

Uusien ohutlevytekniologioiden hyödyntäminen ohutlevytuotteiden valmistuksessa

Kimmo Salin

Opinnäytetyö
Toukokuu 2015

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Tekniikan ja liikenteen ala



JYVÄSKYLÄN AMMATTIKORKEAKOULU
JAMK UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES



Tekijä(t) Salin, Kimmo	Julkaisun laji Opinnäytetyö	Päivämäärä 18.05.2015
	Sivumäärä 71	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi Uusien ohutlevytekniologioiden hyödyntäminen ohutlevytuotteiden valmistuksessa		
Koulutusohjelma Kone- ja tuotantotekniikka		
Työn ohjaaja(t) Miikka Parviainen		
Toimeksiantaja(t)		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyössä tutkittiin millaisia teknologioita viime vuosina on kehitetty ohutlevytuotteiden valmistukseen. Lähtökohtana olivat EuroBLECH 2014 -levytyömessuilla uusia tuotantokoneita esitelleet yritykset, joiden katsottiin edustavan riittävän kattavasti saatavilla olevaa tuotantovalmistusta teknologiaa. Vertailupisteeksi kartoitettiin 2000-luvun taitteessa yleistyneet ohutlevytekniologiat.</p> <p>Työssä esiteltiin uusimpia ohutlevytuotteiden valmistukseen liittyviä teknologioita leikkauksen, muovauksen ja liittämisen aloilta. Tavoitteena oli löytää suomalaiselle teollisuudelle sopivia vaihtoehtoisia tuotantomenetelmiä, esitellä uusien tuotantokoneiden tärkeimpiä innovaatioita ja esitellä millaisilla teknisillä ratkaisuilla voitaisiin parantaa ohutlevytuotteita valmistavan yrityksen tuottavuutta ja kilpailukykyä.</p> <p>Tuloksena löydettiin muutamia hyödyllisiä ja alikäytettyjä valmistusmenetelmiä, esiteltiin uusia tuottavuutta nostavia tuotantokoneiden ominaisuuksia ja pohdittiin uusien teknologioiden hyödyntämismahdollisuuksia perinteisempiin menetelmiin verrattuna.</p>		
Avainsanat (asiasanat) ohutlevyt, metallituoteteollisuus, valmistustekniikka, lasertekniikka		
Muut tiedot		



Author(s) Salin, Kimmo	Type of publication Bachelor's thesis	Date 18.05.2015
		Language of publication: Finnish
	Number of pages 71	Permission for web publication: x
Title of publication Utilizing new sheet metal technologies in manufacturing sheet metal products		
Degree programme Degree Programme in Machine and Production Technology		
Tutor(s) Parviainen, Miikka		
Assigned by		
Abstract <p>The aim of the thesis was to study the technologies that have been developed for manufacturing sheet metal products in recent years. The starting point were the companies which had introduced new production machinery at the EuroBLECH 2014 trade show. They were considered to sufficiently represent the array of available technologies. The sheet metal technologies that became common at around year 2000 were chosen for comparison.</p> <p>A selection of the newest technologies in cutting, forming and joining were presented. The aim was to find a number of suitable alternative production methods for the Finnish metal product industry, to showcase the newest innovations in production machinery and to present technical solutions that could lead to improvements in productivity and competitiveness.</p> <p>As a result, several useful and underutilized production methods and productivity increasing features in machinery were found. The application possibilities and the potential benefits of the new technologies were considered and compared to the more conventional production methods.</p>		
Keywords/tags (subjects) sheet metal, production technology, laser technology		
Miscellaneous		

Sisältö

1	Johdanto.....	5
2	Teoria	7
2.1	Tutkimusmenetelmien teoria	7
2.2	Tuottavuuden mittaaminen ja kehittäminen	8
2.3	Tutkimusotteen ja menetelmien valinta.....	12
3	Työn toteutus	13
4	Vuosina 1995-2005 yleistyneet ohutlevytekniikat.....	15
4.1	Leikkausmenetelmät.....	15
4.2	Muovaustekniikat	19
4.3	Liittämistekniikat	22
5	Uutta leikkaustekniikoissa	24
5.1	Kuitulaser	24
5.2	Tehokkaat diodilaserit	25
5.3	3D-laserleikkaus.....	26
5.4	Nestauksen optimointi pilvipalveluna	27
6	Uutta muovaustekniikoissa.....	28
6.1	Automaattinen työkalunvaihto särmäyspuristimeen	28
6.2	Nopeampia särmäysparametrien asetuksia	29
6.3	Parannuksia särmäyksen ergonomiaan	30
6.4	Kaksipuoleinen inkrementaalimuovaus.....	31
6.5	Lisäominaisuuksia taivutusautomaatteihin	32
6.6	Laserleikkauksen ja taivutuksen yhdistelmäkonet	34
6.7	Levytyökeskus taivutusominaisuudella	35
6.8	Suurpainemuovauksen menetelmät.....	37
7	Uutta liittämistekniikoissa	46
7.1	3D-laserhitsaus	46
7.2	Railonseuranta 3D-laserhitsauksessa	50

7.3	Itsesäätyvä hitsausjärjestelmä kaarihitsaukseen.....	52
7.4	CMT-hitsaus	53
7.5	MIAB-hitsaus	54
8	Vertailut	55
9	Uusien valmistusmenetelmien hyödyntäminen	60
10	Pohdinta	63
	Lähteet	66

Kuvioluettelo

Kuvio 1. Tavara- ja palveluvienti Suomesta ja EU-maista	5
Kuvio 2. Yrityksen talousprosessit	9
Kuvio 3. Kannattavuuden ja tuottavuuden suhde	10
Kuvio 4. Suomen kustannuskilpailukyky on heikko	11
Kuvio 5. Tutkimusotteiden luokittelu	12
Kuvio 6. Tiedonkäsittelyprosessin kulku	14
Kuvio 7. Materiaalien kyky absorboida energiaa vaihtelee aallonpituuden mukaan.....	16
Kuvio 8. Esitavutettu aihio	20
Kuvio 9. Kulmanmuovaukselle mahdollisia muotoja	21
Kuvio 10. Vaihteisto-osan CO ₂ -hitsausta	23
Kuvio 11. Kuitukiekkolaserin toimintaperiaate.....	25
Kuvio 12. 3D-laserleikkausta	27
Kuvio 13. SyncView ohjeistaa käyttöä PRESSMASTER-särmäyspuristimessa	30
Kuvio 14. SPIF-työstöä	31
Kuvio 15. F3T-tekniikalla muovattu Ford-logo.....	32
Kuvio 16. Robotti muuttaa pitimen leveyttä	33
Kuvio 17. Operaattori tekee viimeiset kevennetyt taivutukset käsin.....	33
Kuvio 18. Taivutustyökalu työiskun lopussa	36
Kuvio 19. Esimerkkejä taivuttavalla levytyökeskuksella tehdyistä tuotteista	37
Kuvio 20. Auton runko, jossa on suurpainemuovatus alumiiniset runkopalkit	38
Kuvio 21. Hydromuovauksen etuja pakoputkien valmistuksessa.....	38
Kuvio 22. Hydromekaanisen syvävedon periaate.....	39
Kuvio 23. Aquadrawin periaate	40
Kuvio 24. Aktiivisen hydromekaanisen muovauksen periaate	41
Kuvio 25. Polttoainetankin hydromuovauksen periaate	42
Kuvio 26. Terävällä muotinreunalla saadaan valmiiksi leikattuja tuotteita.....	43
Kuvio 27. Yksinkertaisia flexform-työkaluja.....	44
Kuvio 28. Deep draw hydroformingin periaate	45
Kuvio 29. Nykyaikaisen rubber pad formingin periaate	46
Kuvio 30. Fokuksen säätöä lennossa	47
Kuvio 31. Liitosmuotoja	48
Kuvio 32. Tuotekohtainen jigi	49

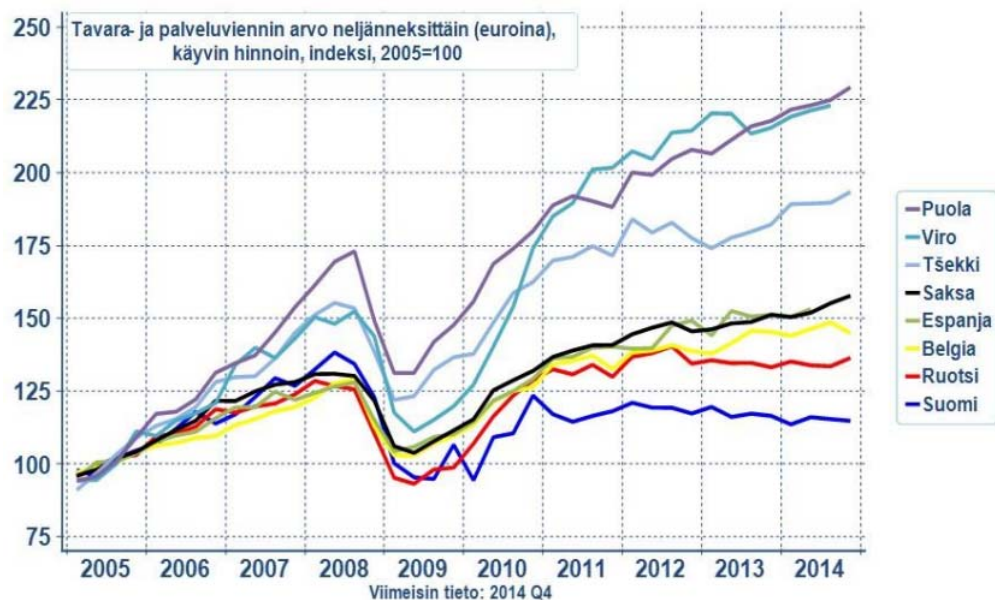
Kuvio 33. Kappaleen mittojen ja paikoituksen varmistamista reunantunnistuksella.....	50
Kuvio 34. Referenssipisteen etsimistä kuvantunnistuksen avulla	51
Kuvio 35. Reaaliaikaista railonseuranta	51
Kuvio 36. CMT-hitsausprosessin vaiheet	53
Kuvio 37. Törmäysenergiaa sitova rakenne	54
Kuvio 38. Mutterin liittäminen ohutlevyn pintaan	54
Kuvio 39. Leikkausnopeusvertailu	56

Taulukkoluetelo

Taulukko 1. Menetelmävertailua	57
Taulukko 2. Esimerkki laskentapohjasta	60

1 Johdanto

Suomi on jäänyt muista maista jälkeen teollisuuden ja viennin kehityksessä. Kuviossa 1 on kuvattu tavara- ja palveluviennin arvon kehitystä EU-maissa viimeisen kymmenen vuoden aikana. Tämä sisältää monia aloja, tuotteita ja palveluita, mutta kone- ja metallituoteteollisuus on yksi merkittävimmistä, muodostaen noin 20 % Suomen tavaraviennin arvosta. (Vienti.)



Kuvio 1. Tavara- ja palveluvienti Suomesta ja EU-maista (Palokangas 2015)

Opinnäytetyön aihe valittiin tätä kehitystä silmällä pitäen. Tarkoituksena oli esitellä uusia ja vaihtoehtoisia ohutlevytuotteiden valmistusmenetelmiä, jotta suomalaiset yritykset voisivat parantaa niiden avulla kilpailukykyään kansainvälisillä markkinoilla. Opinnäytetyön tavoitteena on vastata seuraaviin kysymyksiin: Jos suomalainen pk-yritys olisi hankkimassa nykyaikaista ohutlevytuotteiden tuotantolaitteistoa, mitä menetelmiä olisi käytettävissä perinteisten lisäksi, millaisia ominaisuuksia uusista

tuotantokoneista löytyy ja millaisilla ratkaisuilla voitaisiin parantaa kustannustehokkuutta, tuottavuutta ja kilpailukykyä.

Tuotantotekniikan verrattain hitaasta kehitysnopeudesta johtuen tarkasteluun otettiin uusien teknologioiden osalta viimeisen kymmenen vuoden ajanjakso vuosilta 2005-2015. Osa vertailupisteeksi valitun noin vuoden 2000 teknologioistakin on edelleen hyödyntämättä tuotannossa, osin investoinnit keskeyttäneen taantumien takia, osin koneiden pitkän käyttöikänsä takia. Suomen teollisuuden rakenteella ja valmistettavilla tuotteilla on myös ollut vaikutusta eri menetelmien yleistymisessä. Uudet ohutlevyteknologiat tulevat tyypillisesti ensimmäisenä massatuotantokäyttöön auto-teollisuudessa.

Odotukset työn lopputuloksista olivat muutaman suomalaiselle ohutlevytuotetuotannolle hyödyllisen, mutta alikäytetyn valmistusmenetelmän löytäminen, suuren tietomäärän käsittely luettavaan kokoon ja viime vuosina kehitettyjen pienemmät yksikkökustannukset mahdollistavien teknologioiden esittely, jotta ne osattaisiin ottaa huomioon investointeja harkitessa.

2 Teoria

2.1 Tutkimusmenetelmien teoria

Kvalitatiivinen tutkimus

Kvalitatiivisessa eli laadullisessa tutkimuksessa voi katsoa olevan kyse vähitellen tapahtuvasta tutkittavan ilmiön käsitteellistämisestä. Tutkimusongelma ei välttämättä ole tarkkaan määritelty tutkimuksen alussa. Tutkimuskohteen vähitellen tapahtuva selkeytyminen antaa tutkijalle lisäviitteitä siitä, mihin teoreettisiin näkemyksiin hänen kannattaa syventyä. Laadullista tutkimusprosessia voi luonnehtia eräänlaiseksi tutkijan oppimisprosessiksi, jossa koko tutkimuksen ajan pyritään kasvattamaan tutkijan tietoisuutta tarkasteltavana olevasta ilmiöstä. Yleisen kokonaiskuvan saaminen edellyttää laajan aineiston käyttöä, josta osa voi myöhemmin tutkimuskohteen tarkentuessa osoittautua turhaksi, mutta aineiston läpikäyminen saattaa olla välttämätöntä tutkimusprosessin etenemiselle. (Aaltola & Valli 2010, 74-77.)

Aineistonkeruussa voidaan puhua teoreettisesta otannasta, jossa kehittymässä oleva teoria jäsentää sitä, mitä aineistoa seuraavaksi kerätään. Olennaista ei ole menetelmien suuri määrä tai mahdollisimman edustavasti kohdejoukkoa kuvaava aineisto, vaan tutkittavan ilmiön haltuunotto ja ilmiötä koskevan käsitteellistämisen kehittyminen. Aineiston analysoinnin lähtökohtana on kehittää käsitteellisesti mielekkäitä ydinteemoja kerätystä aineistosta. Analyysissa keskeistä on löytää synteesiä luova temaattinen kokonaisrakenne, keskeiset ydinkategoriat ja keskeisimmät käsitteet. (Mts. 78-80.)

Konstruktiivinen tutkimus

Konstruktiivinen eli soveltava tutkimus vastaa kysymyksiin mm. rakentamisesta, parantamisesta, tarkoituksellisesta muuttamisesta ja käyttöönotosta. Se sisältää kolme tutkimusotetta: innovaation toteuttamisen, innovaation arvioinnin ja toimintatutkimuksen. Innovaation toteuttaminen käsittää metodin, jonka avulla uskotaan saata-

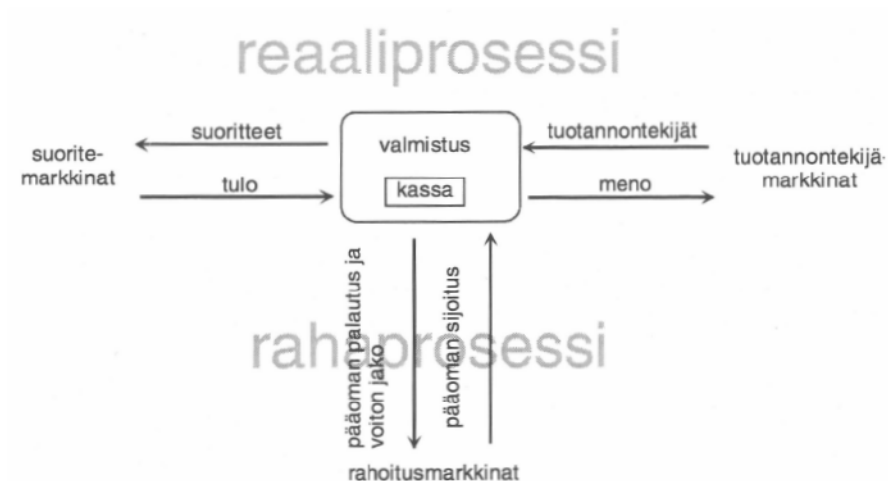
van aikaiseksi muutos lähtötilasta tavoitetilään. Toimintatutkimus sisältää tarvittavan muutoksen toteuttamisen ja saavutetun muutoksen arvioinnin, yhdessä tai useammassa syklissä. Sen tavoitteena on siis systemaattisesti parantaa tutkittavan kohteen toimintaa tekemällä muutoksia ja mittaamalla miten ne vaikuttavat. (Järvinen & Järvinen 2000, 102, 105, 129.)

