opetuspisteet tallennetaan ohjelmointipaneelilla. Työstettävä muoto täytyy piirtää tai merkitä selvästi näkyväksi työkappaleen pintaan. Muodon vaihtumisen (esim. siirtyminen kaarevasta muodosta suoraan viivaan) tarkka merkintä helpottaa opetuspisteiden ajoa ja lisää valmistustarkkuutta. [8, 4-175.]

Opettamalla ohjelmoitaessa operaattorin on otettava huomioon kappaleen muoto ja käskyjen luonne törmäysten välttämiseksi varsinkin pikaliikkeillä liikuttaessa. Esimerkiksi ohjelmoitaessa liike reiältä toiselle käyttäen lineaarista G01-käskyä, työstökone liikkuu suorinta reittiä pisteestä toiseen, jolloin törmäyksen riski on olemassa. Nämä vältetään käyttämällä simulaatio-ohjelmaa, jolloin ohjelma varoittaa törmäyksistä.

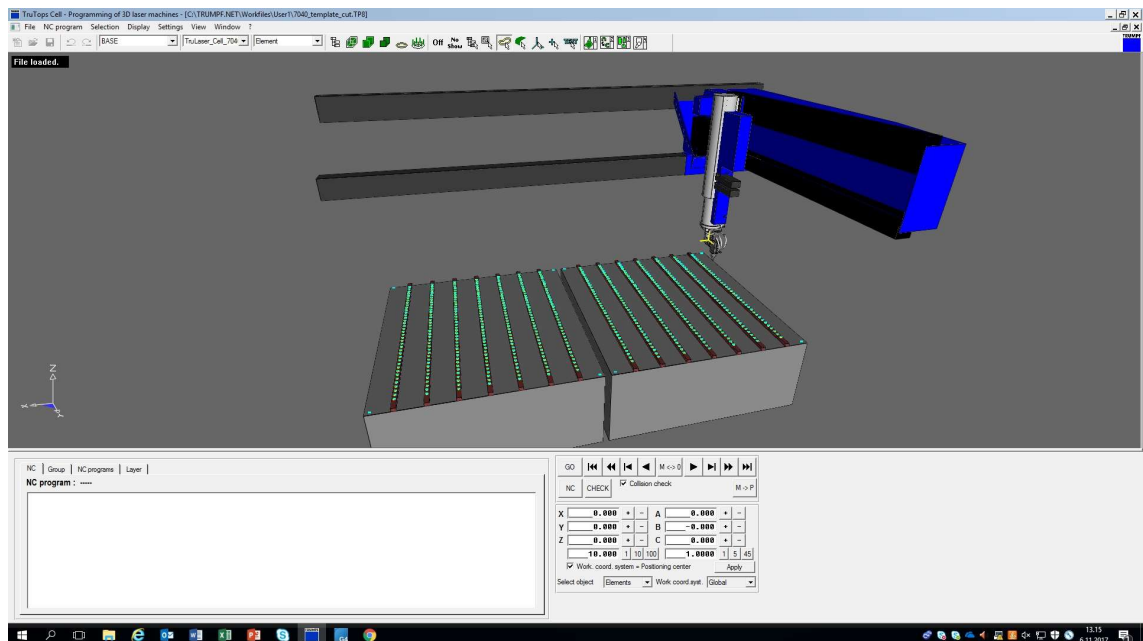
5.2.2 TruTops Cell

Nykyään 2D-laserleikkauksesta on tullut jo arkipäivää ja kilpailu on äärimmäisen kovaa ja hinnat edullisia. Niinpä High Metal Oy:n kaltaiselle yritykselle onkin kannattavaa hyödyntää täysin uuden työstökoneen mahdollisuudet myös 3D-leikkauksessa, ja tätä varten yritykseen hankittiin TruTops Cell -ohjelma helpottamaan ja nopeuttamaan kolmiulotteisten työstöohjelmien laatimista. Markkinoilla on myös muita Trumpfin lasereille sopivia CAM-ohjelmia, kuten Radm-ax, act/cut 3d ja Cenit fasttrim. Kuitenkin Trumpfin oman ohjelman hankkiminen on perusteltua, koska ohjelma on kehitetty juuri heidän koneilleen ja varsinkin simulointi on huomattavasti havainnollisempaa kuin muilla ohjelmilla, koska työstökone ja työstöoptiikat ovat juuri sellaisia kuin todellisuudessakin. Myös ohjelman käyttökoulutuksessa kouluttajana oli Trumpfin oma työntekijä, joka tunsikin myös fyysisen työstökoneen läpikotaisin.

TruTops Cell on Trumpfin kehittämä offline CAM-ohjelma, joka on tarkoitettu kolmiulotteisten laserleikkaus- ja laserhitsausohjelmien laatimiseen. Offline tarkoittaa sitä, että ohjelmoija voi työstää ohjelmia erillisellä tietokoneella riippumatta siitä, mitä itse työstökoneella tehdään. Tämä on merkittävä etu verrattuna esimerkiksi opettamalla ohjelmointiin.

Trutops Cell mahdollistaa työstörajojen luomisen suoraan CAD-mallista, jolloin monimutkaisetkin muodot onnistuvat suhteellisen helposti. Ohjelmoija voi myös simuloida ja muokata työstörataa haluamallaan tavalla. Ohjelma tukee kaikkia yleisimpiä tiedostomuotoja, joten erillistä kääntäjää ei tarvita.

Ohjelmaan voidaan importoida mikä vain Trumpfin työstökone ja työstöpää (kuva 12), jolloin simulointi on todenmukaista ja havainnollistavaa. Myös leikkaus- ja hitsausparametrit voidaan määrittellä suoraan ohjelmassa.

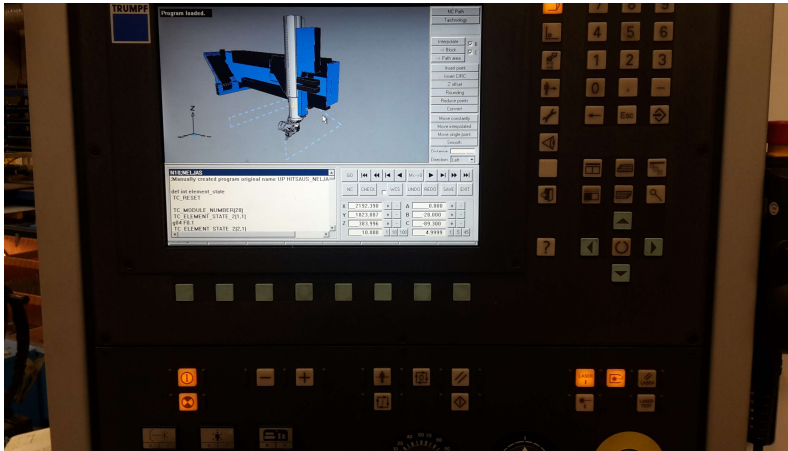


Kuva 12 Trutops Cell -ohjelma High Metal Oy:n työstökoneella ja leikkausoptiikalla

5.2.3 TruTops Basic

Kolmiulotteiset tuotteet ovat tyypillisesti muovattuja, jolloin niiden muodot eivät välttämättä koko tuotteen osalta vastaa täysin CAD-kuvaa. Työstökoneessa on automaattinen korkeudenseurantatoiminto, joka pitää leikkaussuuttimen oikealla etäisyydellä kappaleen pinnasta. Jos leikkaussuuttimen seuraama pinta eroaa liikaa ohjelmoidusta radasta, muuttuu koneessa oleva contourcheck-osoitin punaiseksi. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että työstörajoja on korjattava vastaamaan työstökappaleen todellisia muotoja. Pienimuotoiset korjaukset onnistuvat kätevästi työstökoneen omalta näytöltä, eikä ohjelman alkuperäistä tekijää välttämättä tarvita tekemään muutoksia. TruTops Basic (kuva 13) on kuitenkin hyvin karsittu versio TruTops Cellistä ja siitä löytyvät vain perustoiminnot. Myös

visuaalinen ilme on huomattavasti pelkistetympi. Suuremmat muutostyöt onkin helpompi tehdä tietokoneella TruTops Cellillä.



Kuva 13 TruTops Basic työstökoneen näytöllä

6 Suunnittelu lasertyöstön kannalta

Parhaiten lasertyöstön mahdollisuuksia voidaan hyödyntää uusissa tuotteissa, jolloin tuotteen valmistusta voidaan tarkastella yhtenä kokonaisuutena materiaalivalinnasta tuotesuunnittelun ja valmistuksen kautta tuotteen toimitukseen. Tällaisessa kokonaisvaltaisessa tarkastelussa voidaan kaikki lasertyöstön mahdollisuudet hyödyntää tuotteen suunnittelussa. [4, s. 231.]

High Metal Oy:n suunnittelijoilla on jo pitkä kokemus lasertyöstettävien tuotteiden suunnittelusta ja lasertyöstö onkin yksi yrityksen tuotannon kulmakivistä. Tämän kappaleen tarkoituksena on herättää ajatuksia suunnittelijoissa ja toimia ”käsikirjana” uusille suunnittelijoille ja myyjille, joilla ei vielä ole kokemusta lasertyöstöstä ja sen mahdollisuuksista.