Innovaation arviointi on vertailua aiempaan tapaan toimia. On siis olemassa uusi vaihtoehto, jota arvioidaan sen hyödyllisyyden perusteella. Realisaation mittarit voivat liittyä esimerkiksi tehokkuuteen, vaikuttavuuteen, sivuvaikutuksiin tai kykyyn suorittaa tehtävä. Edellä mainittujen Marchin ja Smithin määrittelemien mittareiden lisäksi Järvinen & Järvinen lukevat kirjassaan (2000) sopiviksi mittareiksi innovaation taloudellisten vaikutusten mittarit, joihin tosin kohdistuvat laskentatoimen perusongelmat siitä, mitä hyötyjä ja kustannuksia otetaan mukaan ja miten niitä mitataan, arvostetaan ja jaetaan tuotteille. Sopivien mittareiden määrittely jää siis viime kädessä tutkijan vastuulle ja on tapauskohtaista. (Mts. 121-123.)

2.2 Tuottavuuden mittaaminen ja kehittäminen

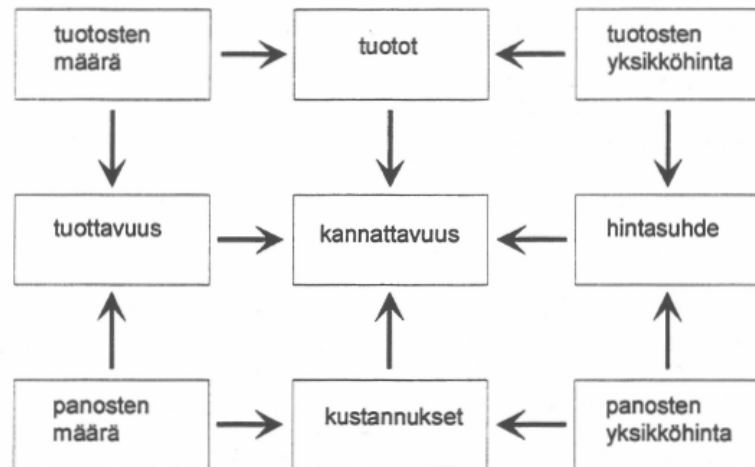
Tuottavuuden mittaus

Yrityksen toiminnan mittarit voidaan jakaa talousprosessin mukaan reaali- ja rahaproessin mittareihin (ks. kuvio 2). Kannattavuus lienee tunnetuin rahaproessin mittari. Tuottavuus on aina reaali-prosessin mittari, joka mittaa järjestelmän tuotoksen ja panoksen välistä suhdetta. Yhden panoksen tuottavuudet ovat osatuottavuuksia, joita voidaan käyttää järjestelmän mittauksen sijaan merkittävimpien tekijöiden mittaamiseen. Tällaisia ovat esimerkiksi työn, koneiden ja materiaalin osatuottavuus. (Tuottavuus tänään, 25-26.)



Kuvio 2. Yrityksen talousprosessit (mts. 25)

Vaikka kannattavuus ja tuottavuus liittyvät toisiinsa, ovat ne eri asioita (ks. kuvio 3). Kannattavuus kuvaa toiminnan tuottoa kustannuksiin nähden. Tuottavuus kuvaa käytettyjen tuotannontekijöiden suhdetta saataviin suoritteisiin. Tuottavuus voi olla hyvinkin positiivinen samaan aikaan kun yrityksen toiminta on tappiollista. Esimerkiksi raaka-aineiden hintojen muutokset vaikuttavat kannattavuuteen, mutta eivät tuottavuuteen. Kaavasta $kannattavuus = tuottavuus \times \frac{tuotosten_yksikköhinnat}{panosten_yksikköhinnat}$ nähdään, että tuottavuus vaikuttaa suoraan kannattavuuteen, mutta kannattavuuden muutokset eivät välttämättä johdu tuottavuudesta. Tuottavuuden nostaminen parantaa kannattavuutta panosten ja tuottojen hintatasosta riippumatta. Tämä tekee tuottavuudesta itsenäisen mittarin ja kehityskohteen. (Mts. 26-27.)



Kuvio 3. Kannattavuuden ja tuottavuuden suhde (mts. 27)

Miksi tuottavuuden kasvua tarvitaan

Suomen kustannuskilpailukyky on heikentynyt viime vuosina moniin EU-maihin verrattuna (ks. kuvio 4). Kustannuskilpailukykyä mittaavat yksikkötyökustannukset riippuvat työvoimakustannuksista ja tuottavuudesta. Yritysten vaikutusmahdollisuudet työvoimakustannuksiin ovat vähäiset, joten kansainvälistä kilpailukykyä pitää hakea tuottavuutta parantamalla. Muuten muista maista saa ostettua saman tuotteen halvemmalla ja vientitulot tyrehtyvät. (Palokangas 2015.)



Kuvio 4. Suomen kustannuskilpailukyky on heikko (mt.)

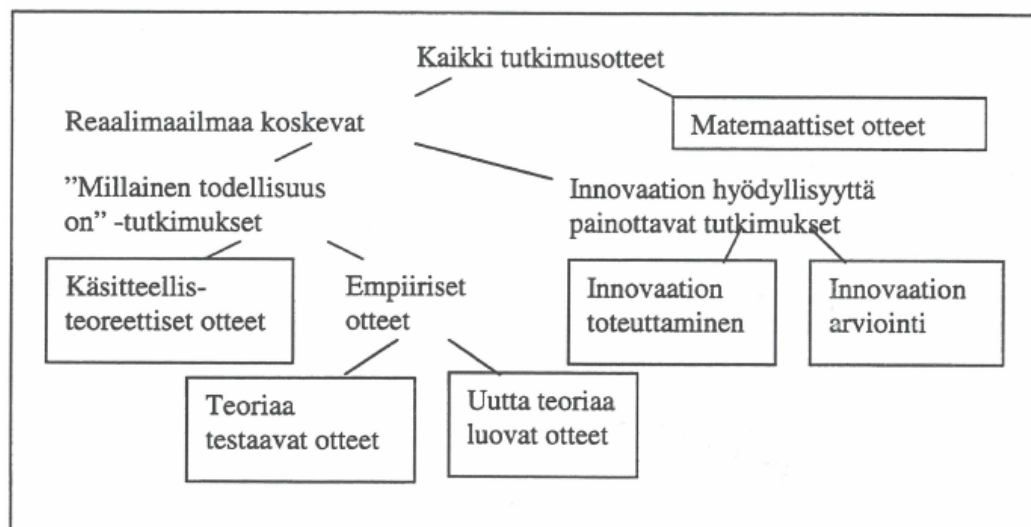
Miten tuottavuutta parannetaan

Tuottavuus on kuvion kolme mukaan tuotosten määrä jaettuna panosten määrällä. Samasta tuotannontekijästä, oli se sitten työvoima, tuotantokoneet, materiaalit tai pääoma, pitää saada suurempi hyöty irti. Ohutlevytuotealalla tämä tarkoittaisi lähinnä tuotantokoneiden ja materiaalien käytön tehostumista. Pääoman kierto nopeuden nopeuttaminen, tuottavien investointien tekeminen ja kasvun vipuaminen vieraalla pääomalla ovat mahdollisia keinoja kaikille yrityksille, mutta eivät tämän opinnäytetyön aiheena. Työvoiman käytön tehostaminen on niin ikään rajattu aihealueen ulkopuolelle, mutta sen odotetaan paranevan muiden toimien ohella ja työmäärän riittäessä kaikille kehitystoimien seurauksena. Tuotannontekijöillä nimittäin on keskinäistä substituutiovaikutusta. Esimerkiksi koneinvestointi nostaa myös työvoiman tuottavuutta, koska saman suoritemäärän aikaansaamiseksi tarvitaan entistä vähemmän työvoimaa. Moraalisena tavoitteena tietenkin olisi suuremman suoritemäärän tuottaminen samalla työvoimalla. Samalla pääoman tuotto nousee, kun joutilasraha on sijoitettu tuottavaan kalustoon. (Tuottavuus tänään, 26.)

2.3 Tutkimusotteen ja menetelmien valinta

Pääasialliseksi aineistoksi valittu messumateriaali oli selkeästi kvalitatiivista, koska vertailtavaa numerotietoa voitiin käyttää vasta työn loppupuolella esimerkiksi erityyppisten laitteistojen nopeuseroja vertailtaessa. Kvalitatiivisen tutkimuksen prosessikuvaus sopi erittäin hyvin tällaiselle aiheelle, aineistolle ja lähtötietojen tasolle, joten se valittiin pääasialliseksi menetelmäksi teknologioiden etsimiseen ja esittelyyn. Tässä vaiheessa työstä odotettiin tulevan subjektiivinen näkemys suomalaiselle ohutlevytuoteteollisuudelle soveltuvista menetelmistä, koska tarkempaa tietoa Suomessa valmistettavien tuotteiden skaalasta ei ollut saatavana.

Kuviossa 5 listatuista tutkimusotteista konstruktiiiviseen tutkimukseen kuuluva innovaation arviointi oli ainoa tähän tapaukseen soveltuva, joten se valittiin työn loppuosan teknologioiden arviointiin ja johtopäätöksiin. Arviointi vaatii uusien menetelmien vertailua vanhempiin, joten lisäksi tarvittiin relevantteja mittareita. Vertailussa voidaan pyrkiä aineiston kvalitatiivisesta luonteesta huolimatta kohti – jos ei kvantitatiivista – niin ainakin jollain tavoin diskreettiä arvoasteikkoa (hidas/nopea vaiheika, halpa/kallis yksikkökustannus).



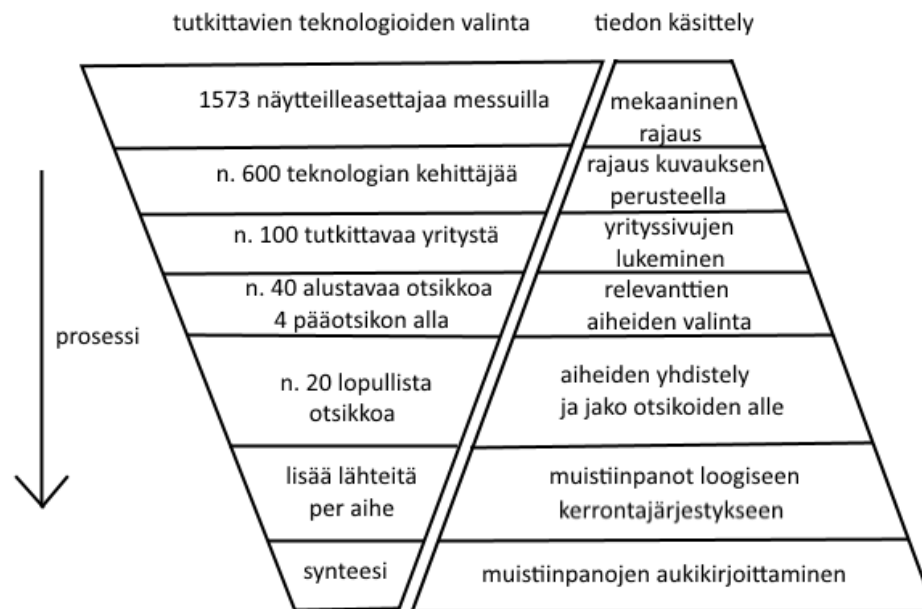
Kuvio 5. Tutkimusotteiden luokittelu (Järvinen & Järvinen 2000, 9)

Ohutlevyalan teknologioiden ollessa tuotantolaitteisiin ja menetelmiin liittyviä, on sopivaa käyttää mittarina tuottavuutta, tai tarkemmin sanottuna tuotantokoneiden ja -prosessien osatuottavuutta verrattuna vaihtoehtoisiin koneisiin ja prosesseihin. Mittausyksikkönä on täten useimmiten tuotantokykyä mittaava nopeus, josta voidaan laskea tuotannolle tärkeä yksikkökustannus, kun tiedetään koneen investointi- ja käyttökustannukset, tuotantoprosessin tarve tuoteyksikköä kohti sekä tarvittavan työvoiman kustannukset. Tässä tapauksessa yksikkökustannuksella tarkoitetaan siis tuotantokustannuksia tuotetta kohti ilman materiaalikustannuksia tai kiinteitä kustannuksia, jolloin laskelmat ovat yritysten erilaisista kulurakenteista riippumattomia.

3 Työn toteutus

Materiaalin kerääminen, rajaus ja prosessointi

Uusien teknologioiden etsiminen aloitettiin tutustumalla lokakuussa 2014 Hannoverissa järjestettyjen EuroBLECH-levytyömessujen tarjontaan. Ajatuksena oli, että suurilla kansainvälisillä messuilla on esillä lähes kaikki alan tuotantovalmis teknologia. Näytteilleasettajalistasta rajattiin pois yritykset, jotka olivat pelkästään esimerkiksi palvelu- tai huoltoalalla eivätkä kehittä ohutlevyteknologioita. Jäljelle jääneistä noin 600 yrityksestä luettiin kuvaukset niiden toiminnasta ja messuilla esiteltävistä tuotteista. Tuloksena saatiin rajattua noin sata yritystä, joiden tuotteisiin piti tutustua tarkemmin. Kuviossa 6 on kuvattu prosessia materiaalin rajauksen ja tiedon prosessoinnin vaiheiden kautta.



Kuvio 6. Tiedonkäsittelyprosessin kulku

Messuryritysten nettisivuilta saatiin tietää, mitkä ovat uusia teknologioita, mutta niiden sisältämän tekniikan ja sovelluskohteiden selvittämiseksi piti tutkia muita alan nettisivustoja ja tutustua erilaisiin valmistusprosesseihin. Menetelmien yksityiskoh-
tien ymmärtämisessä konevalmistajien YouTubeen laittamat esittelyvideot olivat suureksi avuksi. Hyvänä lähteenä olivat myös ulkomaalaiset ohutlevyteknologialehdet, joiden artikkeleja pystyi lukemaan netissä. Tietoa alan viimeisimmistä innovaatioista ja sovelluskohteista saatiin Metalliteknikka-lehdistä ja erikoisalojen uutissivustoilta. Lähteiden määrän laajetessa myös tutkittavia teknologioita löytyi lisää messuilla esiteltyjen lisäksi, jonka ansiosta tutkimuksen kattavuus ja validiteetti paranivat.

Lähtökohdaksi kartoitettiin 2000-luvun taitteessa (vuosina 1995-2005) yleistyneet teknologiat, jotta voitiin vertailla, miten ohutlevyteknologiat ovat kehittyneet viimeisen kymmenen vuoden aikana. Tätä aiemmin yleistyneet teknologiat rajattiin aihealueesta pois.

Vertailu ja mittarit

Opinnäytetyössä haettiin tietoa siitä, miten ohutlevytekniikat ovat kehittyneet 2000-luvulla ja toisaalta mitkä tekniikat ovat tällä hetkellä toistensa kilpailijoita tuotantokoneita hankittaessa. Monet uusista tekniikan kehitysaskelista liittyivät laser-tekнологiaan, mutta muitakin menetelmiä löydettiin. Näistä muodostettiin vertailutaulukko, joka tiivistä tutkimuksessa löydettyjen tekniikoiden tärkeimmät kustannus- ja soveltuvuustekijät yhdelle sivulle. Tarkoituksena oli auttaa tuottavuuden kehittämistä mieltävää henkilöä löytämään nopeasti yritykselle sopivat tuotantomenetelmävaihtoehdot, mukaan lukien vähemmän tunnetut menetelmät. Menetelmien omissa luvuissa kerrottiin tarkemmin sovelluskohteista ja potentiaalista tuottavuuden parantamiseen. Lopuksi esiteltiin laskentapohja eri laitteistojen nopeaan ja tarkkaan vertailuun tuottavuuden kannalta mitattuna.

4 Vuosina 1995-2005 yleistyneet ohutlevytekniikat

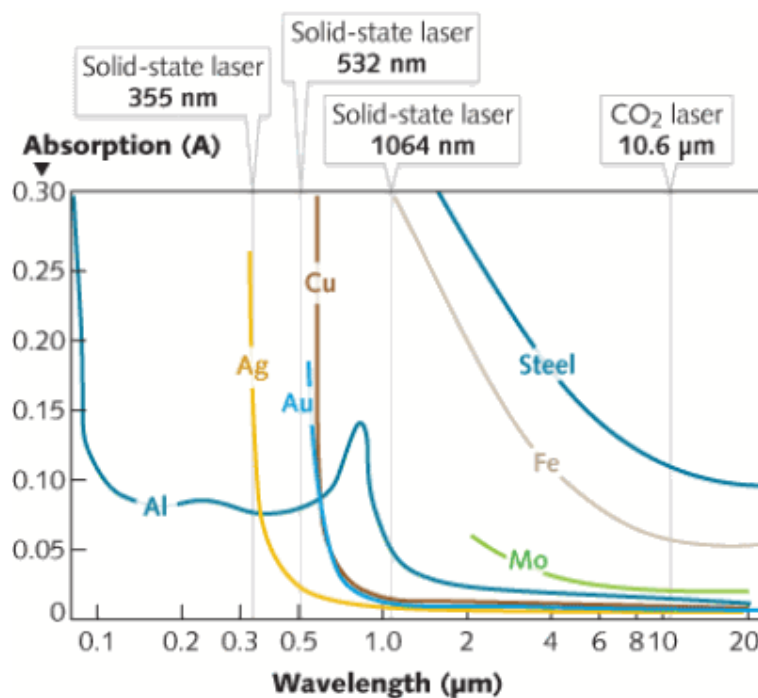
4.1 Leikkausmenetelmät

Kaasulaser

Hiilidioksidilaser (CO₂-laser) kehitettiin 1960-luvulla ja se oli yksi ensimmäisistä kaasulasereista. Kaasulaser on siis vanha keksintö, mutta se on esitelty tässä vertailupohjaksi uudemmille teknologioille. CO₂-laserit ovat edelleen yleisiä.

CO₂-laserin aallonpituus on 10.6 mikrometriä, joka on korkea uudempiin lasereihin verrattuna. Se muodostetaan johtamalla sähkövirtaa tai radiotaajuista energiaa resonattorin heliumista, typestä ja hiilidioksidista koostuvaan kaasuseokseen. CO₂-laserin säde absorboituu jonkin verran lähes kaikkiin materiaaleihin aallonpituutensa takia. Vain muutama materiaali pystyy heijastamaan riittävästi kyseistä aallonpituutta lämpiämättä liikaa, joten säde pitää ohjata työstökohteeseen niistä valmistetuilla ja jäähdytetyillä peileillä. (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005, 54-55.)

Kuviossa 7 on esitelty eri materiaalien absorptiokykyä. Siitä nähdään, että CO₂-laserin suuri aallonpituus absorboituu teräsiin noin 10 %, joka on paljon vähemmän kuin uudempien tekniikoiden lyhyemmät aallonpituudet. Käyrä kuvaa tilannetta materiaalin ollessa huoneenlämmössä. Suurilla aallonpituuksilla absorptio kasvaa merkittävästi lämpötilan noustessa. Tämä tekee CO₂-laserista teräksien työstöön toimivan teknologian, koska pienikin absorptio riittää lämpötilan nousuun, jolloin absorptiokyky nousee riittävän tehokkaalle tasolle. (Mts. 45.)



Kuvio 7. Materiaalien kyky absorboida energiaa vaihtelee aallonpituuden mukaan (Kaminski 2011)

Alumiinin, kuparin, pronssin ja titaanin kaltaisille heijastaville ja hyvin lämpöä johtaville materiaaleille CO₂-laser soveltuu huonosti, joten niille käytetään yleensä uudempiä, lyhytaaltoisempaa lasertyyppiä. Jos aineeseen ei saada imeytymään nopeasti tarvittavaa energiamäärää, siisti ja muuhun materiaaliin vaikuttamaton työstö ei onnistu. (Mts. 44-45.)

CO₂-laserin vaatimien peilien ja työstöpään liikkumistarpeen yhdistäminen on portaalibrooteissa toteutettu lentävällä optiikalla. Siinä sädettä kuljetetaan portaalin akselin suuntaisesti, jolloin kiinteistä peilien asennoista huolimatta säde löytää aina perille liikkuvaan työstöpäähän. Toinen, levytyökeskuksissa käytetty vaihtoehto olisi liikuttaa levyä ja käyttää paikallaan pysyvää työstöpäätä. Säteen polttopistettä ja muita ominaisuuksia voidaan tarvittaessa säätää työstöpäässä, tai tämä voidaan tehdä korkeusliikkeellä.

Kidelaser

Yleisin kidelaser on Nd:YAG, jonka aallonpituus on 1064 nanometriä eli 1.064 mikrometriä. Sen laseraktiivinen aine on neodyymi, jota on seostettu YAG-kiteeseen (Yttrium Aluminium Garnet) korvaamalla noin prosentti kiteen yttrium-ioneista neodyymi-ioneilla. Kidelaser tunnetaan myös kiinteän faasin laserina (Solid-state Laser, ks. kuvio 1) ja määritelmästä riippuen diodilaserit ja kuitulaserit lasketaan joskus samaan luokkaan. (Kujanpää ym. 2005, 59)

Kidelaseria pumpataan eli viritetään toisella valonlähteellä. Tämä on aiemmin ollut ksenon- tai kryptonlamppu, mutta tällöin suurin osa sähkötehosta kului lämmöksi ja laserin hyötysuhde oli vain 2-3 %. Kidetankoa oli suojeltava lämmöltä jäädyttämällä ja se rajoitti käytettävää ja ulos saatavaa tehoa. Diodilasereiden korvatussa kaarilamppu vähemmän energiaa hukattiin lämmöksi ja kidelaseria voitiin pumpata korkeammilla tehoilla. Diodilaserin etuna lampuihin verrattuna oli myös pidempi elinikä ja diodilaserista saatava kiteen virittämiseen tarvittava täsmällinen aallonpituus, jolloin Nd:YAG-laserin kokonaishyötysuhteeksi saatiin 20-25 %. Suurteholasereita saadaan aikaiseksi laittamalla useita kidetankoja sarjaan tai peräkkäin. Tuotettu lasersäde kuljetetaan työstöoptiikalle yleensä joustavassa optisessa kuidussa, koska se sopii tämän aallonpituusluokan heijastamiseen. (Mts. 58-65.)

Puolijohdelaser eli diodilaser

Laserdiodeja käytetään yleisesti mm. DVD-soittimissa, lasertulostimissa ja viivakoodinlukijoissa. Diodilaseria on käytetty Nd:YAG:n pumppaamiseen, mutta 2000-luvun alkupuolelle asti ne olivat yksinään liian tehottomia materiaalin työstöön ja säteen

laatu ei ollut riittävän hyvä (mts. 65). Diodilaseria pumpataan sähkövirralla ja säteen aallonpituus on valittavissa diodityypillä. Vakioaallonpituuksia on välillä 808-976 nm (Diode Laser Product Features & Applications).

2D-laserleikkaus

Laserleikkauksen etuja ovat nopeus, tarkkuus, rajattu lämmöntuonti, leikattavan muodon vapaus ja leikkauksen laatu (Kujanpää ym. 2005, 130, 133, 235). Tuotannon kannalta nämä tarkoittavat kapasiteetin nousua, koneistuksen poisjääntiä sekä väli-varastoon sitoutuneen pääoman ja läpäisyajan alenemista, joilla kaikilla on taloudellista merkitystä (mts. 31, 130).

Yleisin laserleikkauksen kohde on ohutlevyosien aukotus ja irtileikkaus isommasta levyaihiosta muovausta ja liittämistä varten. Laserleikkauksesta puhuttaessa tarkoitetaan yleensä levyosien tasomaista leikkausta portaalirobotilla, jossa korkeusliikkeen käyttö on vähäistä (2D-leikkaus). Myös muovattuja osia voidaan aukottaa tavallisella laserilla, kun leikattavat pinnat sijaitsevat suurin piirtein samalla etäisyydellä työstöpäästä. Enemmän muovattujen, putkimaisten tai jo kokoonpanossa olevien osien enemmän liikeratoja vaativaa leikkausta kutsutaan 3D-leikkaukseksi.

Vuonna 2002 Suomessa käytettiin 59 % lasereista 2D-leikkaukseen, kun muualla maailmassa leikkaus, merkkäus, hitsaus, mikrotyöstö ja kaiverrus olivat tasaveroisempia laserin käyttökohteita. Ero johtui lähinnä erilaisesta teollisuuden rakenteesta. (Mts. 18.)

Työstettävä materiaali vaikuttaa laservalintaan

Kuviosta 7 nähtiin, että hiilidioksidilaser soveltuu teräksille, mutta heijastavammille ja lämpöä hyvin johtaville materiaaleille aallonpituuden on oltava pienempi, jotta kappaleeseen imeytyy paikallisesti riittävästi energiaa pinnan läpäisyä varten. Kide- ja kuitulaserit ovat lisäämässä markkinaosuutta juuri monipuolisempien sovellusmahdollisuuksien takia. Suuritehoiset laserit ovat olleet aikaisemmin useimmiten hiilidioksidilasereita, mutta teknologian kehittyminen on lisännyt eri lasertyyppien tehoja merkittävästi 2000-luvulla. Uudemmissa lasertyypeistä on lisää luvuissa 5.1 ja 5.2.

Kidelasereiden aallonpituutta varten on kehitetty optisia kiteitä, joissa laservalo jakautuu harmonisiin taajuuksiin. Taajuusmuunnellulla kidelaserilla saadaan 1064 nanometrin aallonpituus puolitettua näkyvän valon alueelle 532 nanometriin, joka sopii paremmin tietyille materiaaleille ja muihin sovelluksiin. (Frequency Doubling.)

Aallonpituuden jako kolmas- tai neljäsosaan on myös mahdollista. Kujanpään ym. (2005, 70) mukaan muunnos alentaa laserin ulostulotehoa samassa suhteessa ja lisäksi kiteen käyttö aiheuttaa optisia häviöitä. Optista tekniikkaa on viime vuosina kehitetty edellä mainittua paremman hyötysuhteen saamiseksi (Second-harmonic Generation). Kideteknologian lisäksi aallonpituutta puolittavaa kuitua ollaan kehittämässä (Wallace 2015).

4.2 Muovausteknologiat

Laserin ja levytyökeskuksen yhdistelmä

Laserleikkaus voidaan nähdä perinteisen levytyökeskuksen kilpailijana, mutta ne yhdistämällä saadaan samaan koneeseen molempien vahvuudet. Laserin ja levytyökeskuksen yhdistelmällä saadaan valittua helpoin, nopein ja kannattavin vaihtoehto kappaleen valmistukseen (Matilainen, Parviainen, Havas, Hiitelä & Hultin 2010, 161).

Tällaisessa koneessa laserin työstöpää ja levytyökeskuksen työkalut ovat samalla pöydällä, jonka päällä olevaa levyä liikutellaan ensin lävistystyökalujen välissä ja sitten laserpään alla. Laserin optiikkaa säästetään, kun aloitusreiät ja pienet vakiomuodot tehdään mekaanisesti. Työkaluhankinnoissa säästetään, kun laser voi leikata monimutkaiset muodot (mts. 161). Tuotteen rajaus lopuksi onnistuu nopeimmin laserilla. Yhdistelmällä voidaan myös tehdä pieniä muovauksia, jotka eivät pelkällä laserilla olisi mahdollisia.

Taivutusautomaatti

Taivutusautomaatti pystyy tekemään itsenäisesti taivutuksia, joten sillä voidaan saavuttaa särmäyspuristinta nopeampi tuotantotahti. Taivutusautomaatilla pystytään myös tekemään taivutuksia, mitkä eivät ole mahdollisia muilla taivutusmenetelmillä (Matilainen ym. 2010, 267). Sen etuja ovat joustavuus, monimutkaisten kappaleiden valmistaminen sekä mahdollisuus levyosien määrän ja liittämistarpeen vähentämiseen (Mäki-Mantila 2001, 17-18). Rajoituksena särmäyspuristimeen ja taivutuskooneeseen verrattuna on särmän reunakorkeus, jotta kappale mahtuu tulemaan vaakasuorassa ulos koneesta. Taivutusautomaattien toiminnasta on lisää luvussa 6.5.

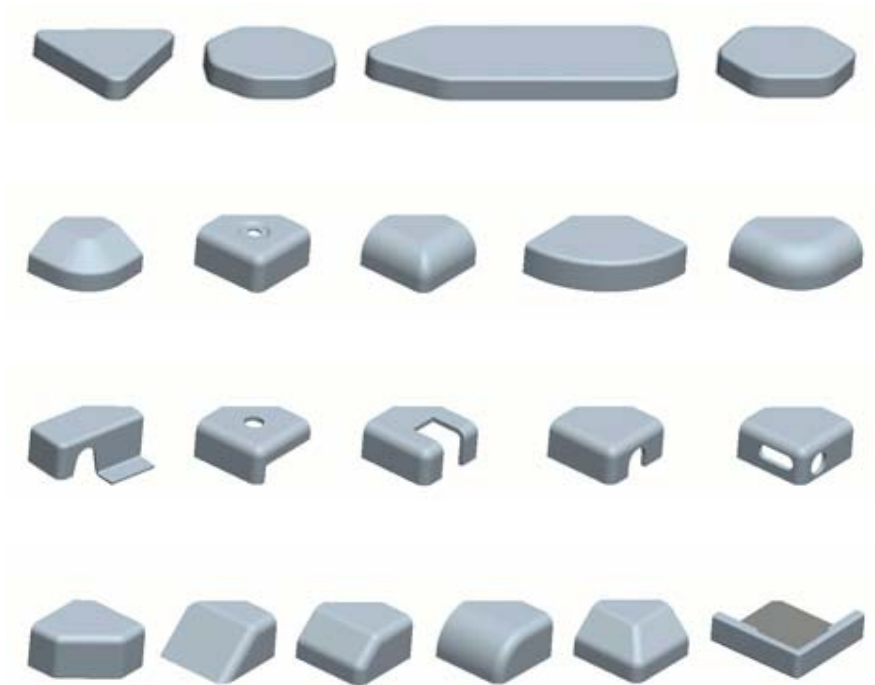
Kulmanmuovaus (Corner forming)

Kulmanmuovauslaitteella saadaan korvattua nurkkaliitos pyöristetyllä kulmalla. Aihiot esitaivutetaan niin, että nurkat jätetään taivuttamatta (ks. kuvio 8). Tähän on olemassa särmäyspuristimelle erikoistyökaluja, mutta se onnistuu ilmankin. Kulmanmuovain taivuttaa sivut kulman kohdalta, muovaa ylijäävästä materiaalista tiiviin pyöristyksen ja leikkaa lopun metallin pois.



Kuvio 8. Esitaivutettu ahio (Edgemaster Corner Forming)

Kulmanmuovauksella voidaan korvata kulman hitsaus ja hionta. Pinnoitetuilla levyillä pinnoite säilyy, toisin kuin hitsauksessa (Matilainen ym. 2010, 236). Menetelmällä saadaan helposti toteutettua suunnittelijoiden CAD:lla tuotteisiin piirtämät pyöristykset (ks. kuvio 9). Kappaleen neljän kulman muovaus vie aikaa noin minuutin (Baldwin 2001).



Kuvio 9. Kulmanmuovaukselle mahdollisia muotoja (Design profiles of cold formed corners)

Robotisoitu särmäys

Nivelvarsirobotilla voidaan korvata ihmistyövoimaa särmäyksessä. Tämä on kannattavaa etenkin suurilla ja raskailla kappaleilla, joiden käsittelyyn tarvittaisiin kaksi ihmistä. Särmäyssolussa robotti noutaa aihion, asettaa sen puristimeen, tukee levyä taivutusten ajan, hoitaa otteiden vaihdon, aihion kääntämisen ja valmiin tuotteen asettamisen purkupöydälle tai liukuhihnalle. Lineaariradalle asennetulla robotilla voidaan saavuttaa kiinteää sijaintia suurempi työskentelyalue ja hyödyntää puristinta koko leveydeltä pienemmällä robotilla. Menetelmä sopii suurille valmistuserille, joissa ohjelmointi- ja asetusajat ovat pieniä suhteessa saavutettuun ajansäästöön. (Mäki-Mantila 2001, 13-14.)

Tuotava levy voidaan etsiä lavalta optisesti, jolloin robotti varmistaa leikkeen sijainnin esimerkiksi laserilla ja poimii sen alipainetarraimella. Leikkeet voivat sisältää reikiä, mutta tarraimen imukupit pitää sijoitella niin, ettei niihin osuta, eivätkä ne ole tiellä missään särmäyksen vaiheessa, vaikka kappaleen geometria muuttuu. Tarkempi paikoitus hoidetaan yleensä käyttämällä levyä paikoituspöydällä, koska se on nopea

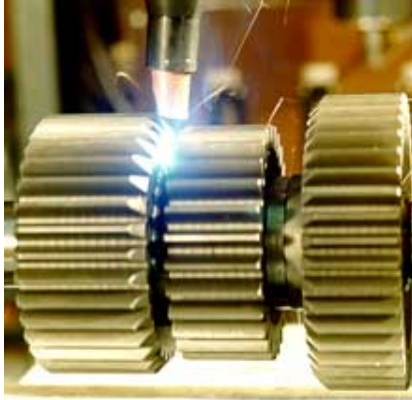
ja yksinkertainen toimenpide. Liikeratoja voidaan nykyään etäohjelmoida ja simuloida ohjelmistoilla, mutta käytännön hienosäätö pitää tehdä testaamalla paikan päällä. Pienissä valmiina toimitettavissa tuotantosoluissa voidaan päästä hieman helpomalla, koska nivelvarsirobotti, puristin ja mahdolliset apurobotit on suunniteltu alusta asti toimimaan yhdessä, jolloin ohjausohjelmisto osaa laskea ja toteuttaa halutun taivutuksen vaatimat liikeradat. Robotisoitu särmäys sopii lähinnä tuotteille, joita ei pysty valmistamaan taivutusautomaatilla ja joita on liian paljon käsin särmättäviksi. (LeTang 2012; E-BendCell.)

4.3 Liittämisteknologiat

2D-laserhitsaus

Laserilla voidaan hitsata kaikkia yleisesti sulahitsattavia materiaaleja ja liittää yhteen myös ruostumatonta ja seostamatonta terästä (Matilainen ym. 2010, 303). Liitoksilta edellytetään I-railoon hitsattaessa tarkkaa osien paikoitusta ja leikkausjälkeä. Laser mahdollistaa useampien liitosmuotojen käytön kuin kaarihitsaus, mutta vaatii lähes ilmaaraottoman kiinnityksen onnistuakseen (Kujanpää ym. 2005, 174-175).

Autoteollisuus on käyttänyt laserhitsausta 2000-luvun alusta asti eripaksuisten leikkeiden yhteen liittämiseen ennen muovausta (räätälöidyt aihiot) ja lähes tasomaisten kappaleiden liitoksiin, kuten ovien kokoonpanoon ja kattopaneelin kiinnittämiseen. Nämä onnistuivat portaaleilla, joissa hitsauspään rajallinen korkeuden ja kulman säätö riittivät tarvittavien hitsauskohteiden saavuttamiseen. Laserina käytettiin lentävän optiikan hiilidioksidilaseria tai kuidussa kuljetettua Nd:YAG:n sädettä. Paikallaan olevilla laitteistoilla saatiin myös hitsattua pyörähdyssymmetrisiä kappaleita niitä pyörittämällä (ks. kuvio 10). (Riches 1998.)