6.1 Laserleikkaus

Laserleikkauksen etuja joihinkin muihin perinteisiin leikkausmenetelmiin verrattuna [6, 5-34]:

- Kosketukseton leikkaus, jolloin työkappaleeseen ei kohdistu muita voimia kuin lämmön aiheuttama.
- Muodon vapaus. Leikkausprosessin kannalta ei ole suurta merkitystä leikkausrajojen muodolla, vaan kaikki muodot voidaan ajaa samalla työkalulla.
- Laserilla voidaan leikata niin suuria, kuin erittäin pieniäkin kappaleita ja monimutkaisia muotoja.
- Tarkkuus. Leikkausrailon leveys on hyvin pieni ja se voidaan pitää vakiona. Jopa 0.05 mm:n toleransseihin voidaan päästä sarjatuotannossa.
- Suuri leikkausnopeus.
- Suuresta energiatiheydestä johtuen HAZ voidaan pitää hyvin pienenä. Jopa 0.1—0.2 mm:n karkaisusyvydet ovat mahdollisia.
- Lämmöntuonti kappaleeseen on vähäistä, jolloin myös muodonmuutokset jäävät vähäisiksi.
- Useimpia terästyypppejä voidaan leikata ilman pursetta, jolloin jälkityöstön tarve on vähäinen.

Laserleikkauksen edut voidaan hyödyntää tehokkaimmin, kun kaikki prosessin mahdollisuudet tunnetaan ja ne osataan hyödyntää tuotteen valmistuksessa. Laserleikkauksen hyödyntäminen tuotesuunnittelussa mahdollistaa tyypillisesti lopputuotteen, joka on entistä tuotetta edullisempi, mahdollistaa tuotteen käyttötarkoituksen toteuttamisen uudella tavalla ja tarjoaa loppuasiakkaalle lisäarvoa. [4, s. 235.]

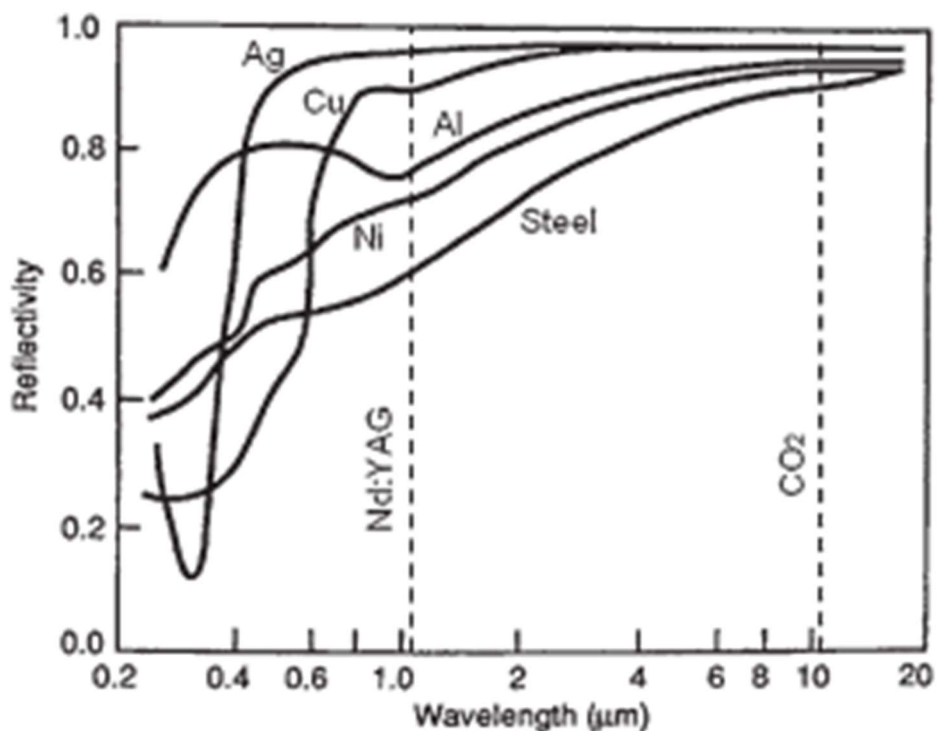
Laserleikkauksen suurimmat hyödyt tuotesuunnittelijan kannalta ovat tarkkuus ja nopeus, sekä muotojen vapaus. Muodon valinnan helppous voidaan hyödyntää esimerkiksi kokoonpanoa helpottavilla olakkeilla ja koloilla. Näiden lisääminen kappaleeseen ei juurikaan vaikuta tuotteen hintaan, pois lukien reiät, joiden määrä kannattaa minimoida, koska ne hidastavat leikkausta lävistyksien takia. Laserleikkauksessa voidaan toleranssi säätää laitteistoparametrien kautta niin, että esimerkiksi haluttu ahdistusovite saadaan aikaan. [4, s. 235.]

Johtuen kappaleiden nopeasta ohjelmoinnista ja leikkauksesta, myös erilaisten tuotevariaatioiden kokeileminen ja prototyyppien tekeminen on nopeaa ja verrattain edullista.

6.1.1 Materiaalien laserleikattavuus hiilidioksidilaserilla

Laser soveltuu hyvin erilaisten materiaalien leikkaukseen. Leikkauksen mekanismi ja suorituskyky vaihtelevat eri materiaaleilla, johtuen niiden erilaisista ominaisuuksista. Yhdenä tärkeimmistä leikkaukseen vaikuttavista materiaalin ominaisuuksista voidaan pitää absorptiota. Usein absorptio mittarina käytetään materiaalin heijastavuutta, joka kuvaa absorboitumatonta osaa säteestä. [2, s.193; 4, s. 261.]

Kuvassa 14 on esitetty eri materiaalien heijastavuutta eri lasersäteiden aallonpituuksilla. Kuvaan on merkitty sekä Nd:YAG-laserin aallonpituus 1,06 μm , että CO₂-laserin aallonpituus 10,6 μm . Kuvasta voidaan havaita, että Nd:YAG-laserin aallonpituus soveltuu paremmin erittäin heijastavien materiaalien työstämiseen. Jos kuvaajan pystysarakkeessa oleva heijastavuus saavuttaa arvon 1.0, tarkoittaa se, että säteen kaikki energia heijastuu pois materiaalin pinnasta, eikä työstöön jää energiaa käytettäväksi.



Kuva 14 Lasersäteen aallonpituuden vaikutus heijastavuuteen [2, s. 37]

Hiiliteräkset

Hiiliteräkset soveltuvat yleisesti ottaen erittäin hyvin laserleikkaukseen. Hiiliteräksiä leikkattaessa käytetään yleensä leikkauskaasuna happea. Happi aiheuttaa leikkausprosessissa eksotermisen reaktion, joka tuo prosessiin lisäenergiaa ja mahdollistaa suuremmat leikkausnopeudet.

Ruostumattomat teräkset

Myös ruostumattomat teräkset soveltuvat hyvin laserleikkaukseen. Happileikkaus ei ole käytössä ruostumattomien teräksien leikkauksessa, koska ruostumattomissa teräksissä olevat seosaineet haittaavat hapettumista. Myöskään hapettunut reuna ei useinkaan ole toivottava ruostumattomien teräksien käyttökohteissa. Tästä syystä ruostumattomien teräksien leikkauksessa käytetään yleensä leikkauskaasuna typpeä. Typpileikkauksessa syntyvien leikkauspintojen korroosionkesto on vastaava kuin perusaineella ja ne ovat hitsattavissa sellaisenaan. [4, s. 263.]

Ruostumattomia teräksiä voidaan leikata myös käyttämällä leikkauskaasuna happea. Materiaalin sisältämä kromi tuo lisäenergiaa hapettumisreaktioon verrattuna teräkseen. Kuitenkin happi muodostaa kromin kanssa sulan pinnalle suojaavan Cr_2O_3 -pinnan, joka estää sulan hapettumisen pidemmälle. Johtuen matalasta leikkauskaasun paineesta ja Cr_2O_3 -kalvolla peittyneen sulan pintajännityksestä osa sulasta jää leikkauspinnan alareunaan kiinni. Tämän vuoksi leikkauks jälki on yleensä heikompi kuin tyypileikkauksella saavutettava leikkauks jälki. [2, s. 193.]

Alumiini- ja titaaniseokset

Alumiiniseoksia leikattaessa suurimpia ongelmia voivat aiheuttaa lasersäteen suuri heijastavuus CO_2 -laserin valon aallonpituudella, sekä alumiiniseosten hyvä lämmönjohtavuus. Alumiiniseoksia leikattaessa käytetään yleensä leikkauskaasuna typpeä. Titaaniseoksia leikataan tyypillisesti heliumilla tai argonilla. Titaania leikattaessa typpi ei ole inertti kaasu, vaan se reagoi voimakkaasti titaanin kanssa, jolloin leikkauslaatu on huono. [4, s. 266.]

Hyvin heijastavat materiaalit

Leikattaessa hyvin heijastavia materiaaleja, kuten kuparia, messinkiä tai seostamatonta alumiinia voivat lasersäteen heijastukset aiheuttaa vahinkoa säteen ohjaukselle, leikkauks päälle tai resonaattorille. Näitä materiaaleja leikattaessa Trumpf käskee käyttöohjeessaan ottamaan seuraavat asiat huomioon:

- Leikkauskaasuna on käytettävä aina happea, ei koskaan typpeä.
- Leikkausparametrien maksimiarvoja ei tule käyttää, varsinkaan leikkauksenopeuden.
- Ennen kuparin leikkausta pitää konsultoida Trumpfia ja leikkauksen täytyy olla koko ajan valvottua.

Polymeerit

Useimmat muovimateriaalit absorboivat hyvin CO₂-laserin valon aallonpituutta 10,6 µm, joten ne soveltuvat hyvin laserleikkaukseen. Materiaalinpoistomekanismi polymeerejä leikattaessa on yleensä sulattavaa, höyrystävää tai kemiallisia sidoksia hajottavaa. Jokin näistä mekanismeista dominoi, riippuen leikattavasta materiaalista. [2, s. 197.]