Kuvio 10. Vaihteisto-osan CO₂-hitsausta (Riches 1998)

Laserhitsaus alkoi korvata perinteistä liitostapaa, pistehitsausta. Laserin etuina olivat sokkoliittäminen, kapeammat liitosalueet, lisääntynyt vääntöjäykkyys, pienempi lämmöntuonti, vähäiset muodonmuutokset, automaatiolla saavutettava suurempi nopeus ja näkyviin jäävien hitsien hyvä pinnanlaatu. (Riches 1998.)

Laserjuotto

Laserjuotto on kovajuottamista lasersäteen avulla. Lasersäde sulattaa liitokseen tuotavaa ohutta juotelankaa. Prosessia käytetään autoteollisuudessa galvanoitujen levyosien liittämiseen. Juottaminen on suhteellisen viileä terminen liitosmenetelmä, jolloin lämpö ei aiheuta muodonmuutoksia ja esimerkiksi sinkkipinnoite pysyy enimmäkseen paikallaan. Etuna on myös hyvä pinnanlaatu, jota ei tarvitse normaalisti jälkikäsitellä. (Laser brazing.)

Laserjuottoa on käytetty Euroopan autoteollisuudessa vuodesta 2001 lähtien. Laserjuotto vaatii railon seurannan, joka voidaan toteuttaa juotelangan tai erillisen anturipään kosketusvoimia mittaamalla tai optisesti. Laserin optiikan ja parametrien pitää mukautua railon muutoksiin mittaustulosten perusteella. (Riedelsberger 2006.)

5 Uutta leikkausteknologioissa

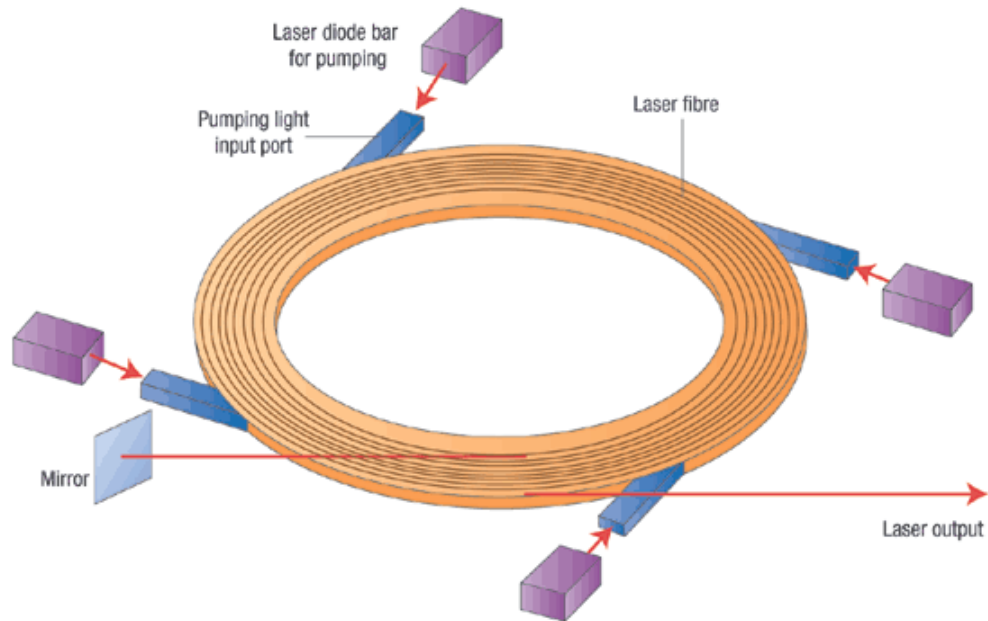
5.1 Kuitulaser

Muutkin lasertyytit hiilidioksidilaseria lukuun ottamatta käyttävät nykyään säteen kuljetukseen optista kuitua, mutta kuitulaser sanan varsinaisessa merkityksessä tarkoittaa erikoisvalmisteisessa kuidussa synnytettyä lasersädettä (Kujanpää ym. 2005, 16). Kuitulaserin tuottama säde siirretään luonnollisesti optisessa kuidussa eteenpäin työstöpäälle.

Kuitulaserissa laseroiva väliaine (gain medium) on kuitu, joka on doupattu (seostettu, piristetty) harvinaisella maametallilla kuten ytterbiumilla (Välilä 2012, 27). Laseraktiivinen kuituydin on erittäin ohut, halkaisijaltaan luokkaa 5-12 mikrometriä ja sitä ympäröi optinen kuitu, joka muodostaa resonaattorin (Fiber Lasers). Kuitulaseria pumpataan diodilaserin valolla ja syntynyt aallonpituus on seosaineesta ja diodista riippuen luokkaa yksi mikrometri eli vastaava kuin Nd:YAG:lla. (Kujanpää ym. 2005, 68.)

Ohuen kuidun ansiosta syntynyt säde on halkaisijaltaan pieni ja säteenlaatu on erittäin hyvä. Suuri teho voidaan saavuttaa yhdistämällä usean lasermoduulin säteet toisiinsa. (Mts. 68.)

Toinen tapa lisätä tehoa on kiertää kuitu kelalle ja pumpata sitä useista lähteistä. Kuviossa 11 on esitelty tällaisen kiekkolaserin (fiber disk laser) toimintaperiaate. Myös Nd:YAG:lla tai Yb:YAG:lla kiekkolaserrakenne on mahdollinen, mutta sen toiminta perustuu heijastavan kuidun sijaan kidettä ympäröiviin peileihin (mts. 64-65).



Kuvio 11. Kuitukiekkolaserin toimintaperiaate (The Fiber Disk Laser explained)

Kuitulaserin etuja ovat hyvä hyötysuhde, pienet käyttökustannukset, kompakti laitteiston koko, minimaalinen huoltotarve ja pitkät huoltovälit.

5.2 Tehokkaat diodilaserit

Diodilasereita on käytetty moniin pienitehoisiin sovelluksiin ja muiden laserien pumppaukseen. Vasta viime vuosina ne ovat tulleet tarpeeksi tehokkaiksi käytettäväksi yksinään metallin työstöön. HPDL-lasereita (High Power Direct-diode Laser) on käytetty pienempää intensiteettiä vaativiin pinnoitukseen ja pintakarkaisuun. Diodilaserin ongelmana on ollut säteenlaadun heikkeneminen diodimäärää lisättäessä, jolloin säde kohdistuu suuremmalle alalle. MIT:sta lähtöisin oleva TeraDiode julkisti vuonna 2014 uutta linssitekniikkaa käyttävän TeraBlade-diodilasermoduulin, jonka intensiteetti riittää ensi kertaa laadukkaaseen hitsaukseen ja leikkaukseen. (Matheson 2014.)

Kevyen rakenteensa ansiosta diodilaser sopii asennettavaksi nivelvarsirobotteihin. Uutta tekniikkaa käytetään ensimmäisenä Panasonic Welding Systemsin roboteissa ja sen odotetaan päihittävän kuitu- ja kiekkolaserit hinnassa, luotettavuudessa ja hyötysuhteessa. (TeraDiode Announces Purchase and Supply Agreement with Panasonic Welding Systems.)

5.3 3D-laserleikkaus

3D-laserleikkausta hyödynnetään valmiiden, muovattujen osien aukottamisessa ja rajauksessa. Tällöin myös taivutusten lähellä olevista rei'istä saadaan mittatarkkoja. Aukotukset voidaan tehdä myös esimerkiksi poraamalla tai lävistämällä, mutta 3D-laserleikkaus on joustava tekniikka monimuotoisille kappaleille. Sarjatuotanto puristimissa onnistuu paljon helpommin, jos aukottamisesta ja jätepalojen poistamisesta ei tarvitse huolehtia. Pehmeämmillä materiaaleilla hyötynä on, ettei laserleikkauksesta aiheudu mekaanista painetta osan pintaan.

Leikkauslaitteisto on asennettu yleensä portaaliin tai nivelvarsirobottiin. Ulkoiset CO₂-laserlaitteistot yhdistettynä portaaleihin olivat tehokkaina ja tarkkoina valtasemassa markkinoilla viime vuosiin asti, mutta myös CO₂-laserille sopiva, peilejä käyttävä nivelvarsirobotti on kehitetty.

3D-portaalirobottilaserleikkaus oli luonnollinen kehitysaskel 2D-portaalilaserien jälkeen, koska uusia sovelluksia päästiin kehittämään lisäämällä kaksi akselia ja kehittyneempi ohjelmisto. Autoteollisuuden käyttämät osat ovat monimutkaisesti muovattuja ja sisältävät paljon erimuotoisia aukkoja eri tasoilla (ks. kuvio 12), joten 3D-laserleikkaukselle oli luonnollinen kysyntä sillä alalla.



Kuvio 12. 3D-laserleikkausta (TRUMPF 3D Laser Cutting)

Nivelvarsirobottien tarkkuuden ja uusien lasertyyppien kehittymisen myötä on 3D-laserleikkauslaitteistojen ulottuvuutta saatu parannettua yhdistämällä laser nivelvarsirobottiin. Säteen kuljettamiseen käytetään nykyään helppouden takia enimmäkseen kuitua. Uudet laserlaitteistot sopivat kevyinä ja pieninä jopa robotin kyytiin.

3D-laserleikkaus on yleistynyt 2000-luvun alkupuolella, mutta on vielä suhteellisen uutta Suomessa. 3D-leikkauksen osuus lasersovelluksista oli Suomessa vain 2 % vuonna 2002 (Kujanpää ym. 2005, 18).

5.4 Nestauksen optimointi pilvipalveluna

Bystronic on kehittänyt laserleikkausta käyttäville valmistajille ja alihankkijoille BySoft 7 CAD-ohjelmiston osien, leikkausten ja taivutusten suunnitteluun, ohjelmointiin ja simulointiin. Ohjelma osaa muiden vastaavien tavoin laatia nestin, mutta lisäpalveluna Bystronicilla on BySoft-ohjelmaan suoraan liittyvä ByOptimizer-verkkopalvelu, joka pystyy tekemään nestauksen entistä tehokkaammin. Ohjelma lähettää tilauksen

tiedot pilvipalveluun, joka laskee optimaalisen leikkaussuunnitelman. ByOptimizer sisältää yli 300 parametrin tietokannan leikkausprosesseista ja eri materiaalien käyttäytymisestä. Palvelu ottaa huomioon esimerkiksi laserin tehon, lämmöntonnin vaikutukset materiaaliin, leikkausnopeudet, mikrokiinnikkeiden tarpeen, eri nestausvaihtoehdot ja leikkeiden yhteiset reunat muodostaakseen mahdollisimman nopean leikkausreitit käyttäen mahdollisimman vähän materiaalia. (Hergt 2015.)

Hetkeä myöhemmin käyttäjä näkee nestauksen sekä ajan- ja materiaalinkäyttötiedot Bysoft-ohjelmistossa, jonka perusteella voidaan tehdä kustannuslaskelma ja tarjous asiakkaalle. Jos kauppa syntyy, leikkausreittisuunnitelma ostetaan ja siirretään laserleikkauslaitteiston toteutettavaksi. Materiaalinsäästöjen kerrotaan olleen merkittäviä käsin nestaukseen verrattuna, noin 15-30 %. Jopa normaaliin ohjelmalliseen ”tiukaan” nestaukseen verrattuna eri vaihtoehtojen pilvilaskennalla voivat säästöt olla luokkaa 10 %. Materiaalisäästöjen lisäksi tulevat säästöt leikkausajassa ja suunnittelijan työajassa, kun tehokkaan leikkaussuunnitelman voi ostaa valmiina. (Mt.)

6 Uutta muovausteknologioissa

6.1 Automaattinen työkalunvaihto särmäyspuristimeen

Amada HD ATC -särmäyspuristimessa on esitelty ensimmäinen automaattinen työkalunvaihdin perinteiseen operaattorikäyttöiseen, täysikokoiseen särmäyspuristimeen. Ylä- ja alatyökaluja voidaan vaihtaa samaan aikaan ohjelmallisesti puristimen vieressä sijaitsevista työkalumakasiineista. Työkalut paikoitetaan 0.1 mm tarkkuudella. Automatisoinnilla saadaan vähennettyä asetusajoja ja operaattorin tarvetta, joten se soveltuu parhaiten vaihtuvaan pienerätuotantoon, jossa työkalujen vaihtoon kuluisi normaalisti paljon työaikaa. Vaihtotapahtuman aikana puristimen edessä on suojaplexi. Jalkakäyttöinen askelkytkin liikkuu koneen edessä työvaiheiden mukana, jolloin sen käyttö on helppoa ja turvallista. (HD ATC Press brake with automatic tool changer.)

Pienissä särmäyspuristimissa työkalun vaihdon voi suorittaa leikkeitä syöttävä roboti. Näin toimii esimerkiksi Baykalin valmistama E-BendCell, jossa syöttölaite, robotti, särmäyspuristin ja valmiit tuotteet pois kuljettava liukuhihna muodostavat itsenäisen, miehittämättömän taivutussolun. Robotin vaihdettavissa on muutamia ala- ja ylätyökaluja. Tällainen solu sopii kohtalaisen pienien, useita taivutuksia sisältävien levyosien piensarjatuotantoon. (E-BendCell: The productive all-purpose bending cell.)

Salvagnini esitteli vuonna 2014 B3-särmäyspuristimeen Automatic Tool Adjuster -ominaisuuden. Ylätyökalu koostuu paininrivistöstä, joka käyttöpituutta voidaan säätää työntämällä muita painimia rivissä sivuun yläpuolisella lineaarirobotilla. Painimia ei työnnetä makasiiniin ja vaihdeta Amada HD ATC:n tapaan, vaan rivistöön tehdään pieniä aukkoja, jolloin niiden väliin jää halutun levyinen paininrivistö. Alatyökaluina on kaksi palkkia, joiden etäisyyttä säädetään tarkasti halutun taivutussäteen saavuttamiseksi. Molemmat säädöt tapahtuvat automaattisesti taivutussuunnitelman mukaan. ATA-ominaisuudella varustetulla puristimella eri materiaalien ja levynpaksuuksien särmäminen onnistuu ilman työkalunvaihtoja. (B3 ATA: kit production with press-brake.)

6.2 Nopeampia särmäysparametrien asetuksia

LVD:n särmäyspuristimien ohjaukseen sopiva LVD Cadman -ohjelmisto nopeuttaa taivutusten ohjelmoimista. Piirustusten CAD-ohjelmilta tuomisen vaihtoehtona operaattori voi kosketusnäytöllä piirtää halutun ohutlevymuodon ja sen jälkeen mitoittaa sen CAD-ohjelmien tapaan. Ohjelma tekee tämän perusteella optimaalisen taivutussuunnitelman työkalujen paikkoja myöten ja näyttää sen työvaiheet ruudulla. Taivutuksen aikana näytöltä voi seurata taivutusohjeita. (Cadman-B 3D.)

6.3 Parannuksia särmäyksen ergonomiaan

Luvussa 6.1 mainittiin Amadan särmäyspuristimeen asennettu työvaiheiden mukana liikkuva askelkytkin. Haco esitteli EuroBLECH 2014 -messuilla Syncview-näytön. Se on 8 tuuman tabletti, joka on kiinnitetty särmäyspuristimen painimeen ja liikkuu vaaka-suorassa työvaiheiden mukana (ks. kuvio 13). (SyncView.)



Kuvio 13. SyncView ohjeistaa käyttöä PRESSMASTER-särmäyspuristimessa (SyncView)

Hacolla oli todettu, että näytön sijaitseminen koneen sivulla aiheuttaa jatkuvaa operaattorin pään kääntymistä ja keskittymisen jakamista näytön ja työkappaleen välillä. Ratkaisuna oli asentaa päänäytön lisäksi pieni työvaihenäyttö operaattorin eteen. Se liikkuu jokaisen taivutusvaiheen jälkeen seuraavaksi käytettävän työkalun yläpuolelle, joka jo sinänsä poistaa yhden tarkistusvaiheen operaattorilta, ja näyttää kuvan kappaleen asettamisesta ja suoritettavasta taivutuksesta. Kosketusnäytöllä voi myös käänellä 3D-kuvaa lisätietojen saamiseksi poistumatta koneen äärestä. Käyttäjätesteissä on saatu jopa 25 % aikasäästöjä särmäysprosessin aikana. (SyncView.)

Kokeneilla särmääjillä, tuotevalikoiman pysyessä pienenä ja muuttumattomana, tällaisesta lisälaitteesta on hyvin vähän hyötyä. Jos edellä mainitut ehdot eivät täyty, voi

apunäytöllä tehostaa tuotantoa merkittävästi ja vähentää virheitä. Hacolla askelkyt-kin oli edelleen perinteistä lattialla seisovaa mallia. Jos Hacon ja Amadan liikkuvat apulaitteet saataisiin samaan koneeseen, se toisi kaivattua tehokkuutta särmäyspu-ristimen käyttöön, jolloin ihmistyövoimaa käyttävä pienerätuotanto olisi entistä kil-pailukykyisempää automatisoidun massatuotannon kanssa.

6.4 Kaksipuoleinen inkrementaalimuovaus

Ford on kehittänyt F3T:ksi nimettyä painomuovaustekniikkaa. Aiempi tekniikka tun-nettiin numeerisena painomuovauksena (SPIF, Single Point Incremental Forming), jossa vaakasuoraa reunoistaan kiinnitettyä ohutlevyä muovattiin muotoon tankomai-sella työkalulla. Työstö tapahtui liikuttamalla työkalua asteittaista työstörataa pitkin ja painamalla venyttäen levyä vähitellen haluttuun muotoon (ks. kuvio 14).



Kuvio 14. SPIF-työstöä (SPIF-A Project)

Ford kehitti painomuovauksesta tarkemman käyttämällä levyn ylä- ja alapuolella sa-manlaisia työkaluja ja robotteja. Tällöin toinen työkaluista muovaa ja toinen tukee muovausta samassa kohdassa levyn toisella puolella. Työstöön käytetään pienempää, lämpökäsitellystä kuulalaakerista tehtyä pallopäätä työkalun kärjessä (Wright 2014). Yleisemmin DSIF-tekniikkana (Double Sided Incremental Forming) tunnettu mene-

telmä mahdollistaa paikallisen muovauksen myös yläsuuntaan, jolloin kappaleen muoto ei ole rajoitettu kulhomaiseksi SPIF:n tapaan (ks. kuvio 15).



Kuvio 15. F3T-tekniikalla muovattu Ford-logo (McCue 2014)

F3T:stä kaavailaan vaihtoehtoa pienille sarjoille kun normaalin puristimen käyttämät muotit vaatisivat liikaa aikaa ja rahaa. Menetelmä sopii hyvin prototyyppien valmistukseen, jolloin osia voidaan testata käytännössä ennen kalliin muotin tilaamista. Yksittäisen osan valmistamiseen voi kuluakin tunteja, mutta työkalukustannuksia ei tule. Menetelmän potentiaalisena hyödyntämiskohteena nähdään muun muassa tilauksesta tehtävät ohutlevyvaraosat esimerkiksi vanhoihin autoihin tai lentokoneisiin. (Wright 2014.)

6.5 Lisäominaisuuksia taivutusautomaatteihin

RAS UpDownCenterissä levy syötetään pöydälle, sitä siirretään imukuppien avulla ja yksi terä tekee käännöt molempiin suuntiin koneen takana. Sen etuna taivutuskoneisiin verrattuna on moduuleista koostuva pidin, jolloin painimen alla saa olla jo muovattuja reunoja. Painimen pitimet muistuttavat kiinnitystavaltaan särmäyspuristimen ylätyökaluja ja ne asettelee tarpeen mukaan painimen yläpuolella oleva lineaarirata-

robotti (ks. kuvio 16). Pitimien leveyttä rajaamalla voidaan valmistaa joka reunalta useasti taivutettuja tuotteita ilman tuotekohtaisia aputyökaluja (ks. kuvio 17). Kääntöliikkeen tekee koneen levyinen taivutinpalkki. (RAS UpDownCenter).



Kuvio 16. Robotti muuttaa pitimen leveyttä (RAS UpDownCenter)



Kuvio 17. Operaattori tekee viimeiset kevennetyt taivutukset käsin (RAS UpDownCenter)

RAS Multibend Centerissä on lisäksi osina ohjattava taivutinpalkki, jolloin vierekkäisille kielekkeille voidaan tehdä erilaiset taivutukset ja valmistaa näin monipuolisempia konstruktioita. Taivutinpalkki koostuu samantapaisista moduuleista kuin pidin. Pitimen leveyttä säätää tässä mallissa kaksi robottia samalla lineaariradalla ja levyjen syöttö on automatisoitu miehittämätöntä ajoa varten. Tarvittavaa tehdaspinta-alaa ja hintaa nostaa myös kotelomaisten tuotteiden taivutus valmiiksi saakka ja valmiiden tuotteiden purkaminen suurelle rullapöydälle. (RAS Multibend Center.)

Prima Powerilla on automaatiolinjaan liitettävä Express Bender, jossa on taivutuspalkin sijaan suuri C-kita. Rajatun levyisiä taivutuksia varten koneessa on kidan sisälle liikkuvat kaksi pientä lyhytterää. Työkalunvaihto on robotisoitu RAS:n tapaan, mutta hieman järeämmillä laitteistoilla. (Express Bender Video.)

Express Benderiin on saatavana monipuolisia lisälaitteita, kuten kidan sisällä toimiva leikkuri ja leikatun osan sivulle purkava työntöterä. Näillä saadaan käytettyä suurta levyaihiota pienten taivutusosien valmistukseen. Hyötynä on, ettei viimeisen taivutuksen ei tarvitse olla ylöspäin eikä taivutusta tarvitse keskeyttää osien purkua varten. (Cutting Tool Automation for Prima Power Express Bender.)

6.6 Laserleikkauksen ja taivutuksen yhdistelmäkoneet

Amada Lasbend AJ on 2012 esitelty ja EuroBLECH-messuilla palkinnon voittanut laserleikkurin ja taivutusautomaatin yhdistelmä. Koneen sivu aukeaa 90 astetta lasetauspöydäksi, jolle asetettuun levyyn tartutaan kiinni ja seinä kääntyy takaisin sisään. Erikoista koneessa on, että tästä eteenpäin levyä käsitellään koko ajan pystysuorassa asennossa.

Leikkaus suoritetaan kuitulaserilla ja leikkausjätteet putoavat koneen alaosaan. Jos levystä on valmistettu pienempiä leikkeitä, ne jätetään kiinni mikrokiinnikkeillä. En-

nen aihion irtileikkausta robotti tarttuu kiinni kappaleeseen ja vie sitten levyn 25-paikkaiseen varastomoduliin.

Kone mittaa tarkan levynpaksuuden ja säätää taivutusparametreja sen mukaan. Levyn paikoitus kiinnittimessä mitataan laserilla. Tarvittaessa kierteytysyksikkö hakee sopivat työkalut ja tekee kierteet.

Taivutusyksiköllä on 36 työkalun makasiini ja automaattinen työkalunvaihtaja. Taivutusyksikkö on kaikkiin suuntiin kääntyvä ja toimii levyn ympärillä sen molemmin puolin, jolloin myös muiden kuin levyn suunnassa vaaka- tai pystysuorien taivutusten teko onnistuu ja taivutuskulmat ovat vapaasti valittavissa. Toinen työkalu tukee taivutuksen aikana kielekettä vastakkaiselta puolelta, jolloin taivutuksesta tulee tarkka. Tukeminen estää pystysuorassa roikkuvan levyn epätoivotun liikkumisen ja joustamisen. Työkaluvalikoiman ansiosta voidaan taivuttaa hyvinkin pieniä kielekkeitä keskeltä levyä. Valmiit levyosat voidaan säilöä 80-paikkaiselle linjalle odottamaan jatkokorjauksia.

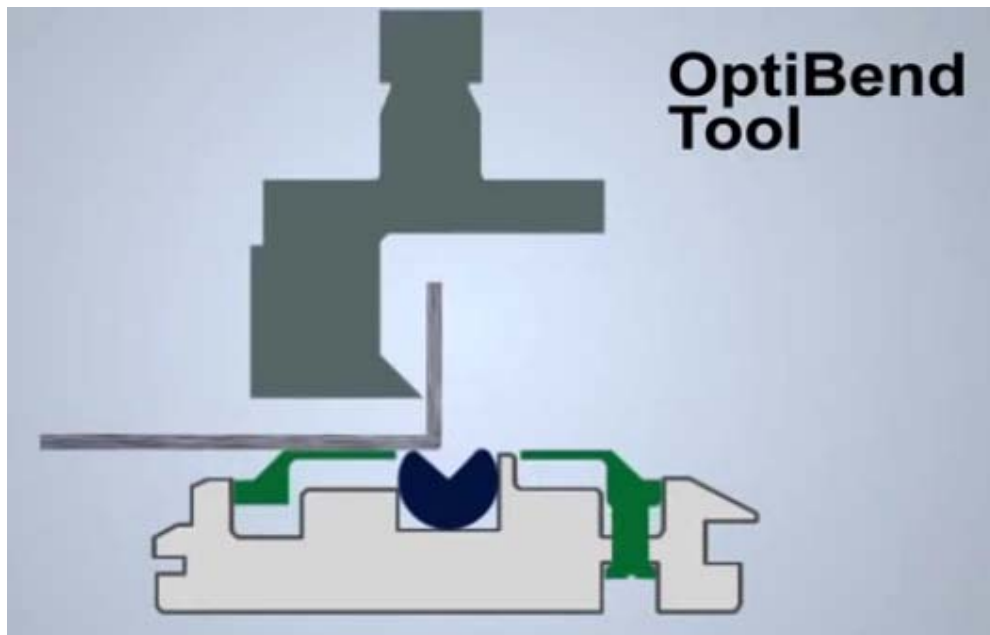
6.7 Levytyökeskus taivutusominaisuudella

LVD Strippit PX on hyvä esimerkki siitä, miten perinteinen levytyökeskus on pärjännyt kilpailussa lasertyöasemien kanssa. Jos levytuotteen osat sisältävät kaarimuotojen sijaan paljon pientä aukotusta, levytyökeskuksen kääntyvillä index-työkaluilla pärjää pitkälle ilman laseria. Levytyökeskuksen selkeä etu on pienten muovausten, esimerkiksi kalottien tekeminen samassa työvaiheessa. Jopa 500 iskun minuuttivauhdilla ohutlevytuotteet valmistuvat nopeasti. Strippit PX pystyy käsittelemään levyjä 3.5 mm paksuuteen asti. Laserista poiketen nopeus ei merkittävästi muutu levynpaksuuden kasvaessa. (LVD Pullmax Dynamic Overview.)

Strippit PX:ssä on 20 työkalun karuselliin laitettu OptiBend-taivutustyökalu. Sillä voi tehdä pienten kielekkeiden 90 asteen taivutukset ylöspäin 75 mm korkeuteen asti. Rajoitusten takia taivutukset voidaan tehdä tyyppillisesti vain osalle tuotteista, mutta

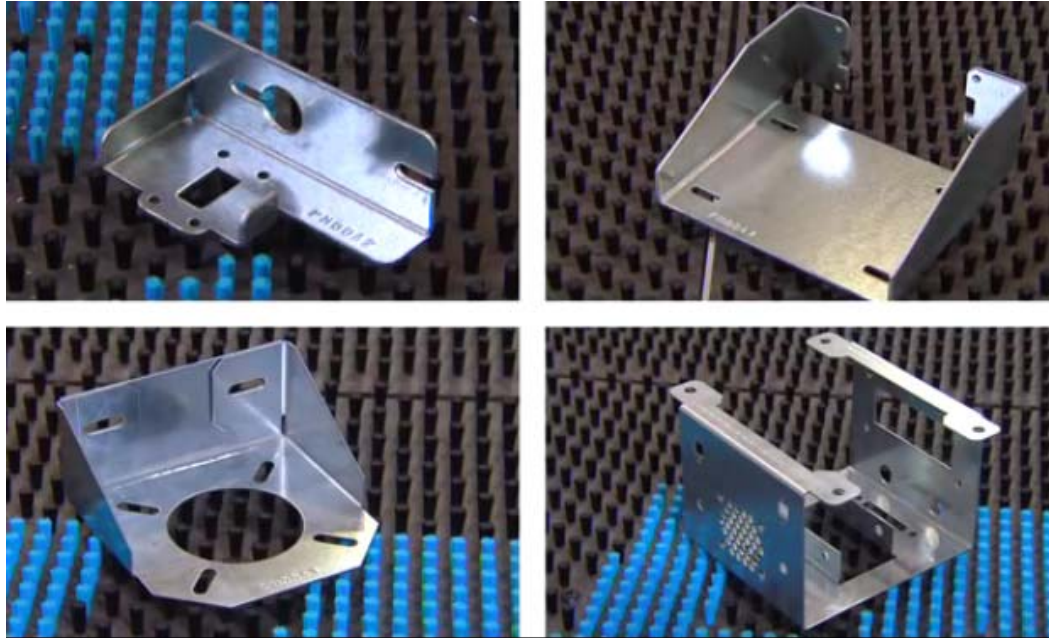
soveltuvien tuotteiden osalta on mahdollista säästää taivutusautomaatin tai särmäyspuristimen vaatima työvaihe. (Mt.)

Työkalun rakenteena on yläpuolinen painin, joka painaa levyä muutamia millimetrejä alaspäin työpöydän tukien joustaessa mukana. Levyn alla oleva putkimainen työkalu kääntää kielekkeen painettaessa kulmaksi (ks. kuvio 18). (Mt.)



Kuvio 18. Taivutustyökalu työiskun lopussa (LVD Pullmax Dynamic Overview)

Työkalulla saa taivutettua korkeintaan 90 mm leveitä kielekkeitä, mutta se riittää useimpiin sovelluksiin (ks. kuvio 19). Tarpeen mukaan kielekkeitä voi suunnitella tuotteeseen useampia vierekkäin. Työkalun kiinteän leveyden takia saatetaan tarvita pidempiä aukotuksia, mutta se harvemmin on ongelma. Vastapainoksi LVD Cadman -ohjelmistolla levynkäytön saa optimoitua. Se osaa tehdä automaattisen nestauksen ja työkalunkäyttösuunnitelman piirustusten perusteella. (Mt.)



Kuvio 19. Esimerkkejä taivuttavalla levytyökeskuksella tehdyistä tuotteista (LVD Pullmax Dynamic Overview)

20 työkalun rajoitusta voi kiertää hankkimalla 40 lisäpaikkaa työkalumakasiinilla tai käyttämällä työkalua, jossa on 10 indeksoitua paikkaa pienille työkaluille. Pienten tuotteiden purkamista varten pöydässä on 500 x 525 mm kokoinen aukeava luukku, jonka kautta valmiit osat voidaan erottaa rangasta. Miehittämättömään ajoon on saatavana automaattiset syöttö- ja purkulaitteet. (Mt.)

6.8 Suurpainemuovauksen menetelmät

Sisäpuolinen suurpainemuovaus

Hydroformingina tai hydromuovauksena tunnettu suurpainemuovaus on keksitty jo 1950-luvulla, mutta sitä on käytetty yleisesti autoteollisuudessa vasta 2000-luvun alussa. Suomessa tekniikka on edelleen harvinaista. VTT hankki Tornioon ensimmäisen suurpainemuovauslaitteen noin vuonna 2005 (Heiska 2006; Pelimanni 2014, 10).

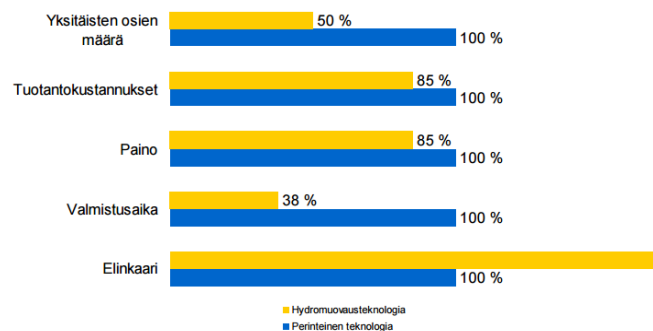
Suurpainemuovaus mielletään yleisimmin putkien ja palkkien muovaamiseen sisäpuolisella paineella esimerkiksi autojen runkopalkeiksi (ks. kuvio 20). Tähän tarkoi-

tukseen oli hankittu myös VTT:n laitteisto. Runkopalkkien suurpainemuovauksen etuja ovat lujuus, korirakenteen suunnittelun vapaus, osien määrän, hitsauksen ja työvaiheiden väheneminen, tasaisesti jakautuva venymä ja alhainen paino (Mäki-Mantila 2001, 57-58). Haittana ovat laitteiston ja muottien vaatimat investoinnit. Materiaaleina käytetään tavallisen teräksen lisäksi suurlujuusteräksiä ja alumiinia (Sheet Metal Forming – Hydroforming).



Kuvio 20. Auton runko, jossa on suurpainemuovautut alumiiniset runkopalkit (The Corvette Story)

Kuviossa 21 on listattu Volkswagen AG:n pakoputkien valmistuksessa hydromuovamalla saavutettuja etuja Veli-Matti Pelimannin opinnäytetyön mukaan.

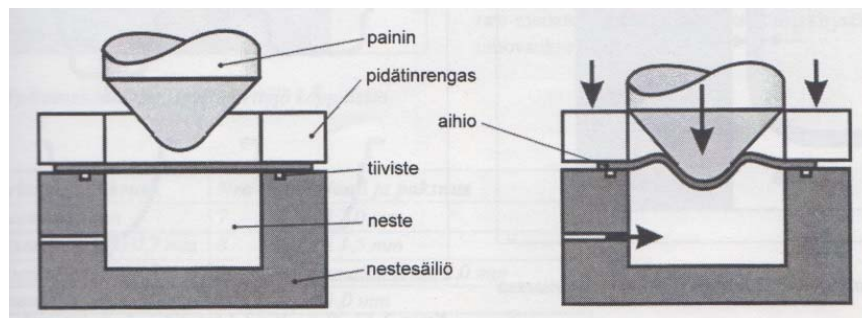


Kuvio 21. Hydromuovauksen etuja pakoputkien valmistuksessa (Pelimanni 2014, 32)

Aukotus voidaan tehdä muotissa lävistämällä tai seuraavassa työvaiheessa esimerkiksi 3D-laserleikkauslaitteistolla. Ohutlevyjen muovaamiseen nestepaineen avulla on muutamia menetelmiä, joista käytetään keskenään helposti sekaantuvia termejä.