Huom! TRUMPF kieltää muovimateriaalien leikkaamisen toimittamillaan lasertyöstökoneilla, johtuen leikkauksen mahdollisesti synnyttävistä myrkyllisistä kaasuista. [6, 5-36.]

Lasit ja keraamit

Keraameja ja laseja pidetään yleensä kovuutensa ja haurautensa vuoksi vaikeasti työstettävänä perinteisillä työstömenetelmillä. Laserleikkausprosessissa materiaalin kovuus ei ole ongelma. Keraameja voidaan läpileikkauksen lisäksi leikata niin kutsutulla naarmutustekniikalla. Naarmutuksessa materiaalin pintaa naarmutetaan valitusta kohdasta pulssilaserilla, minkä jälkeen se murretaan mekaanisesti. [4, s. 271; 2, s. 198.]

Useat lasilaadut absorboivat tehokkaasti hiilidioksidilaserin aallonpituutta, joten ne soveltuvat leikattavaksi hiilidioksidilaserilla. Useimmiten lasien leikkauksen rajoituksena on leikkaurailon ympäristön mikro- ja makrohalkeilu. Halkeilua voidaan ehkäistä kappaleen esilämmityksellä tai käyttämällä hyvin lämpöä kestäviä lasilaatuja. [4, s. 272.]

Orgaaniset materiaalit

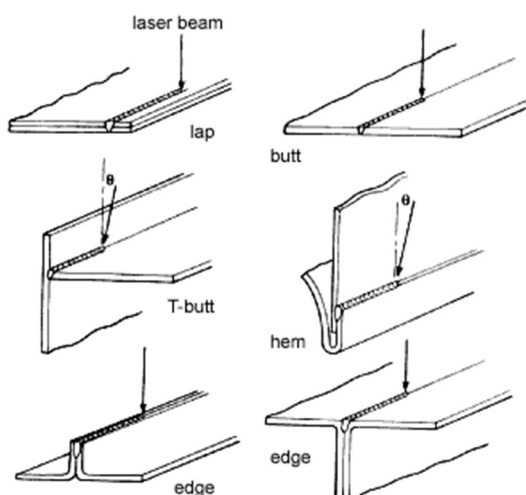
Hiilidioksidilaserilla voidaan leikata myös useita orgaanisia materiaaleja, kuten puupohjaisia materiaaleja ja nahkaa. Eräät ensimmäisistä laserleikkauksen teollisista sovelluksista olivat vanerin leikkausta. Selluloosapohjaisia materiaaleja leikataan tyypillisesti samalla mekanismilla kuin muoveja, eli kemiallisella hajottamisella. [4, s. 275.]

6.2 Laserhitsaus

Suunniteltaessa laserhitsattavia tuotteita, on määritettävä saumalle asetettavat vaatimukset. Jotta hitsaus voidaan suorittaa optimaalisella tavalla, on seuraavia asioita syytä ottaa huomioon:

- Mikä saumageometria sopii parhaiten työkappaleelle ja mitä vaatimuksia saumalle asetetaan?
- Kuinka paljon esivalmisteluja vaaditaan sauman optimaaliseen hitsaamiseen?
- Tarvitseeko liitoksen olla kaasu- ja/tai vesitiivis?
- Kuinka paljon lämmöntuontia työkappaleelle sallitaan?

Suunnittelija voi useimmiten valita liitostyyppin tuotteen funktioiden mukaisesti. Tällöin voidaan valita esimerkiksi valmistuksen kannalta paras liitostyyppi. Laserhitsin kapeus antaa mahdollisuuksia sijoittaa sauma ahtaaseen paikkaan, lähelle kulmaa tai lämmölle herkkää osaa. Tärkeimmät laserhitsauksen liitostyypit ovat päittäis-, laippa-, päällekkäis- ja T-liitokset. [4, s. 174.] Kuvassa 15 on havainnollistettu joitain laserhitsaukseen hyvin soveltuvia liitostyyppejä.

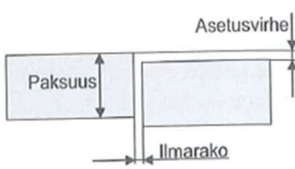


Kuva 15 Erilaisia liitostyyppejä [9]

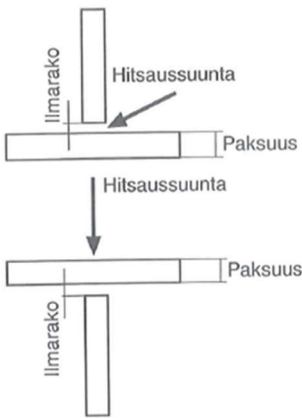
Laserhitsaus asettaa huomattavasti tiukemmat vaatimukset railojen toleransseille kuin perinteiset kaarihitsausmenetelmät. Fokusoitu lasersäde on niin pieni, että se mahtuu pienestäkin ilmaraosta läpi sulattamatta kappaleita. Kuvassa 16 on esitetty ohjearvoja erilaisten hitsausliitosten ilmaraolle ja asetusvirheelle.

Paksuus, s [mm]	Ilmarako, b [mm]	Asetusvirhe, t [mm]
0,5	0,025	0,075
0,7	0,04	0,11
1,0	0,05	0,15
2,0	0,10	0,30
4,0	0,12	0,40
5,0	0,15	0,50
6,0	0,18	0,60
8,0	0,24	0,80
10,0	0,30	1,00

Liitospinnan pinnankarheus: 12,5- 25 µm
Säteen sallittu poikkeama liitoksen keskeltä: 0,1 – 0,5 mm



Pienahitsi	
Paksuus [mm]	Ilmarako [mm]
2	0,10
4	0,15
6	0,20
10	0,25



Limihitsi	
Paksuus [mm]	Ilmarako [mm]
2	0,10
4	0,20
6	0,25
10	0,30

Kuva 16 Ohjearvoja laserhitsausliitosten valmisteluun [4, s. 243]

6.2.1 Hiilidoksidilaserilla hitsattavat materiaalit

Teräksen laserhitsattavuus riippuu suurimmilta osin sen hiilipitoisuudesta. Teräkset joiden hiilipitoisuus on alle 0,25 %, soveltuvat hyvin laserhitsaukseen. Hitsattavuus heikenee hiilipitoisuuden kasvaessa aina 0,35 %:iin asti, koska hiili aiheuttaa hitsisauman karvenemisen, joka voi aiheuttaa halkeamia, kun sauma jäähtyy. Tätä voidaan ehkäistä kappaleen esilämmityksellä. Terästä, jonka hiilipitoisuus on yli 0,35 %, ei voi hitsata hyvin lainkaan.

Krominikkeliteräksiä voidaan yleensä hitsata erittäin hyvin ja suuremmilla nopeuksilla, johtuen niiden pienemmästä lämmönjohtavuudesta. Suojakaasua käyttämällä saadaan aikaan oksidivapaa sauma.

Ei-rautametalles ja jalometalles ei tyypillisesti voida hitsata CO₂-laserilla kovinkaan hyvin, johtuen niiden huonommasta absorptiosta CO₂-laserin aallonpituudella. Näiden hitsaamiseen Nd:YAG -laser soveltuu paremmin. [6, 5-19.]

Titaaneja ja titaaniseoksia voidaan hitsata hyvin laserilla. Ne kuitenkin reagoivat voimakkaasti ilmassa olevan hapen ja typen kanssa, joten hitsaus edellyttää erittäin hyvää kaasusuojausta.

6.3 Lasermerkkkaus

Lasermerkkkaus on yleisesti käytössä teollisuudessa, ja sillä voidaan esimerkiksi yksilöidä tuotteita tai tehdä logoja. Luonteenomaista lasermerkkkaukselle on selvärajainen jälki, jonka kontrasti riippuu käytettävästä materiaalista ja lasertehosta. [4, s.206.]

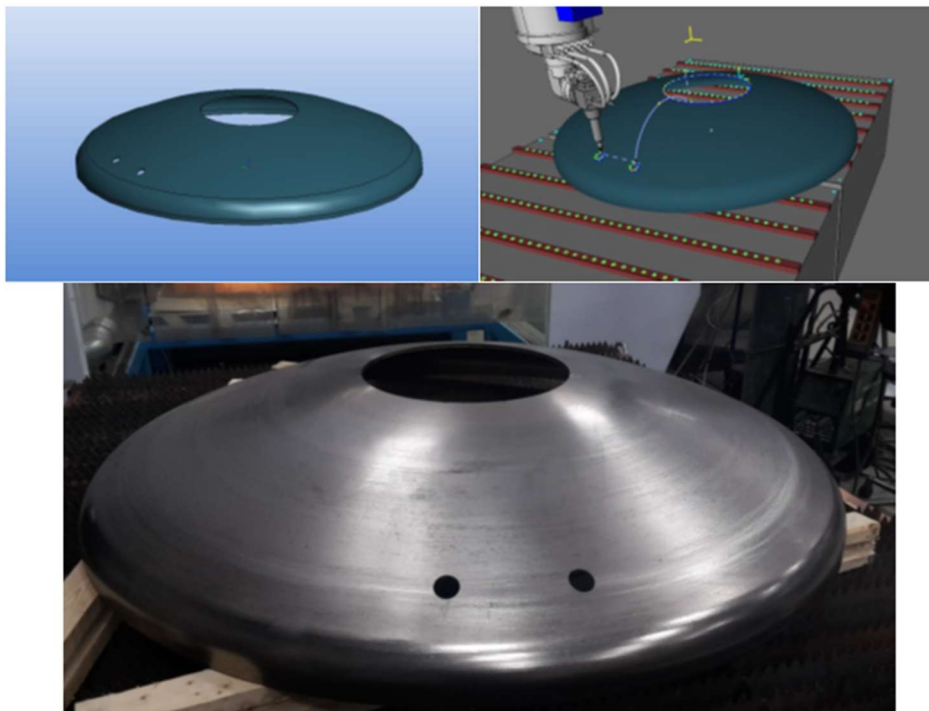
Hiilidioksidilaser soveltuu hyvin orgaanisten materiaalien merkkaukseen. Muovimateriaaleista esimerkiksi PVC ja PET soveltuvat hyvin lasermerkkaukseen hiilidioksidilaserilla. [4, s. 296.]