Hydromekaaninen syväveto (Hydromechanical Deep Drawing)

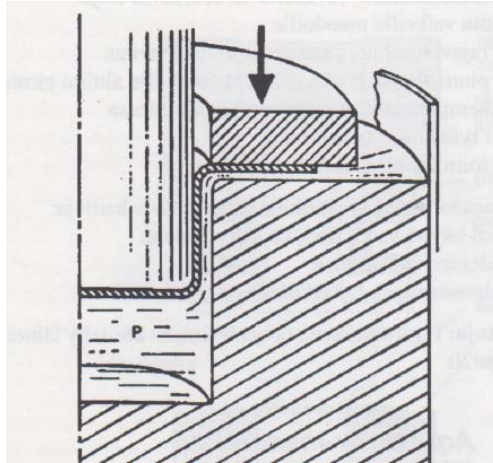
Tavallista syvävetoa muistuttavalla hydromekaanisella syvävedolla voidaan saavuttaa n. 35 % parempia vetosuhteita tavalliseen syvävetoon verrattuna. Levy asetetaan pidätinrenkaiden väliin ja yläpuolisella painimella pakotetaan se myötäilemään painimen muotoa (ks. kuvio 22). Alapuolista nestepainetta säädetään painimen liikkeen aikana, jotta levy ei repeydy. Menetelmä sopii kuppimaisten ja sylinterimäisten kappaleiden valmistamiseen. (Mäki-Mantila 2001, 25-27.)



Kuvio 22. Hydromekaanisen syvävedon periaate (Mäki-Mantila 2001, 25)

Aquadraw

Aquadraw-menetelmä on hydromekaanisen syvävedon yksi sovellus. Siinä pidätinrenkaan mekaanisen pitovoiman sijasta neste päästetään virtaamaan kappaleen ja vetorenkaan välistä, jolloin niiden välillä ei ole metallista kosketusta ja etenkin pehmeiden materiaalien naarmuuntuminen vähenee (ks. kuvio 23). Ulkopuolisilla laidoilla estetään nesteen valuminen puristimen pöydälle. Menetelmä parantaa vetosuhdetta, mutta voimaa tarvitaan noin neljä kertaa tavalliseen syvävetoon verrattuna. Venymä on tasaisempaa, jolloin tämä menetelmä saattaa mahdollistaa halvempien aihiomateriaalien käytön. (Mts. 27.)

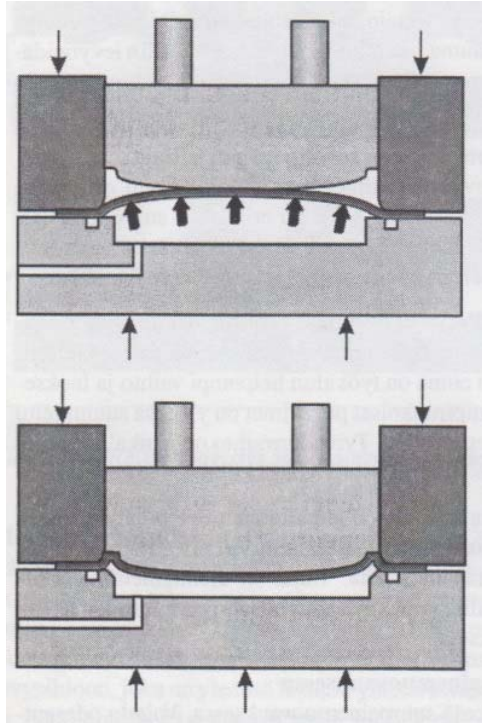


Kuvio 23. Aquadrawin periaate (Mäki-Mantila 2001, 28)

Aktiivinen hydromekaaninen muovaus

Aktiivista hydromekaanista muovausta käytetään suurten koripaneelien valmistukseen. Levyä esivenytetään nestepaineella varsinaista vetosuuntaa vastaan, jolloin se muokauslujittuu kauttaaltaan ja parantaa valmiin tuotteen lommahduskestävyyttä (ks. kuvio 24). Samalla levyn keskusta saadaan varamateriaalitasku, joka tarvitaan vetoa varten, koska aihio on reunoistaan kiinnitetty. (Mts. 59-60.)

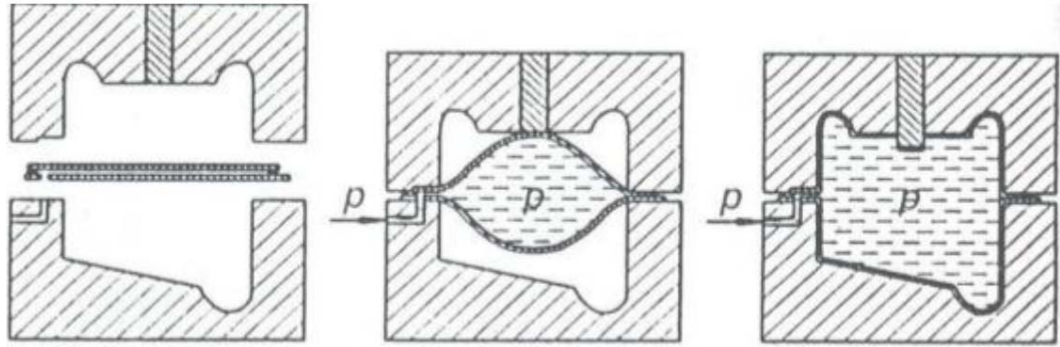
Vedon jälkeen nestepaine nostetaan noin 600 bariin, jolla varmistetaan pienempien yksityiskohtien muovautuminen ja vähennetään takaisinjoustoja. Tuloksena on levyaihiot, jotka leikataan ja liitetään muuhun rakenteeseen. Menetelmän etuina ovat kappaleen hyvä pinnanlaatu, mahdollisuus käyttää ohuempia materiaalipaksuuksia ja olla käyttämättä jäykisteitä. Työkalukustannukset ovat perinteistä puristinta alhaisemmat, koska tarvitaan vain yksipuoleinen työkalu. (Mts. 60.)



Kuvio 24. Aktiivisen hydromekaanisen muovauksen periaate (Mäki-Mantila 2001, 60)

Levyn hydromuovaus

Polttoainetankin muovaukseen yhdellä iskulla on harkittu kuvion 25 mukaista tekniikkaa muovaamalla levyaihiota sisäpuolisella paineella. Pelimannin (2014, 33) mukaan se oli vielä vuonna 2009 kokeiluasteella. Harrastajat ovat valmistaneet omia osiaan vastaavalla menetelmällä ilman muottia. Pullistamalla kahden reunoistaan yhteen hitsatun leikkeen muodostama aihio esimerkiksi painepesurin tuottamalla vedenpaineella, voidaan valmistaa onttoja, kaartuvia osia esimerkiksi moottoripyörien pakoputkistoihin. Ainakin muotittomana menetelmä vaatii jälkityöstöä, mutta on nopea ja edullinen tapa saada lähes oikeanlainen muoto aikaiseksi esimerkiksi prototyyppiä varten.



Kuvio 25. Polttoainetankin hydromuovauksen periaate (Pelimanni 2014, 33)

Pelimanni tutki opinnäytetyössään Torniossa olevan putkien suurpainemuovaamiseen hankitun puristimen soveltuvuutta levyosien muovaamiseen. Hänen ratkaisunsa oli raskaan muotin koneistaminen ja levyn muovaus sen muotoihin levyn toiselle puolelle tuodulla suurella nestepaineella. Menetelmä vastaa kuvion 25 periaatetta sillä erolla, että levyjä on vain yksi ja paine tuodaan suoraan muottiin. Ehkä eniten syvävetoa muistuttavassa prosessissa levyn pitovoimaa säädettiin kiristämällä pitolevyn pulttikehän pultteja manuaalisesti sopivaan momenttiin. Työssä onnistuttiin muutamien murtumien jälkeen valmistamaan haluttu osa. Menetelmä oli hidas, ihmistyövoimaa vaativa ja valmistettu työkalu painoi noin 800 kiloa. Sillä saatiin valmistettua prototyyppiosia, mutta kustannuksiltaan se on käsittääkseni huomattavasti kalliimpi ja siten mielestäni huonompi vaihtoehto kuin muut tässä luvussa esitetyt menetelmät. (Mts. 64-74.)

Muovaus kumikalvon avulla

Kumikalvon ja nestepaineen yhdistelmällä on näistä menetelmistä eniten sovellusmahdollisuuksia. Rubber Diaphragm Forming sisältää terminä kaksi samantapaista tekniikkaa, joiden erona on alatyökalun rakenne. Yhteistä näille on nesteen pumpaaminen kappaleen ja kumikalvon yläpuolelle, suuret käyttöpainet, soveltuvuus monimutkaisten muotojen tarkkaan muovaamiseen ja naarmuttamaton muovausprosessi (mts. 60). Näille menetelmille ei ole vielä suomenkielisiä vastineita.

Fluid Cell Forming

Flexform-kauppanimellä tunnettu fluid cell forming on erittäin monipuolinen suurpainemuovausmenetelmä. Sen selkeänä etuna ovat alhaiset työkalukustannukset, koska alatyökaluna toimii pöytä jolle asetetaan puusta, muovista tai metallista valmistettuja muotteja. Muotteja ei tarvitse kiinnittää tai paikoittaa mitenkään, joten niiden vaihto on nopeaa. Yleensä useampia muotteja käytetään samaan aikaan, jolloin erilaisia osia saadaan valmistettua samalla työkierrolla. Muotit sivellään tarvittaessa öljyllä kitkan vähentämiseksi.

Muottien päälle asetetaan valmiiksi leikatut leikkeet ja ne kohdistetaan esimerkiksi paikoitusnastojen avulla. Muotit voivat olla uros- tai naaraspuoleisia ja ne voivat sisältää teräviä reunoja, joista ylimääräisen levyn halutaan leikkautuvan poikki muovauksen lopuksi (ks. kuvio 26). Muovauksen etenemistä voidaan hallita ja rypyttymistä estää käyttämällä muotin ympärillä kehikkoa, joka rajoittaa muovausvyöhykkeen muotin välittömään läheisyyteen (ks. kuvio 27).



Kuvio 26. Terävällä muotinreunalla saadaan valmiiksi leikattuja tuotteita (Avure Fluid Cell Press)



Kuvio 27. Yksinkertaisia flexform-työkaluja (Avure Technologies Sheet Metal Lab Forming Video 1)

Muotit peitetään vähintään yhdellä elastomeerimatolla kumikalvon suojaamiseksi kulumiselta ja teräviltä kulmilta. Puristin saattaa pöydän sisäänvedon aikana laskea sille vielä koko pöydän peittävän kumimaton. Korkean, 1000-1400 barin paineen ansiosta matot muovautuvat pieniinkin väleihin haittaamatta prosessia. Menetelmää on käytetty eniten lentokone- ja autoteollisuudessa. Työvaiheen pituus on kymmenistä sekunneista kolmeen minuuttiin, joten tätä ei pidetä sarjatuotantomenetelmänä, mutta Suomessa tyypillisten sarjakokojen tuottamiseen ja vaihtuvaan pienerätuotantoon se voi sopia hyvin. (Fluid Cell Presses - Rectangular forming trays.)

Flexforming sopii monenlaisten muotojen taivutukseen. Yksinkertaisimmillaan muotti on hiottu puupalikka, jonka päälle leike asetetaan. Muotin ollessa kaareva saadaan jo näin helposti löydettyä muoto, jonka valmistamiseen särmäyspuristimet tai taivutusautomaatit eivät pysty. Kaksipuoleisiin puristimen ohutlevymuotteihin verrattuna flexformingin työkalukustannukset ovat selkeästi alhaisemmat yksipuolisen, kevyen muotin ja edullisten muottimateriaalien takia. Sarjatuotannon näkökulmasta huonona puolena on pidempi työvaihe aika ja käsityön käyttö. Toisaalta prototyyppien ja pienerien valmistaminen on nopeaa ja edullista. Osat ja muotit voidaan suunnitella tietokoneella monimutkaisiksi, jolloin voidaan säästää tuotteen kokoamiskustannuksissa. Menetelmä voi vaatia kuitenkin kokeiluja, koska levyn muovautuminen ei ole täysin etukäteen ennustettavissa tietokonemalleilla.

Deep Draw Hydroforming

Toinen kumikalvomenetelmä deep draw hydroforming on nimensä mukaisesti syvävetoa muistuttava menetelmä, jossa painin vetää levyn haluttuun muotoon paineen pidätellessä muovaamatonta osuutta levystä tasaisena (ks. kuvio 28). Syvävedon tapaan tuotteet ovat yleensä kuppimaisia. Puristimen yläosa on samanlainen flexforming-puristimen kanssa. Jotkin koneet soveltuvat molemmille kumikalvomenetelmille, jolloin yhdellä koneella on valmistettavissa laaja tuotevalikoima.



Kuvio 28. Deep draw hydroformingin periaate (Avure Deep Draw Hydroforming Principle)

Elastiset työkalut

Nestepaineen ja kumikalvon yhdistäviä menetelmiä ei pidä sekoittaa muovaukseen elastisilla työkaluilla. Tällainen on esimerkiksi rubber pad forming, joka oli alun perin yksinkertainen toisen maailmansodan aikainen muovaustekniikka. Siinä puristimella painettiin suoraan kovaa kumilaattaa levyä ja positiivista muottia vasten. Nykyisin vastaava menetelmä olisi painaa muotoiltua paininta levyä ja elastomeerityynyä vasten (Mäki-Mantila 2001, 32-33), tai käyttää pehmeää kumia painetta ohjaavan kotelon sisällä (ks. kuvio 29). Näiden menetelmien hyötyinä ovat pienet työkalukustannukset yksipuolisen muotin ansiosta ja ne soveltuvat pienten sarjojen tuotantoon.



Kuvio 29. Nykyaikaisen rubber pad formingin periaate (Phoenix 3D Metaal)

7 Uutta liittämisteknologioissa

7.1 3D-laserhitsaus

Laitteistot

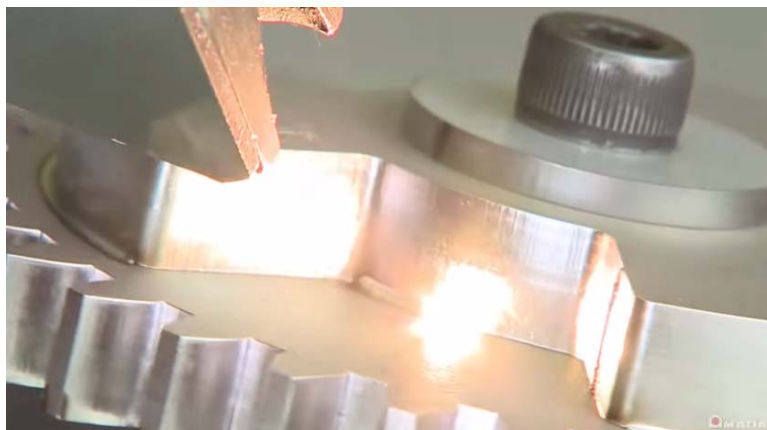
3D-laserhitsauslaitteiston liikeradat on toteutettu yleensä 3-5-akselisella portaalilla tai puoliportaalilla tai 5-akselisella nivelvarsirobotilla. Portaalimalleissa käytetään mallista ja tuotteesta riippuen 0-2-akselista pöytää ja kaikissa tarpeen mukaan 1-2-akselista pöytään kiinnitettävää lisälaitetta. Liikeakseleiden jakamisesta robotin ja pöydän suhteen voi olla hyötyä. Esimerkiksi pyörähdysymmetrisen liitoksen hitsaaminen on koneelle helpompaa pyörittämällä kappaletta laserin pysyessä paikallaan, kuin kappaleen kiertäminen eri puolilta, johon laitteistolta vaadittaisiin suuria liikeraatoja. Tarvittavien liikeakseleiden määrä, suunnat ja toteutustapa riippuvat tuotteista ja käytettävissä olevasta laitteistosta. Lopputuloksena on 5 tai 6 akselia, jotka kaikki toimivat yhteisellä ohjauksella.

Laitteistojen koot vaihtelevat pienimpien puoliportaalien viemästä noin neliön lattiapinta-alasta omissa suurissa huoneissa toimiviin nivelvarsirobotteihin. Pienissäkin työasemamallisissa laitteistoissa vaihdettavilla pöydän työkaluilla, kuten eri suunnissa kappaletta pyörittävillä lisälaitteilla, saadaan kevyt 4-akselinen puoliportaaliriittämään monenlaisille kappaleille. Laitteiston valintaan vaikuttaa ensisijaisesti työstettävien kappaleiden koko.

Joissain malleissa on vaihdettava työstöpää, jolloin leikkaus ja hitsaus voidaan tehdä samalla koneella. Tämä on käytännöllistä pienemmille tuotantolaitoksille, jossa yhdelle koneelle saadaan näin riittävän suuri käyttöaste. Toinen vaihtoehto on käyttää säteen jakamista kahden työpisteen välillä. Yhteisen laserlaitteiston käyttäminen kahdessa työpisteessä on edullisempaa kuin kahden erillisen itsenäisen laitteen hankkiminen. Tämä ratkaisu soveltuu erityisesti tuotantoon, jossa panostukseen kuuluu enemmän aikaa kuin lasertyöstöön. Toinen työasemista voi olla esimerkiksi leikkaukseen ja toinen hitsaukseen.

Portaalit ovat olleet nivelvarsirobotteja tarkempia liikkeiden suhteen ja soveltuneet helpommin CO₂-lasersäteen kuljetukseen peileillä. Laitteistojen keventyessä ja kuitutekniikan ja robottien tarkkuuden kehittyessä nivelvarsiroboteista on tullut hyvä vaihtoehto. Säteen kuljettaminen kuidussa mahdollistaa nivelvarsirobotin suurten liikeratojen käytön ja siten monipuolisemmat hitsausasennot.

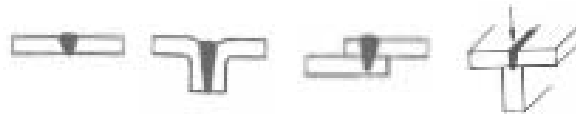
Osassa laserlaitteistoista säteen fokusta voidaan muuttaa lennossa useita senttimetrejä, jolloin työstöpään etäisyys kappaleesta saa pysyä vakiona, vaikka hitsattavan muodon etäisyys muuttuu (ks. kuvio 30). Tämä helpottaa pääsyä ahtaampiin liitoskohtiin. Ominaisuudella pystytään myös muokkaamaan säteen leveys optimaalisesti eri liitosmuotojen mukaan (FLW 4000 M3 Fiber Laser Welder).



Kuvio 30. Fokuksen säätöä lennossa (FLW 4000 M3 Fiber Laser Welder)

Liitosmuodot

Laserhitsaus tarjoaa monipuolisen valikoiman liitosmuotoja, jotka antavat vapauksia suunnittelijalle. Osia voidaan liittää muilla menetelmillä hankalasti luoksepäästäväissä paikoissa (Matilainen ym. 2010, 302). Päittäisliitokset ovat nopeita hitsata, mutta vaativat tarkan sovituksen ja railonvalmistuksen. Limiliitokset mahdollistavat suuremmat toleranssit paikoituksen ja leikkausjäljen suhteen, kun avaimenreikähitsauksella liitetään kaksi päällekkäistä levyä yhdeltä puolelta (ks. kuvio 31). Laippaliitokset, T-limiliitokset ja pienahitsit ovat myös vaihtoehtoja. Ilmaraot on kaikissa tapauksissa saatava mahdollisimman lähelle nollaa, ellei kyseessä ole pinnoitettu materiaali. Lisäaineen käyttö sille sopivissa liitosmuodoissa mahdollistaa lievempien railotoleranssien käytön. (Kujanpää ym. 2005, 239-246.)



Kuvio 31. Liitosmuotoja (Kujanpää ym. 2005, 240-241)

Etuja

Laserhitsaus sopii useille eri materiaaleille, ainevahvuuksille ja eri materiaalien yhdistämiseen. Materiaalit voidaan näin ollen valita tuotteeseen vaadittavien paikallisten ominaisuuksien perusteella (Matilainen ym. 2010, 299). Pintoja ei tarvitse yleensä jälkityöstää hitsin hyvän pinnanlaadun ansiosta. Rajattu lämmöntuonti auttaa pitämään muodonmuutokset pieninä, erityisesti ohuilla ja lämpöherkillä materiaaleilla. Lämmöntuontia ja muodonmuutoksia voidaan hallita tarvittaessa lisäksi laseria pulssittamalla, silloituksella ja hitsausjärjestyksellä.

Vaikka laitteistoinvestointi on mittava, ovat sen jälkeiset käyttö- ja huoltokulut alhaisia, jolloin on mahdollisuus päästä merkittävästi alhaisempiin yksikkökustannuksiin kaarihitsausmenetelmiin verrattuna. Laseria käytettäessä tuotannon läpäisy aika pienenee leikkauksen ja kokoonpanohitsauksen jälkeisten koneistusten jäädessä pois. Tätä voidaan hyödyntää pienentämällä puolivalmisteveraston hälytysrajoja ja muu-

tenkin varaston arvoa ja siirtyä kohti Just In Time -tuotantoa. Nopea vasteaika tilauksesta toimitukseen on usein myös kilpailuetu.

Vaatimuksia

Laserhitsauksen suurin vaatimus on lähes ilmaräotön osien sovitus. Ensinnäkin leikkauksijäljen pitää olla laadukasta ja toiseksi pinnat pitää huolellisesti kiinnittää toisiinsa. Sallittu ilmarako on ohutlevyillä korkeintaan luokkaa 0.1 mm, liitostyyppistä ja materiaalivahvuudesta riippuen (Matilainen ym. 2010, 243-244). Jos tähän ei päästä, voidaan käyttää apuna lisäainelankaa tai säteen pyöritystä/vaaputusta, mutta nämä hidastavat hitsausnopeutta. Tuotekohtaisilla jigeillä päästään hyvään paikoitustarkkuuteen ja pieniin ilmarakoihin (ks. kuvio 32).



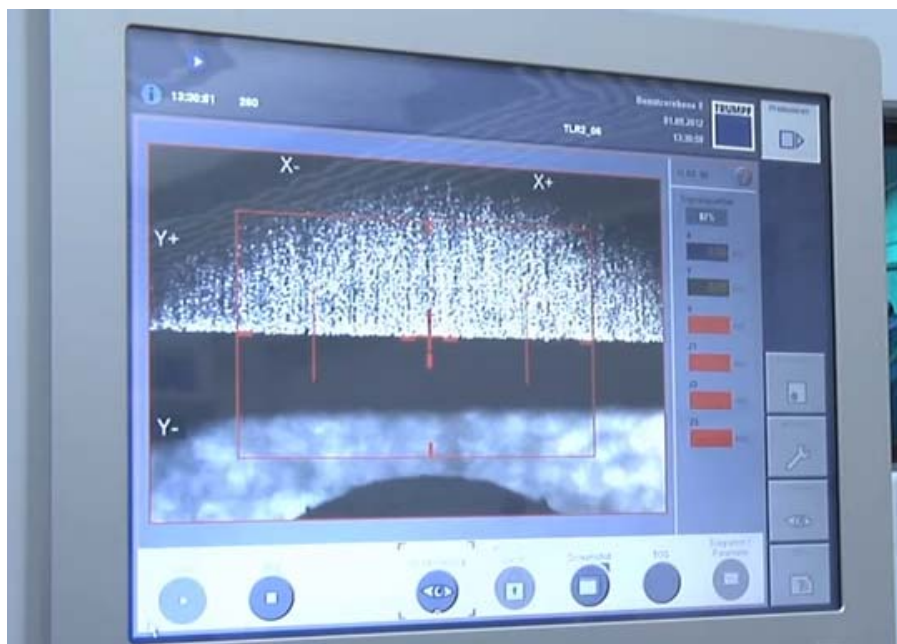
Kuvio 32. Tuotekohtainen jige (TRUMPF laser systems: TruLaser Robot 5020)

Lasertyöstöprosessiin vaikuttavat absorptioon lisäksi merkittävästi intensiteetti, kohdistuskulma ja polarisaatio, joten lasertyöstö tarvitsee suunnittelu- ja ohjelmointivaiheessa asiantuntevan operaattorin (Kujanpää ym. 2005, 48-49).

7.2 Railon seuranta 3D-laserhitsauksessa

Laserhitsaus vaatii kapean säteen takia tarkkaa tietoa railon todellisesta paikasta. Hitsauksen voidaan olettaa epäonnistuvan, jos railo on yli 0.25 mm sen suunnitellusta paikasta. Railon sijainti ja muoto voivat vaihdella etenkin 3D-hitsauksessa leikkauksen, osanvalmistuksen, kokoonpanon ja paikoituksen toleransseista johtuen helposti tätä enemmän. Railon seurantaan on kehitetty muutamia erilaisia tekniikoita, joista optiset ovat yleisimpiä. (Kujanpää ym. 2005, 116.)

Jos voidaan olettaa, että railot on valmistettu hyvällä tarkkuudella ja kappale on kiinnitetty asianmukaisesti, kokoonpanon toleransseja voidaan kompensoida opettamalla robotille referenssipisteitä. Niiden avulla robotti tietää, missä kappaleen reunat tarkalleen sijaitsevat suunniteltuun nähden ja voi tämän perusteella hienosäätää työstörajojen alku- ja loppupisteitä. Referenssipisteitä voidaan mitata muun muassa lasermittauksella, etsimällä reuna optisesti (ks. kuvio 33) tai tunnistamalla eroavaisuudet vertailukuvien avulla (ks. kuvio 34).

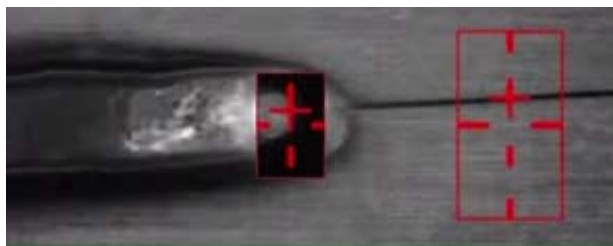


Kuvio 33. Kappaleen mittojen ja paikoituksen varmistamista reunantunnistuksella (TRUMPF laser systems: TruLaser Robot 5020)



Kuvio 34. Referenssipisteen etsimistä kuvantunnistuksen avulla (FLW 4000 M3 Fiber Laser Welder)

Jos oletetaan, että hitsin valittu leveys riittää ilmaan peittämiseen kaikissa kohdissa, mutta raito ei välttämättä ole täysin suora lasersäteen kokoluokassa referenssipisteiden välissä, voidaan käyttää reaaliaikaista raiton sijainnin seuranta (ks. kuvio 35). Tällöin kuitenkin ilmaan muuttuessa kuvun korkeus muuttuu lisäainelankaa käytettäessä (Kujanpää ym. 2005, 116). Lisäainelankaa tai kosketusanturia käytettäessä voidaan raitoa seurata mekaanisesti optisen sijaan. Täysin ilmaan liitos voi aiheuttaa ongelmia tunnistuksessa.



Kuvio 35. Reaaliaikaista raiton seuranta (TRUMPF laser systems: TruLaser Cell Series 1000)

Kohti älykästä ohjausta

Kun raiton leveys tai muoto vaihtelee, tarvitaan prosessin adaptiivista säätöä ja usein lisäainelankaa. Laserhitsauksen adaptiivinen säätö edellyttää hitsauksen aikaista säteen laadun ja hitsausprosessin valvontaa sekä raiton paikan ja koon tunnistukseen perustuvaa prosessiparametrien säätöä (Kujanpää ym. 2005, 24).

Laserhitsauksen nopeuden takia laaduntarkkailu on pitänyt automatisoida. Yhdistämällä railonseuranta, railon koon tunnistus, lämpötilan mittausta, tunkeuman mittausta ja laadunvarmistus ultraäänellä tai akustisen emission perusteella, saadaan nykytietokoneilla mitattua, säädettyä ja dokumentoitua prosessia reaaliaikaisesti. Valvontalaitteistolle opetetaan hyvän hitsin tunnusmerkit ja raja-arvot, joiden sisällä pitää pysyä. Laitteisto voi säätää prosessia ennakkoon railotietojen perusteella, varmistaa syntyneen laadun mittaamalla, dokumentoida suoritusarvot tietokantaan ja reagoida välittömästi jos tulos ei vastannut odotettua. Mittaustekniikka nostaa laitteiston hintaa ja vaatii syvällisempää osaamista, joten on mietittävä, millä keinoin riittävä laatu saadaan aikaan edullisimmin. Joissain tapauksissa jo itsepaikoittavilla liitoksilla ja yksinkertaisella jigillä voidaan päästä riittävään tarkkuuteen. (Kujanpää ym. 2005, 322-325.)

7.3 Itsesäätävä hitsausjärjestelmä kaarihitsaukseen

Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa kehitetään uudenlaista hitsausautomaatiota. Kaasukaarihitsausprosessissa hitsin laatuun vaikuttaa monia tekijöitä, jotka perinteisesti on asetettu kiinteiksi ja tutkittu hitsin onnistuminen hitsauksen jälkeen. LTY:n kehittämässä järjestelmässä on anturit railokulman lisäksi termoprofiilille eli hitsisulan lämpöarvoille ja hitsin muodolle. Seurantadata siirretään neuroverkkoon, joka reagoi usean tekijän samanaikaiseen muuttumiseen ja tekee ennakoivia ratkaisuja. Muuttujille on annettu säätöikkunat, joissa niiden pitää pysyä. Kun jokin arvo lähestyy säädettyä rajaa, prosessia säädetään niin, että se palaa keskeemmälle säätöikkunaan, jolloin virhettä ei pääse syntymään. Uudelle järjestelmälle on käyttöä erityisesti lujien terästen hitsaamisessa, sillä niiden parametri-ikkunat ovat huomattavasti rakenneteräksiä kapeammat. Menetelmällä voidaan saavuttaa huomattavat kustannussäästöt, kun hitsauksen jälkeiseen tarkastukseen ja korjaamiseen ei tarvita enää resursseja. (Tulevaisuuden hitsausjärjestelmä on itsestään oppiva.)

7.4 CMT-hitsaus

Cold Metal Transfer (CMT) -hitsaus on pulssitettu kaasukaarihitsausmenetelmä, joka on tavallaan hitsauksen ja juottamisen yhdistelmä. Nimensä mukaisesti CMT toimii lämpötilan suhteen välillä suhteellisen kylmällä juottoalueella ja välillä kuumalla hitsausalueella. Prosessi sisältää kolme toistuvaa vaihetta: pinnan sulatus valokaarella, langan tuonti sulaan ja langan veto takaisin (ks. kuvio 36). Pulssisykliä toistetaan muutamista 130 kertaan sekunnissa. (Cold Metal Transfer.)



Kuvio 36. CMT-hitsausprosessin vaiheet (mt.)

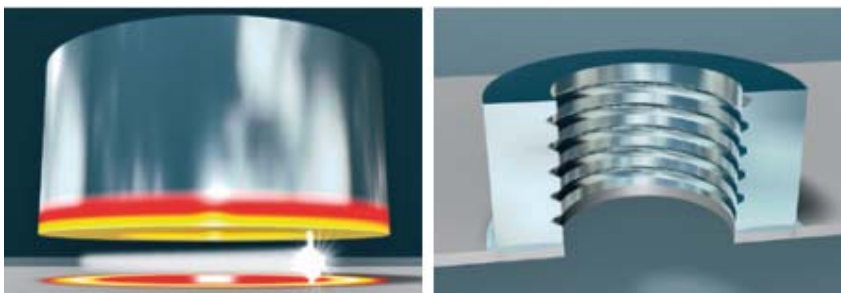
Menetelmän etuja ovat pieni lämmöntuonti, roiskumattomuus, vakaa kaari etäisyydestä riippumatta, nopeus ja hitsinlaatu. Merkittävimpänä etuna on kyky liittää yhteen erilaisia metalleja, kuten terästä ja alumiinia. Prosessissa teräs juotetaan ja alumiini hitsautuu liitospintaan. Näin saadaan valmistettua autoteollisuudelle räätälöityjä aihioita ja törmäysturvallisia rakenteita, joissa eri tavalla käyttäytyvät metallit sitovat energiaa hallitulla tavalla (ks. kuvio 37). (Mt.)



Kuvio 37. Törmäysenergiaa sitova rakenne (mt.)

7.5 MIAB-hitsaus

Magnetically Impelled Arc Butt (MIAB) Welding on leimuhitsausta muistuttava menetelmä, mutta siinä valokaari muodostetaan hallitusti ja sitä pyöritetään magneettikentän avulla, jolloin muodostuu tasainen ja halutun levyinen ympyränmuotoinen lämmöntuontialue. Pyörivä valokaari lämmittää pinnan sulamispisteeseen, jonka jälkeen osa painetaan kiinni kohteeseen (ks. kuvio 38). Prosessissa voidaan käyttää suojakaasua. Menetelmä sopii esimerkiksi putkien päittäisliitoksiin ja mutterien hitsaukseen ohutlevyihin. (Magnetarc Welding).



Kuvio 38. Mutterin liittäminen ohutlevyn pintaan (MARC)

KUKA Welding Systems kaupallisti menetelmän Magnetarc-nimellä (Phillips 2008, 1). KUKA Systems käyttää nykyään menetelmää laitteissa, jotka liittävät autojen vetoakselien osat yhteen muutamassa sekunnissa. Tämä osoittaa hyvin, kuinka vahva liitoksesta tulee.

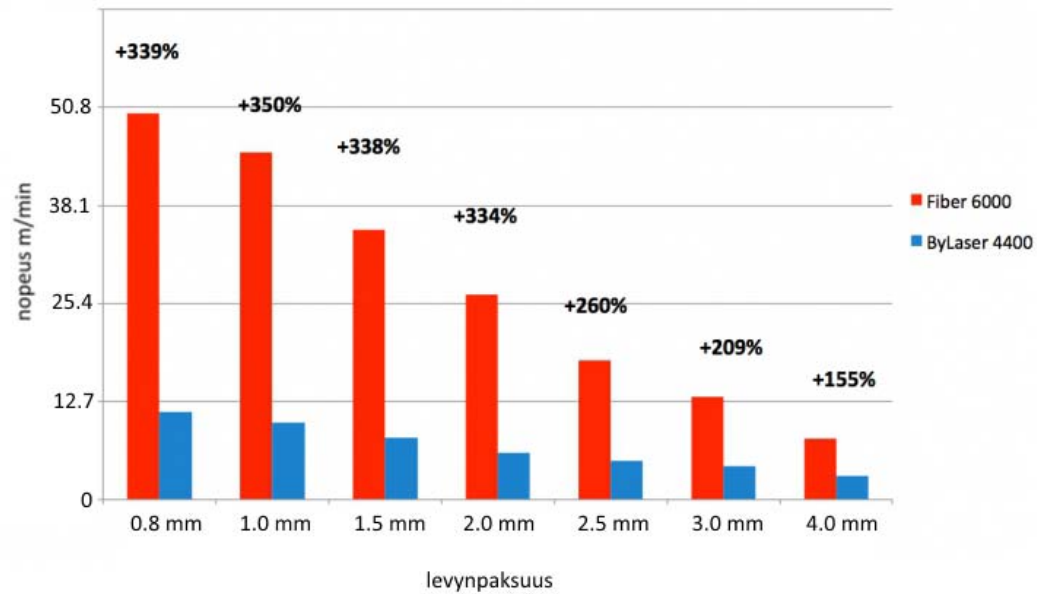
HBS valmistaa mutterien ja ruuvitankojen kiinnityslaitteita. He kehittivät menetelmää Magnetic Rotating Arc Welding (MARC) -nimellä korvaamaan kiinnityspisteiden valmistamiseen aiemmin käytettyjä vastus- ja kaasukaarihitsausmenetelmiä. Vanhemmissa mutteri- ja tapitushitsauksen lyhytpulssi- ja kondensaattorimenetelmissä valokaari ei ollut samalla tavoin hallittu ja tapin kaarihitsausmenetelmässä piti yleensä käyttää rikottavaa keraamista rengasta suojaamaan hitsisulaa ja valokaarta (Ohutlevyjen liittäminen, 94-95).