Esimerkiksi ruostumattomalla teräksellä merkkausjälki on hyvin kirkas ja vaikeasti erotettavissa. Tähän tarkoitukseen on saatavilla erilaisia aineita, jotka levitetään merkattavalle pinnalle ennen merkkausta, ja aine yhdessä lasersäteen kanssa saa aikaan selvästi erottuvan, tumman merkkauksen.

7 Kolmiulotteinen lasertyöstö TruTops Cellin avulla

Viisiakselinen lasertyöstökone yhdessä TruTops Cell CAM -ohjelman kanssa avaavat yritykselle sekä suunnittelijoille uusia mahdollisuuksia kolmiulotteisten kappaleiden työstämiseen. Parhaimmillaan kolmiulotteinen laserleikkaus on syvävedettyjen, hydromuovattujen ja painosorvattujen tuotteiden trimmaamisessa sekä reikien aukottamisessa. Esimerkiksi autoteollisuus hyödyntää laajasti kolmiulotteista laserleikkausta auton korin ohutlevyosien viimeistelyyn ja räätälöintiin. Samasta aiheesta voidaan räätälöidä useita eri tuotevariaatioita yksinkertaisesti ja nopeasti luomalla useita eri ohjelmia.

Esimerkiksi syvävedetyn ohutlevytuotteen kolmiulotteiseen laserleikkaukseen tarvitaan yksinkertainen kiinnitin, CAD-malli sekä CAM-ohjelma. Kuvassa 17 on esimerkkinä painosorvatun säiliön päädyn aukotus TruTops Celliä apuna käyttäen. Ensimmäisenä on CAD malli halutusta lopputuloksesta, toisena simuloitu työstörata ja viimeisenä aukotettu säiliön pääty.



Kuva 17 Säiliön päädyn aukotus

7.1 Muovatut ohutlevytuotteet

Muovatuilla ohutlevytuotteilla voidaan korvata esimerkiksi usein toistuvia kotelomaisia rakenteita, jotka aukotetaan ja viimeistellään laserilla. Suurissa erissä voi olla perusteltua miettiä, kumpi tulee halvemmaksi, perinteinen menetelmä, joka sisältää leikkauksen, särmäyksen, kokoonpanohitsauksen ja viimeistelyn, vai muovaus ja laserilla viimeistely. Muovaavilla menetelmillä tuotteisiin voidaan lisätä myös monimutkaisempia muotoja toiminnallisuuden tai ulkonäön takia.

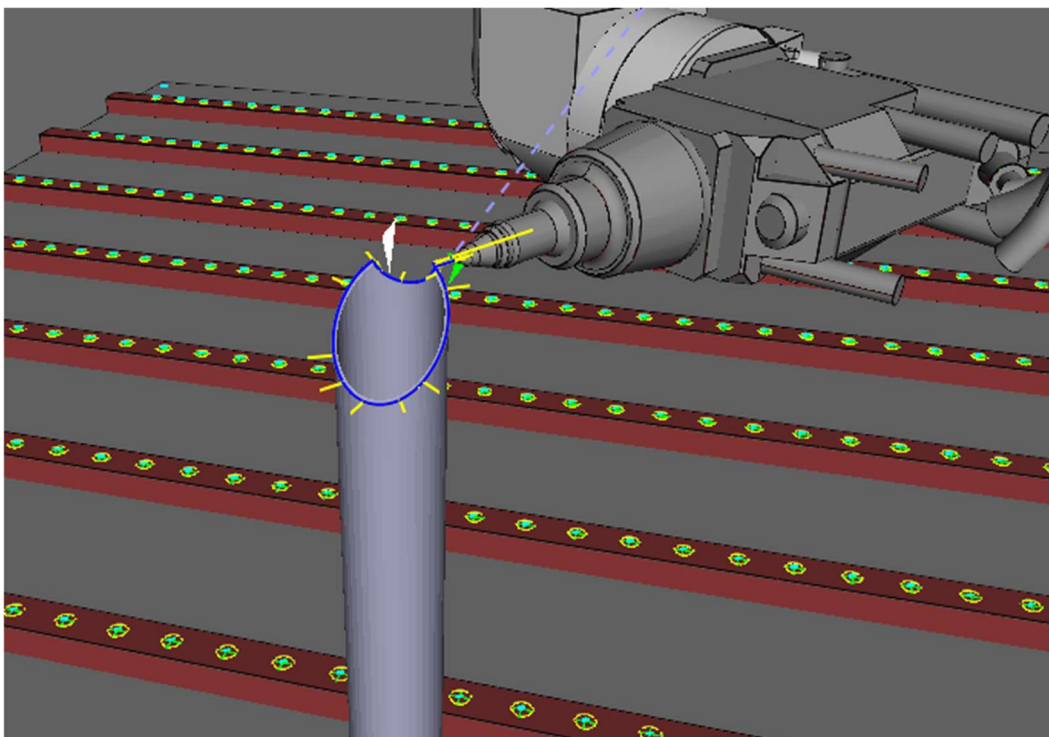
Myös muovattujen ohutlevytuotteiden viimeistely voi itsessään olla palvelu, jota yritys myy ulkopuolelle. TruTops Cell mahdollistaa nopeiden leikkausohjelmien laatimisen ja muokkaamisen eri variaatioille. Myös tuotekohtaisten edullisten kiinnittimien valmistaminen onnistuu nopeasti ja helposti TruTops Cellilla.

7.2 Putkien ja profiilien työstäminen

Tavallisesti teollisuudessa käytettävissä putken laserleikkaussovelluksissa työstökone on varustettu putkea pyörittävällä lisäakselilla, joka mahdollistaa putken ympäri leikkauksen. Pyöröakseli on tyypiltään CNC-kiertoakseli (A-akseli), jonka keskellä on vapaa läpi kulkeva aukko ja joka on varustettu kiinnityslaitteella tai hampailla.

High Metal Oy:llä ei ole tällä hetkellä käytössään tällaista pyöröakselia, mutta viisiakselinen lasertyöstökone yhdessä CAM-ohjelman kanssa mahdollistaa monimutkaisienkin muotojen työstämisen putkiin ja profiileihin. Tästä voi olla hyötyä esimerkiksi yksittäisten putkiosien ollessa kyseessä tai prototyyppejä kokeillessa.

Jos putki halutaan leikata keskeytyksettä kokonaan ympäri, on se asetettava koneeseen pystyyn, mikä asettaa rajoituksia putken pituudelle. Kuvassa 18 on havainnollistettu tapaa, jolla putkia voi työstää ilman pyöröakselia.



Kuva 18 Putken työstö

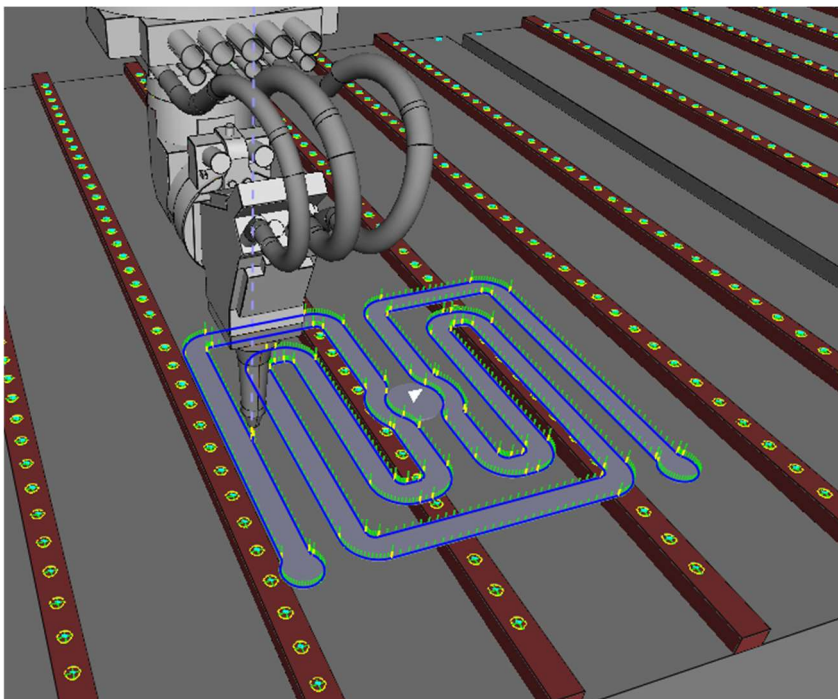
7.3 Kaksiulotteiset ohjelmat TruTops Cellilla

Joskus myös kaksiulotteiset hitsausradat voivat olla niin monimutkaisia ja pitkiä, että niiden ohjelmoiminen käsin ei ole riittävän tarkkaa tai tehokasta ja se on myös operaattorille erittäin työlästä.

Tähän asti tällaiset monimutkaiset kaksiulotteiset hitsausradat on tehty Nestix-ohjelmaa käyttäen, joka luo työstöradasta leikkausohjelman. Tämän jälkeen operaattori on käsin muokannut syntyneestä leikkausohjelmasta hitsausohjelman.

Ohjelmasta riippuen, NC-ohjelmasta korjattavien rivien määrä voi olla hyvinkin suuri, jolloin virheen todennäköisyys lisääntyy ja operaattorilta menee aikaa ohjelman laatimiseen ja työstökone todennäköisesti seisoo käyttämättömänä sillä aikaa.

Vaikka TruTops Cell onkin suunniteltu kolmiulotteisten työstöratojen laatimiseen, onnistuvat sillä tietenkin myös kaksiulotteiset työstöradat. Tällöin saadaan suoraan tuotettua hitsausohjelma, eikä työlästä muutostyötä tarvitse tehdä. Näin virheen mahdollisuudet poistuvat eikä koneen aikaa mene hukkaan, sillä ohjelma voidaan tehdä erillisellä tietokoneella koneen käydessä. Kuvassa 19 on esimerkki TruTops Cellillä tehdystä kaksiulotteisesta lämmönvaihtimen hitsausradasta.



Kuva 19 Lämmönvaihtimen hitsausrata.

7.4 Kiinnittimet

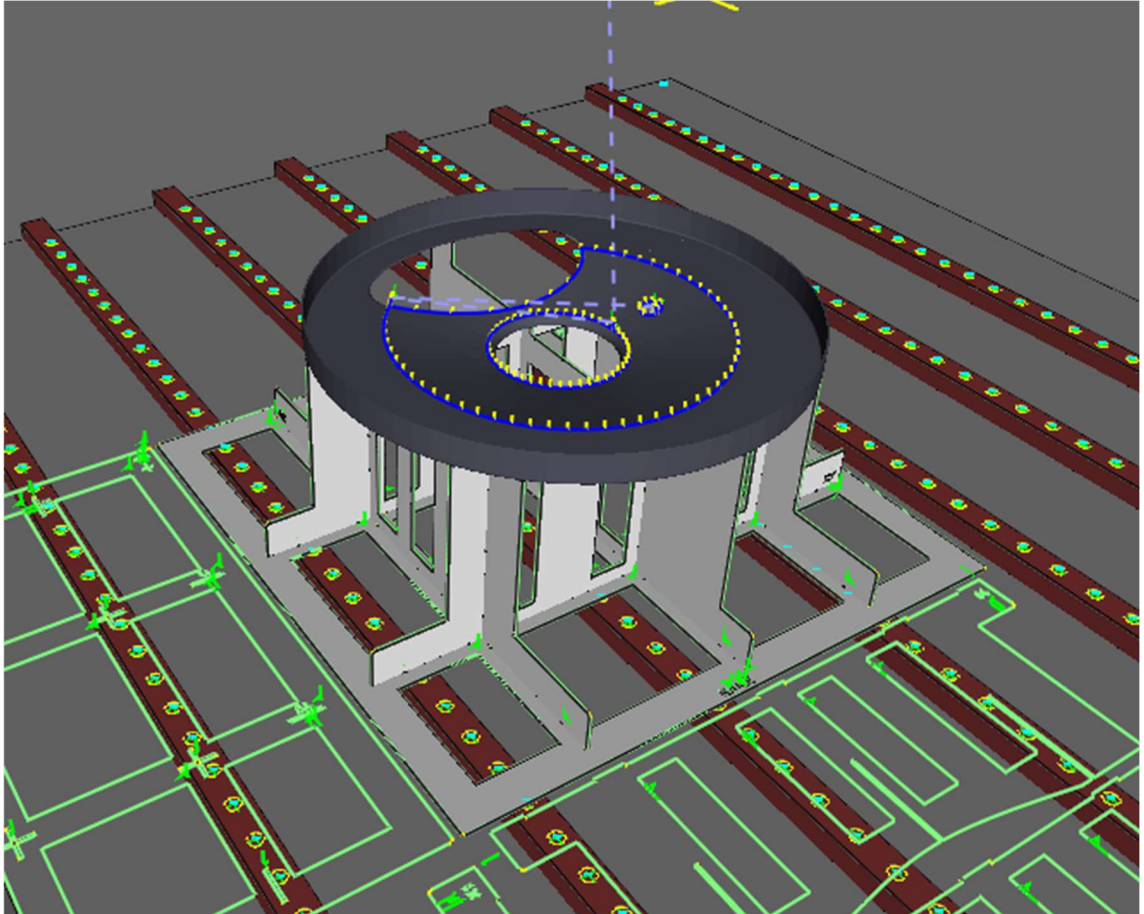
Kiinnittimillä tarkoitetaan apuvälineitä, jotka vakioivat leikkaus- ja hitsaustapahtumaa ja pitävät kappaleita paikoillaan työstön ajan.

Piensarjatuotannossa kiinnittimiltä haetaan joustavuutta ja kustannustehokkuutta. Sarjojen kasvaessa, myös kiinnittimien kestävyys korostuu entisestään. Kiinnittimien tulee olla helppokäyttöisiä ja lisätä tuotannon sujuvuutta ja läpimenoaikaa. [10]

Lasertyöstön eduiksi luetaan kosketukseton työstö sekä pieni lämmöntuonti, jolloin myös kiinnittimiltä ei vaadita niin paljon kuin esimerkiksi kaarihitsauksessa tai koneistuksessa. Yksinkertaisimmillaan kiinnitin vain asemoi kappaleen oikein työstökoneeseen nähden, eikä varsinaista kiinnipitoa tarvita.

TruTops Cell sisältää kiinnittimien valmistamiseen tarkoitetun työkalun, jolla voidaan helposti ja nopeasti luoda kustannustehokas ohutlevykiinnitin työkappaleelle, käyttämällä työkappaleen CAD-mallia apuna (kuva 20). Tämä voidaan tehdä samalla, kun luodaan varsinaiset työstöradat kappaleelle. Ohjelma luo automaattisesti kiinnittimen kokoonpanoa ohjaavia nastoja ja reikiä, jolloin kokoonpano on yksinkertaista, eikä kiinnitin yleensä vaadi kuin pientä silloittamista, jotta osat pysyvät kiinni toisissaan. Ohjelma myös tekee kiinnittimelle leikkausradat ja kiinnitin voidaan leikata samalla koneella.

Tällä tavalla ohutlevystä valmistetut kiinnittimet ovat hyvin kustannustehokkaita ja helppoja valmistaa, joten niitä voi perustellusti käyttää myös pienemmissä sarjoissa.

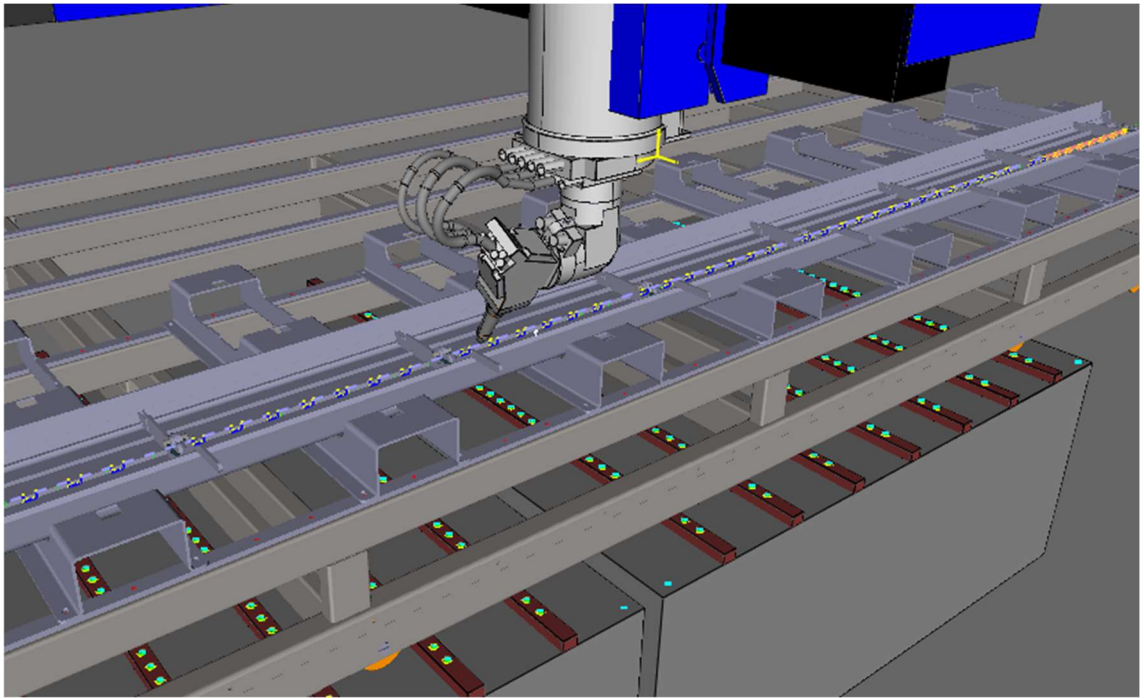


Kuva 20 TruTops Cellilla tehty kiinnitin

Joskus kuitenkin tarvitaan järeämpiä kiinnittimiä kuin TruTops Cellilla tehdyt ohutlevykiinnittimet. Kappaletta saatetaan esimerkiksi haluta pakottaa johonkin tiettyyn aloitusmuotoon tai se vaatii järeämpää kiinnipitoa esimerkiksi hitsauksen määrän vuoksi. Tällöin suunnittelijan on suunniteltava kiinnitin.

Myös suunnittelijan suunnittelemaa kiinnitintä voidaan käyttää apuna TruTops Cellissä ja tuoda ohjelmaan kaikki kiinnittimet ja kiinnitykseen käytettävä pöytä, jolloin ohjelmoija näkee paremmin lopputuloksen ja osaa tehdä ohjelmasta mahdollisimman tehokkaan. Ohjelmoija voi myös antaa laseroperaattoreille ohjeet, miten kiinnittimet asetetaan suhteessa koneeseen.

Helpoiten ohjelmointi onnistuu, jos suunnittelija toimittaa ohjelmoijalle kokoonpanon, jossa on yhdessä mallissa kaikki liittyvät komponentit, kuten työstettävä kappale, kiinnittimet ja hitsauspöytä (kuva 21).



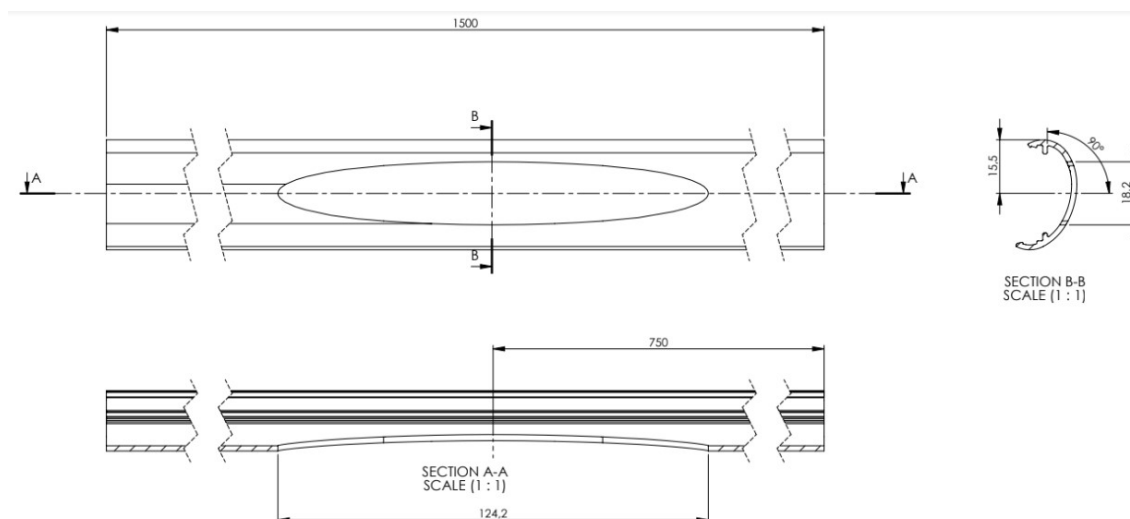
Kuva 21 Työkappale ja liittyvät kiinnittimet

Myös ohjelman nollapiste on hyvä miettiä jo suunnitteluvaiheessa. Nollapisteen paikka tulee olla jossain loogisessa paikassa, joka on helppo tavoittaa työstöoptiikalla myös todellisuudessa. Tästä on syytä keskustella myös ohjelmoijan kanssa.

Suunnittelija voi merkitä nollapisteen paikan kiinnittimeen esimerkiksi lasermerkattavalla ristillä. Tämän ristin tulee näkyä myös CAD -mallissa, jolloin ohjelmoija voi määrittää ohjelman nollapisteen kyseisen merkin kohdalle. Tällä tavalla toimittaessa operaattorin ei tarvitse tehdä muuta, kuin linjata kiinnittimet suhteessa koneen akseleihin ja ajaa työstöoptiikka lasermerkatun merkin kohdalle ja määrittää ohjelman nollapiste siihen.

8 Esimerkki TruTops Cellin käytöstä profiilin työstössä

Eräällä asiakkaalla oli tarve saada leikattua ovaalin muotoinen reikä kuvan 22 mukaiseen alumiiniprofiiliin ja profiili piti myös katkaista laserilla oikean mittaiseksi.

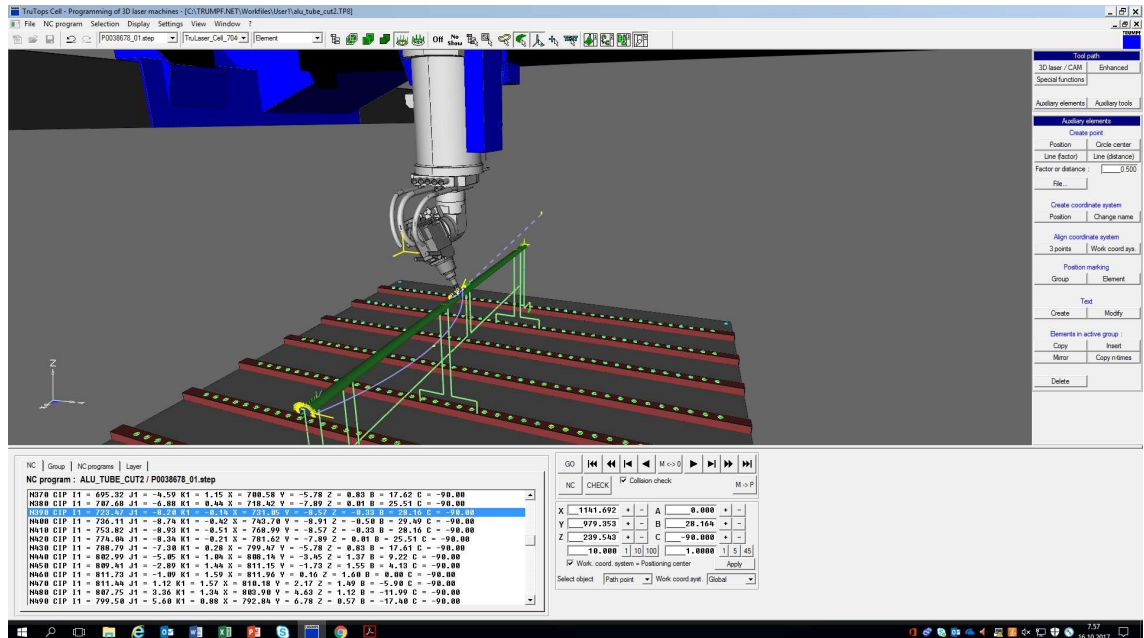


Kuva 22 Alumiiniprofiili

Kyseisen ovaalin muotoisen reiän leikkausradan ohjelmoiminen kaarevalle pinnalle olisi melko aikaa vievää, koska muoto pitäisi ensin tarkasti piirtää työkappaleeseen ja sen jälkeen opettamalla ohjelmoida työstökone. Reiän piirtämiseen tarvittaisiin todennäköisesti jonkinlainen sapluuna, jotta muoto saadaan oikein työkappaleeseen. Ohjelmoimiseen olisi kulunut paljon aikaa, varsinkin jos työstöpää halutaan pitää jatkuvasti kohtisuorassa kappaleeseen nähden, jolloin ohjelmoitavien pisteiden määrä kasvaa suureksi. Jos työstöoptiikkaa ei käännetä jatkuvasti pinnan mukana, syntyy viistoja leikkauspintoja.

Nyt, kun käytössä oli CAM-ohjelma, voitiin asiakkaalta pyytää 3D-malli halutusta kappaleesta. Asiakas lähetti mallin kappaleesta STEP-tiedostona, joka voitiin suoraan tuoda CAM-ohjelmaan. Periaatteessa mitään työkuvia ei olisi mallin lisäksi edes tarvittu.

Tämän jälkeen kappaleesta poimittiin halutut reunat ja niille luotiin työstöradat (kuva 23). Ohjelma pitää lähtökohtaisesti aina työstöoptiikan kohtisuoraan kappaleen pintaan nähden, ellei ohjelmoija halua kääntää optiikkaa johonkin muuhun asentoon. Tässä tapauksessa halusimme kohtisuorat leikkauspinnat.



Kuva 23 Alumiiniprofiili CAM-ohjelmassa

Kun työstöratoihin oltiin tyytyväisiä, määritettiin ohjelman nollapiste ja luotiin varsinainen NC-koodi työstökoneelle (liite 1). Ohjelman postprossori jakaa syntyneen koodin automaattisesti lohkoiksi (block), jolloin ohjelmasta tulee luettavampi ja halutut kohdat ovat helpompi ja nopeampi löytää. Nollapiste päätettiin asettaa pituussuunnassa profiilin päähän ja leveysuunnassa keskelle, koska se oli paikka, joka on helposti löydettävissä myös fyysisestä kappaleesta.

Kun ohjelma oli saatu valmiiksi, aseteltiin varsinainen työkappale koneeseen ja linjattiin se suoraan koneen akseleihin nähden. Linjaamisessa käytettiin apuna työstökoneen pi-lottilaseria. Koska kyseessä oli prototyypin testileikkaus, ei varsinaista kiinnitintä rakennettu, vaan työkappale asemoitiin koneeseen käyttämällä apuna erilaisia putkia ja puristimia.

Kun työkappale oli saatu paikoilleen ja linjattua, jäljellä oli enää nollapisteen määrittäminen työstökoneelle. Tässä siis ikään kuin kerrotaan työstökoneelle, että missä sijaitsee ohjelman nollapiste.

Ilman lasersädetä tapahtuvan testiajon jälkeen todettiin, että ohjelmointi vastaa haluttua lopputulosta ja ohjelma voitiin ajaa läpi lasersäteen kanssa.

Työstettävä kappale oli aineenvahvuudeltaan pääosin 2 mm:n paksuista alumiinia, mutta kuten kuvasta 22 havaitaan, ei aineenvahvuus ollut joka kohdassa vakio. Leikkausparametreina käytettiin laitetoimittajan valmiita parametritaulukoita kahden millimetrin alumiinille. Leikkausnopeus näillä parametreilla oli 8400 mm/min. Leikkausparametrit osoittautuivat niin hyväksi kyseiselle profiilille, ettei minkäänlaista jälkikäsitteilyä tarvittu.

Vaikka muodot tässä kappaleessa olivat melko hankalat, oli yllättävää, miten helposti ohjelmointi lopulta onnistui. Varsinaisen ohjelman laatiminen oli todella nopeaa verrattuna opettamalla ohjelmointiin ja työstökoneetta voitiin käyttää muuhun toimintaan ohjelmoinnin ajan.

Käytännössä eniten aikaa meni työkappaleen linjaamiseen työstökoneeseen nähden. Tämä pitää tehdä huolella, koska jos kappale on suhteessa koneeseen eri asennossa kuin ohjelma, ei lopputulos ole halutunlainen. Tämä tietysti vältetään kunnollisilla kiinnittimillä, jotka asemoivat kappaleen oikein.

Mahdollista olisi myös tehdä siten, että kappale asetetaan ensin koneeseen vapaasti valittuun paikkaan ja asentoon, jonka jälkeen työstöoptiikka ajetaan kolmeen helposti saavutettavaan kohtaan kappaleesta (esimerkiksi reiät ja kulmat). Nämä kolme pistettä tallennetaan ja viedään CAM-ohjelmaan. Pisteiden avulla virtuaalinen ohjelma asemoidaan vastaamaan todellisen kappaleen asentoa työstökoneessa. Tässä tapauksessa tämä olisi ollut huonompi vaihtoehto, koska kappale oli muodoiltaan sellainen, että selkeitä nurkkia tai reikien keskipisteitä ei ollut.

Työstökoneen suuren työalueen ansiosta vastaavia profiileita voitaisiin asettaa koneeseen useita rinnakkain ja peräkkäin, jolloin yhdellä asetuksella leikattaisiin monta kappaletta ja läpimenoaikoja saataisiin laskettua merkittävästi.

9 Yhteenveto ja pohdinta

Vaikka minulla onkin jo usean vuoden kokemus lasertyöstöstä kolmiulotteisella työstökoneella, oli CAM -ohjelmalla tapahtuva lasertyöstökoneen ohjelmointi minullekin uutta. Uuden työstökoneen hankinta ja sen mahdollisuuksien tutkiminen pakottivat perehtymään hieman syvemmin koneen toimintoihin ja varsinkin CAM-ohjelmaan. Ohjelman itseopiskelu manuaaleja käyttäen olisi ollut liki mahdotonta, joten ohjelman toimittajan tarjoama käyttökoulutus oli erittäin tärkeä.

Tulevaisuudessa CAM -ohjelmaa tulisi käyttää niin usein kuin mahdollista, jotta ohjelman käyttö pysyy luontevana ja toiminnot jäävät pysyvästi muistiin. Myös muille tuotannossa työskenteleville laseroperaattoreille voisi olla hyödyllistä kouluttaa ainakin TruTops Basic, jolloin he voisivat käyttää sitä kolmiulotteisten ohjelmien pienimuotoiseen muokkaukseen, eikä ohjelman alkuperäistä laatijaa välttämättä tarvittaisi.

Jotta uudesta koneesta saadaan paras mahdollinen hyöty irti, on myös myyjien ja suunnittelijoiden syytä ymmärtää, millainen uusi kone on ja mitä kaikkea sillä voi tehdä uuden CAM -ohjelman kanssa.

Uusi laitejärjestelmä vie yrityksen kyvyn työstää kolmiulotteisia ohutlevy tuotteita täysin uudelle tasolle, jolloin on mahdollista esimerkiksi käyttää enemmän muovattuja ohutlevy tuotteita tai tarjota asiakkaille muovattujen tuotteiden trimmaus- ja aukotuspalvelua.

Työn tarkoituksena oli tutkia CAM-ohjelman avulla tapahtuvan työstön uusia mahdollisuuksia yrityksessä, ja joitain uusia ideoita siihen tulikin. Tärkeää kuitenkin on, että kaikki yrityksessä ymmärtävät uuden koneen mahdollisuudet, jolloin ideoita voi tulla mistä vain.

Kaikkein tärkeimpänä yrityksen kannalta tässä insinööriyössä pidän kuitenkin itse ohjelmaan perehtymistä ja sen käytön opettelemista, ja tähän tavoitteeseen päästiin. Nyt yrityksellä on henkilö, joka osaa käyttää ohjelmaa ja työstökonetta ja toimii myös suunnittelijana, jolloin on hyvät lähtökohdat toimia suunnittelun ja tuotannon välisenä linkkinä.

Lähteet

- 1 High Metal Oy. 2018. Verkkodokumentti. <http://www.highmetal.fi/yritys/>. Luettu 12.3.2018.
- 2 Dahotre, Narendra & Harimkar, Sandip. 2008. Laser Fabrication and Machining of Materials. New York: Springer
- 3 Steen, William & Mazumder, Jyotirmoy. 2010. Laser Material Processing. New York: Springer
- 4 Kujanpää, Veli; Salminen, Antti & Vihinen, Jorma. 2005. Lasertyöstö. Helsinki: Teknologiainfo Teknova.
- 5 SSAB luentokalvot. 2018. Verkkodokumentti. <http://www.shy-hitsaus.net/LinkClick.aspx?fileticket=8D4A6mAVJWU%3D&tabid=4864>. Luettu 21.2.2018.
- 6 Trumpf GmbH+Co. 2016. Technical information, Laser machining. Ditzingen: Trumpf GmbH+Co.
- 7 Ionix. 2017. Verkkodokumentti. <http://www.ionix.fi/fi/teknologiat/lasertyosto/hybridihitsaus>. Luettu 31.10.2017.
- 8 Trumpf GmbH+Co. 2017. Käyttöohje, TruLaser Cell Sarja 7000. Ditzingen: Trumpf werkzeugmaschinen GmbH+Co.
- 9 TWI. 2017. Verkkodokumentti. <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/laser-welding-automotive-steel-and-aluminium-july-2000> . Luettu 11.12.2017
- 10 Solehmainen, Kari; Tuunainen, Aku; Räsänen, Miika & Jääskeläinen, Esa (toim.). 2016. Hitsauskiinnitin vai joustava hitsauskiinnitin. Hitsauksen laadunhallinta ja kiinnitintekniikka (HIKI) projektin loppuraportti. Kuopio: Savonia ammattikorkeakoulu.

Esimerkki TruTops Cellilla luodusta NC-koodista

```
BD
C
BEGIN_EINRICHTEPLAN_INFO
C
ZA,MM,2
MM,AT,1, 60,1,1,,,,,T
MM,AT,1,170,1,1,,,,,T
C
ZA,DA,1
DA,'ALU_TUBE_CUT2',1
C
ENDE_EINRICHTEPLAN_INFO
C
BEGIN_PROGRAMM
C
ZA,MM,4
MM,AT,1, 10,1,1,,,,,T
MM,AT,1, 20,1,1,,,,,T
MM,AT,1, 30,1,1,,,,,T
MM,AT,1, 40,1,1,,,,,Z
C
ZA,DA,1
DA,'ALU_TUBE_CUT2','HP','',0.0
START_TEXT
N10;ALU_TUBE_CUT2
N20;----- TruTops Cell   VERSION 8.00
N30;Control Software Version TruLaser Cell 8.0
N40 TC_RESET
N50 G71
N60 TC_USERDYN(4.0,4.0); OVL, ACC
N70 TC_DYNAMIC_LEVEL(0)
N80 TC_OST(5.0)
N90 TC_ADC_ON(10)
N100 TC_FASTLINE_CELL_ON
N110 TRAORI(1)
N120 SET_G54( 410.64, 987.92, 239.87, 0,0,0 )
N130 F = 173000
N140;GOTOF ENTRY_LASER
N150 TRAF00F
N160 G500
N170 G01 Z = 750.00 F = 173000
N180 G01 B = 0.00 C = 0.00
N190 TRAORI(1)
N200 G54
N210; END_OF_HEADER
N220;===== BLOCK_START 1 =====
N230; LEAD_IN_START
;ENTRY_LASER:
BLOCK_1:
N240 G01 X = 739.58 Y = 9.41 Z = 10.48 B = -23.42 C = -89.90 F = 173000
N250 G01 X = 739.58 Y = 5.43 Z = 1.30 B = -23.42 C = -89.90
N260 TC_LASER_ON(11,"AL020MD-N2S-155FW60",10,100)
N270 G01 X = 739.99 Y = 8.54 Z = -0.04 B = -23.42 C = -89.90
N280 CIP I1 = 739.89 J1 = 8.81 K1 = -0.16 X = 739.48 Y = 8.99 Z = -0.24 B = -
23.42 C = -89.90
N290; LEAD_IN_END
N300 CIP I1 = 731.05 J1 = 8.70 K1 = -0.12 X = 718.42 Y = 7.94 Z = 0.17 B = -
20.41 C = -90.00
N310 CIP I1 = 711.22 J1 = 7.30 K1 = 0.41 X = 700.51 Y = 5.65 Z = 0.88 B = -
14.55 C = -90.00
```

N320 CIP I1 = 696.99 J1 = 4.88 K1 = 1.07 X = 691.84 Y = 3.19 Z = 1.37 B = -
8.40 C = -90.00
N330 CIP I1 = 690.41 J1 = 2.54 K1 = 1.46 X = 688.56 Y = 1.09 Z = 1.57 B = -
3.19 C = -90.00
N340 CIP I1 = 688.25 J1 = 0.66 K1 = 1.59 X = 688.06 Y = -0.11 Z = 1.60 B =
0.00 C = -90.00
N350 CIP I1 = 688.13 J1 = -0.64 K1 = 1.60 X = 688.52 Y = -1.33 Z = 1.57 B =
3.13 C = -90.00
N360 CIP I1 = 689.75 J1 = -2.37 K1 = 1.50 X = 691.90 Y = -3.45 Z = 1.37 B =
9.22 C = -90.00
N370 CIP I1 = 695.32 J1 = -4.59 K1 = 1.15 X = 700.58 Y = -5.78 Z = 0.83 B =
17.62 C = -90.00
N380 CIP I1 = 707.68 J1 = -6.88 K1 = 0.44 X = 718.42 Y = -7.89 Z = 0.01 B =
25.51 C = -90.00
N390 CIP I1 = 723.47 J1 = -8.20 K1 = -0.14 X = 731.05 Y = -8.57 Z = -0.33 B =
28.16 C = -90.00
N400 CIP I1 = 736.11 J1 = -8.74 K1 = -0.42 X = 743.70 Y = -8.91 Z = -0.50 B =
29.49 C = -90.00
N410 CIP I1 = 753.82 J1 = -8.93 K1 = -0.51 X = 768.99 Y = -8.57 Z = -0.33 B =
28.16 C = -90.00
N420 CIP I1 = 774.04 J1 = -8.34 K1 = -0.21 X = 781.62 Y = -7.89 Z = 0.01 B =
25.51 C = -90.00
N430 CIP I1 = 788.79 J1 = -7.30 K1 = 0.28 X = 799.47 Y = -5.78 Z = 0.83 B =
17.61 C = -90.00
N440 CIP I1 = 802.99 J1 = -5.05 K1 = 1.04 X = 808.14 Y = -3.45 Z = 1.37 B =
9.22 C = -90.00
N450 CIP I1 = 809.41 J1 = -2.89 K1 = 1.44 X = 811.15 Y = -1.73 Z = 1.55 B =
4.13 C = -90.00
N460 CIP I1 = 811.73 J1 = -1.09 K1 = 1.59 X = 811.96 Y = 0.16 Z = 1.60 B =
0.00 C = -90.00
N470 CIP I1 = 811.44 J1 = 1.12 K1 = 1.57 X = 810.18 Y = 2.17 Z = 1.49 B = -
5.90 C = -90.00
N480 CIP I1 = 807.75 J1 = 3.36 K1 = 1.34 X = 803.90 Y = 4.63 Z = 1.12 B = -
11.99 C = -90.00
N490 CIP I1 = 799.50 J1 = 5.60 K1 = 0.88 X = 792.84 Y = 6.78 Z = 0.57 B = -
17.40 C = -90.00
N500 CIP I1 = 790.60 J1 = 7.09 K1 = 0.48 X = 787.24 Y = 7.48 Z = 0.35 B = -
19.20 C = -90.00
N510 CIP I1 = 785.00 J1 = 7.70 K1 = 0.27 X = 781.62 Y = 7.94 Z = 0.17 B = -
20.41 C = -90.00
N520 CIP I1 = 773.20 J1 = 8.49 K1 = -0.04 X = 760.56 Y = 8.99 Z = -0.24 B = -
23.42 C = -90.00
N530 CIP I1 = 752.13 J1 = 9.11 K1 = -0.29 X = 739.48 Y = 8.99 Z = -0.24 B = -
23.42 C = -90.00
N540; LEAD_OUT_START
N550 TC_LASER_OFF(3)
N560 G01 X = 739.47 Y = 13.76 Z = 10.77 B = -23.42 C = -90.00 F = 173000
N570; LEAD_OUT_END
N580;===== BLOCK_END =====
N590 CIP I1 = 1035.46 J1 = 112.82 K1 = 0.53 X = 1490.13 Y = 20.70 Z = -15.20 B
= -90.00 C = -90.00
N600;===== BLOCK_START 2 =====
N610; LEAD_IN_START
;ENTRY_LASER:
BLOCK_2:
N620 G01 X = 1490.13 Y = 20.70 Z = -15.20 B = -90.00 C = -90.00 F = 173000
N630 G01 X = 1500.13 Y = 20.70 Z = -15.20 B = -90.00 C = -90.00
N640 TC_LASER_ON(11,"AL020MD-N2S-155FW60",10,100)
N650 G01 X = 1500.13 Y = 17.37 Z = -14.48 B = -90.00 C = -90.00
N660 CIP I1 = 1500.13 J1 = 17.13 K1 = -14.28 X = 1500.13 Y = 17.08 Z = -13.83
B = -90.00 C = -90.00
N670; LEAD_IN_END
N680 CIP I1 = 1500.13 J1 = 17.28 K1 = -13.22 X = 1500.13 Y = 17.50 Z = -12.29
B = -90.00 C = -90.00

N690 CIP I1 = 1500.13 J1 = 17.58 K1 = -11.65 X = 1500.13 Y = 17.62 Z = -10.69
B = -88.81 C = -90.00
N700 CIP I1 = 1500.13 J1 = 17.58 K1 = -10.05 X = 1500.13 Y = 17.43 Z = -9.10 B
= -77.88 C = -90.00
N710 CIP I1 = 1500.13 J1 = 17.27 K1 = -8.48 X = 1500.13 Y = 16.95 Z = -7.58 B
= -66.95 C = -90.00
N720 CIP I1 = 1500.13 J1 = 16.67 K1 = -7.00 X = 1500.13 Y = 16.18 Z = -6.17 B
= -56.02 C = -90.00
N730 CIP I1 = 1500.13 J1 = 15.62 K1 = -5.39 X = 1500.13 Y = 14.70 Z = -4.29 B
= -47.64 C = -90.00
N740 CIP I1 = 1500.13 J1 = 14.04 K1 = -3.60 X = 1500.13 Y = 12.96 Z = -2.64 B
= -39.26 C = -90.00
N750 CIP I1 = 1500.13 J1 = 12.20 K1 = -2.05 X = 1500.13 Y = 11.00 Z = -1.26 B
= -30.88 C = -90.00
N760 CIP I1 = 1500.13 J1 = 10.17 K1 = -0.79 X = 1500.13 Y = 8.86 Z = -0.18 B =
-22.50 C = -90.00
N770 CIP I1 = 1500.13 J1 = 7.75 K1 = 0.24 X = 1500.13 Y = 6.05 Z = 0.78 B = -
15.25 C = -90.00
N780 CIP I1 = 1500.13 J1 = 4.89 K1 = 1.06 X = 1500.13 Y = 3.14 Z = 1.38 B = -
8.00 C = -90.00
N790 CIP I1 = 1500.13 J1 = 1.96 K1 = 1.51 X = 1500.13 Y = 0.17 Z = 1.60 B =
0.00 C = -90.00
N800 CIP I1 = 1500.13 J1 = -1.02 K1 = 1.59 X = 1500.13 Y = -2.80 Z = 1.45 B =
6.50 C = -90.00
N810 CIP I1 = 1500.13 J1 = -3.74 K1 = 1.32 X = 1500.13 Y = -5.15 Z = 1.01 B =
14.88 C = -90.00
N820 CIP I1 = 1500.13 J1 = -6.07 K1 = 0.74 X = 1500.13 Y = -7.41 Z = 0.23 B =
23.26 C = -90.00
N830 CIP I1 = 1500.13 J1 = -8.28 K1 = -0.18 X = 1500.13 Y = -9.54 Z = -0.88 B
= 31.64 C = -90.00
N840 CIP I1 = 1500.13 J1 = -10.34 K1 = -1.41 X = 1500.13 Y = -11.48 Z = -2.28
B = 40.03 C = -90.00
N850 CIP I1 = 1500.13 J1 = -12.02 K1 = -2.77 X = 1500.13 Y = -12.74 Z = -3.59
B = 52.45 C = -90.00
N860 CIP I1 = 1500.13 J1 = -13.16 K1 = -4.19 X = 1500.13 Y = -13.68 Z = -5.15
B = 64.85 C = -90.00
N870 CIP I1 = 1500.13 J1 = -13.97 K1 = -5.82 X = 1500.13 Y = -14.27 Z = -6.86
B = 77.26 C = -90.00
N880 CIP I1 = 1500.13 J1 = -14.40 K1 = -7.58 X = 1500.13 Y = -14.48 Z = -8.67
B = 89.66 C = -90.00
N890 CIP I1 = 1500.13 J1 = -14.45 K1 = -9.40 X = 1500.13 Y = -14.30 Z = -10.48
B = 90.00 C = -90.00
N900 CIP I1 = 1500.13 J1 = -14.11 K1 = -11.18 X = 1500.13 Y = -13.73 Z = -
12.20 B = 90.00 C = -90.00
N910 CIP I1 = 1500.13 J1 = -13.40 K1 = -12.85 X = 1500.13 Y = -12.80 Z = -
13.77 B = 90.00 C = -90.00
N920; LEAD_OUT_START
N930 TC_LASER_OFF(3)
N940 G01 X = 1488.13 Y = -12.80 Z = -13.77 B = 90.00 C = -90.00 F = 173000
N950; LEAD_OUT_END
N960;===== BLOCK_END =====
N970; END_OF_PROGRAM
N980 TC_RESET
N990 TC_LASER_OFF(2)
N1000 M02
STOP_TEXT
C
ENDE_PROGRAMM
ED
C