Mutteri voidaan liittää ohutlevyyn tehdyn reiän ympärille käsikäyttöisellä pistoolilla tai pöytämallisella liitosasemalla. Välineitä valmistetaan M4-M18-kokoisille muttereille. MARC-menetelmän eduiksi luetaan hitsautuminen koko pinnan alalta, ilmatiivis liitos, yksipuolinen pääsy, pienet investointikustannukset, nopeus, laatu, siisteys ja pieni energiantuonti. (HBS Rotating Arc Stud Welding.)

8 Vertailut

Leikkausnopeudet

Kuviossa 39 on vertailtu tyyppillisen 4.4 kW hiilidioksidilaserin ja uuden tehokkaan 6.0 kW kuitulaserin leikkausnopeuksia. Kuvioista nähdään, että nykyteknologialla on päästy huomattavan suuriin leikkausnopeuksiin. Vertailtujen laserien tehoerosta huolimatta uudet koneet ovat selvästi kehittyneet nopeudessa. Kuitulaserin käyttöönotolla on tässä varmasti oma osuutensa, mutta leikkauslaitteistoihin on haettu nopeutta myös rakenteita keventämällä, esimerkiksi hiilikuituosia käyttämällä. Nopeimmat laserleikkauslaitteistot pystyvät tekemään yli tuhat reikää minuutissa ja siirtämään työstöpäätä 6 g:n kiihtyvyydellä (Sincrono).



Kuvio 39. Leikkausnopeusvertailu (Speed Comparison Example)

Toisaalta kuvioista nähdään miksi levytyökeskukset ovat edelleen suosittuja; paksumilla levyillä laserin nopeus laskee, kun levytyökeskuksella lävistysnopeus pysyy lähes samana ja on tyypillisesti noin 500 iskua minuutissa. Lisäksi laitteistot ovat olleet paljon halvempia. Huomattavaa on kuitenkin lasertekniikan kehitys, jossa paksummatkin ohutlevyt leikataan nykyään nopeammin kuin ohuet aiemmin. Tarkkoihin kannattavuuslaskelmiin tarvitaan tiedot mm. valmistettavista tuotteista, niiden yksityiskohdista ja määristä, mutta jo näillä tiedoilla voidaan sanoa, että vertailu yrityksen nykyisen laitteiston ja uusimpien teknologioiden kanssa kannattaa tehdä, vaikka tämän hetkisissä koneissa olisi vielä käyttöikää jäljellä.

Leikkaus- ja muovausmenetelmät

Taulukossa 1 on vertailtu eri menetelmiä. Koneiden uusien ominaisuuksien myötä leikkauksen ja muovauksen raja on hämärtynyt, joten molempien luokkien koneet on otettu samaan taulukkoon. Laitteistoille on annettu numeroarvot kustannusten, nopeuden, tuotevalikoiman ja soveltuvan eräkoon perusteella. Menetelmien hyvät puolet on merkitty vihreällä ja huonot punaisella. Lasereista on taulukkoon valittu tehokas versio, jotta menetelmien erot korostuvat.

Taulukko 1. Menetelmävertailua

	käsin särmäys	robotti- särmäys	taivutus- automaatti	teho- laser	laser + levytyök.	laser + taivutus	levytyök. + taivutus	tavallinen levytyök.	Flexform	puristin + elastiset	puristin + muotti + robotti
hankintahinta	1	2	2	3	2	3	2	1	2	1	3
työkalukust.	1	2	-	1	2	1	2	2	1	1	3
työvoimakust.	3	1	1	1	1	1	1	1	2	3	1
nopeus	1	2	3	3	3	2	2	2	1	2	3
tuotevalikoima	3	2	2	2	2	3	3	2	3	2	3
eräkoko	1	3	1-3	1-3	1-3	2-3	1-3	1-3	1	1	3

1 = alhainen, 2 = keskitasoa, 3 = korkea

Taulukosta kannattaa ensiksi rajata menetelmiä valmistettavien tuotteiden eräkoon mukaan ja sen jälkeen katsoa mitkä ovat yritykselle kriittisimpiä kustannus- tai nopeuskriteerejä. Kaikki menetelmät eivät ole vaihtoehtoisia, vaan taulukon tarkoituksena on ohjata lukija muutaman soveltuvan tekniikan ääreen tekemään tarkempaa vertailua.

Esimerkki 1: Yritys valmistaa kaarevia taivutuksia sisältäviä tuotteita vain pienissä erissä ja haluaa pitää suuren tuotevalikoiman takia työkalukustannukset pieninä. Eräkoon mukaan pois rajautuisivat robottisärmäys, taivuttava laser ja robotisoitu muottipuristin. Jäljelle jäävät tuotteiden muodon takia vaihtoehtoiksi teholaser, levytyökeskus laserilla, tavallinen levytyökeskus, taivutusautomaatti, Flexform ja puristin elastisilla työkaluilla. Näistä leikkaukseen sopii kolme ensimmäistä ja muovaukseen kolme viimeistä, joten sopivan yhdistelmän valinta päästään tekemään kahdella pienellä vertailulla. Leikkauksen ja muovauksen yhdistelmäkoneita ei tällaiseen tuotantoon löytynyt.

Esimerkki 2: Yritys valmistaa pieniä ja keskisuuria eriä levyjä suorilla taivutuksilla, kuten kaappien ovia ja tietokoneiden runkoja. Tuotteet pitää pystyä valmistamaan nopeasti. Eräkoko ja nopeutta katsomalla pois jäävät käsin särmäys, robottisärmäys, Flexform, elastiset työkalut ja robotisoitu muottipuristin. Kaapin ovien valmistuksessa tarvitaan kolme peräkkäistä pitkää taivutusta, joten taivutuksen sisältävät yhdistelmäkoneet eivät sovellu tarkoitukseen. Jäljelle jäävät leikkaukseen laser, levytyökeskus tai niiden yhdistelmä ja taivutukseen taivutusautomaatti.

Esimerkki 3: Yritys valmistaa kattiloita. Aihoiden leikkaukseen on kiekkeleikkuri, mutta muovauskone pitäisi uusia. Yllä olevasta taulukosta ei sopivaa menetelmää löydy, mutta tästä opinnäytetyöstä voi poimia tunnettujen syvävedon ja automaattisen painomuovauksen lisäksi vertailuun hydromekaanisen syvävedon, aquadrawin ja deep draw hydroformingin.

Vertailulaskelman tekeminen

Yksikkökustannuksia vertaamalla pääsee nopeasti tuottavuuden ytimeen. Yksinkertaistetusti voidaan sanoa, että laitetaan panokset sisään ja katsotaan mitä tulee ulos. Käytännössä tuotteita ei voida myydä niin paljon kuin tuotantolaitteesta saadaan irti, joten parempi lähestymistapa voisi olla määrittää mitä halutaan ulos, kuinka paljon se vie kullakin menetelmällä panoksia ja riittääkö tuotantokyky eli valitun koneen aika niiden tekemiseen.

Kun puhutaan pelkästään tuottavuuden mittaamisesta, voidaan yksikkökustannuslaskelmista jättää pois materiaalien ja valmiiden tuotteiden hinnat, kuten myös kiinteät kustannukset. Hintojen olisi syytä olla sopivalla tasolla, että toiminta on kannattavaa ja suunniteltu myynti toteutuu, mutta tässä menetelmien välisessä vertailussa meitä kiinnostavat vain määrät.

Lähtötiedoiksi tarvitaan:

- myyntimäärät tuotteittain per vuosi
- koneen tarve tuotteittain, esimerkiksi 30 reikää ja 2 metriä suoraa leikkausta
- eri koneiden käyttämä aika näiden tarpeiden toteuttamiseen per tuote
- työntekijän kustannukset per tunti
- työntekijän tarve; riittääkö yksi kaikille yhden koneen tarpeille, vai 0.3, vai 2?
- koneen hinta, josta lasketaan esimerkiksi annuiteettimenetelmällä vuosikustannus
- koneen tarvitsema huolto, energia ja kulutusosat per vuosikäyttö

Tämän laskentatavan etuna on, että myyntimäärät joutuu listaamaan. Jos lähtee tekemään investointilaskelmaa olettamuksella, että koneelle riittää työtä vaikkapa ko-

ko ajan yhdessä vuorossa, saadaan kolme ongelmaa aikaiseksi. Ensinnäkin tuotteiden määrät vaihtelevat koneiden nopeudesta riippuen, jolloin voidaan saada tuotettua halvalla yksikkökustannuksella sellainen määrä, jota ei saada myytyä. Toiseksi, luemat eivät ole vertailukelpoisia keskenään. Kolmantena ongelmana on käyttötarpeen arviointi pieleen, jos lähdetään arvaamaan, kuinka moneksi sadaksi tunniksi koneelle saattaisi löytyä työtä vuosittain.

Kun lähdetään myyntimääristä liikkeelle, ne tulevat selvitettyä ja täyttämällä ne laskentataulukkoon muiden edellä mainittujen tietojen kanssa, ovat ne helposti säädettävissä jos uusia sopimuksia saadaan näköpiiriin. Taulukossa 2 on esitetty malliksi laskentapohja, jossa konevaihtoehtojen vuosikustannukset on laskettu edellä mainittujen ehtojen mukaan, siis ilman mm. materiaalikustannuksia, katteita, myyntihintoja, alennuksia ja vaikkapa sihteerin palkkoja, jolloin laskenta pysyy helppona ja keskittyy tuotosten ja panosten laskemiseen. Esimerkkilaskelmasta voi helposti lukea, että kalliimpi kone saa halutut tuotokset aikaiseksi edullisemmin ja lisäksi sen kapasiteetista on käytetty vasta vähän, joten lisämyyntiä tavoittelemalla tuottavuusero vain kasvaa konevaihtoehtojen välillä. Kakkosvaihtoehdolla yksikköhinnat ovat huomattavasti alhaisemmat, joten suurempaa markkinaosuutta voidaan havitella hinnanalennuksilla. Asetusaikoja ei tässä taulukossa ole otettu huomioon, koska ne voidaan olettaa olevan pieniä tuotantoaikaan verrattuna ja samaa kokoluokkaa eri koneilla.

Taulukko 2. Esimerkki laskentapohjasta

	tuotokset			panokset			
	menekki, kpl	reikiä, kpl	leikkausta, m	Kone 1, min	Kone 1, eur	Kone 2, min	Kone 2, eur
Tuote 1	20000	50	3	22500	10786,82	11000	3010,77
Tuote 2	5000	20	2	3583	1717,90	1500	410,56
Tuote 3	10000	15	10	33708	16160,25	10750	2942,34
				aika yht. h	kust. yht. e	aika yht. h	kust. yht. e
				997	38665	388	31364
			käyttöaste***	11,4 %		4,4 %	
konetiedot							
	reikiä kpl/min	leikkausta m/min	huoltotarve* h/vuosi	energia* kWh/vuosi	kulutusosat* e/vuosi	työvoima** hlö/kone	pääoma e/vuosi
Kone 1	400	3	50	7000	3000	0,7	10000
Kone 2	200	10	20	15000	1000	0,4	25000
yksikköhinta			60	0,1		40	
yksikkö			euroa/h	euroa/kWh		euroa/h	
*) jatkuvalla käytöllä				tunteja vuodessa		8760	
**) suhteessa koneaikaan							
***) 1 vuoro = 20,5 % (1800 h)							

9 Uusien valmistusmenetelmien hyödyntäminen

Tuotesuunnittelu

Uuden tuotantoteknologian mahdollisuudet pitää hyödyntää jo suunnittelussa. Lasertekniikat ja joustavat muovausmenetelmät tuovat vapautta osien muotoiluun, jolla voidaan erottua kilpailevista tuotteista. Erilaisten pintakuviointien, pinnoitusten ja muotojen avulla ohutlevyistä voidaan valmistaa tuotteisiin ulkonäöllistä lisäarvoa.

Suunnittelussa voidaan vähentää työvaiheita, jos otetaan huomioon uuden konekannan mahdollisuudet, vaatimukset ja miten eri menetelmät toimivat yhteen, esimerkiksi leikkauksessa tuotetun ja liittämisen vaaditun tarkkuustason suhteen. Hyvällä suunnittelulla voidaan nopeuttaa kokoonpanoa kehittämällä kiinnitystapoja ja vähentämällä osien määrää. Taivuttavilla, muovaavilla ja usean työvaiheen osaavilla

koneilla voidaan yksinkertaistaa tuoterakennetta ja valmistusprosessia sekä vähentää osien liittämistarvetta.

Yritysten nykyisiin tuotteisiin voidaan löytää parannuskohteita materiaaleja ja rakenteita optimoimalla. Suurlujuusterästen, kevytmetalliseosten ja hiilikuidun hyödyntäminen vahvuutta ja keveyttä vaativissa sovelluksissa antavat uusia rakennemahdollisuuksia. Kerros- ja kennorakenteita, vahvistemuotoja ja pintakäsittelyjä voidaan käyttää paikallisten ominaisuustarpeiden mukaan.

Laatu

Laatua voidaan parantaa valitsemalla oikea menetelmä kuhunkin kohteeseen. Esimerkiksi laserhitsit ovat siistejä, mutta pistehitsaus saattaa olla varmempi liitostapa, koska levyt ovat puristettaessa varmasti yhdessä. Prosessia mittaavilla ja itsesäätyvillä järjestelmillä etenkin huomaamattomien valmistusvirheiden määrää voidaan vähentää. Automatisoinnin lisääminen vähentää inhimillistä tekijää ja laadunhajontaa, jolloin valmistettavista tuotteista saadaan mahdollisimman pitkäikäisiä tasaisen laadun ansiosta. Nämä asiat vaikuttavat pitkällä aikavälillä yrityksen maineeseen, brändiin ja laatu-kustannuksiin.

Tuotantotapa

Ohutlevyalan yritysten kannattaisi tutkia uusien ja alikäytettyjen menetelmien hyödyntämistä. Teknologian kehitys 2000-luvulla on tuonut uusia, kilpailukykyisiä tuotantomenetelmiä myös pienempien erien valmistukseen.

Lasertyöstöt menetelminä eivät salli käsikäyttöä samaan tapaan kuin esimerkiksi kaasu- tai pistehitsaus, joten tuotannon automaatioaste usein nousee laserlaitteiston hankinnan yhteydessä. Työvaiheiden järjestys voi muuttua ja niitä voi jäädä pois, etenkin jälkityöstön osalta. Kokoonpanokin sujuu helpommin tarkemmilla osilla. Laserien yleistyminen on vähentänyt levytyökeskuksissa vaadittujen työkalujen määrää. Muovauksessa yksipuolisia muotteja käyttävät teknologiat mahdollistavat säästöjä muottikustannuksissa syvävetoon verrattuna ja sopivat etenkin pienemmille sarjoille.

Nykyaikaiset tuotantokoneet auttavat ja ohjaavat operaattoria. Automaattinen työkalunvaihto, nopeammat asetus- ja ohjelmointiajat, työvaiheiden näyttö sekä takaisinjoustop ja muiden parametrien laskeminen operaattorin puolesta minimoivat ajan, jolloin kone on pysähdyksissä työntekijää odotellessa. Muuttuvassa erätuotannossa koneiden ohjaama prosessi vähentää virheiden määrää ja työntekijöiden miettimiseen käyttämää aikaa.

Yrityksen rooli tuotantoketjussa

Yhdistelmäkoneilla voidaan saavuttaa korkeampi käyttöaste, saada valmiimpia osia yhdessä työvaiheessa, vähentää sisäisiä siirtoja ja yksinkertaisemmilla osilla saavuttaa kokonaan automaattinen valmistus alusta loppuun. Isomman siivun ottaminen tuotantoketjusta monipuolisilla ja usean työvaiheen koneilla hyödyttää alihankkijan lisäksi päämiestä. Pienemmän toimittajamäärän tuomat alhaisemmat kuljetuskustannukset, nopeampi valmistuksen läpäisy aika ja tuotannonohjauksen helpottuminen ovat päämiehelle merkittäviä etuja. Alihankkija voi hyödyntää tätä kehittämällä omaa rooliaan kilpailutetusta yhden työvaiheen tekijästä tuotekehityskumppaniksi.

Automaatio

Automaation tuoma nopeus nostaa tuotantokapasiteettia ja tehdastilan tuottavuutta. Koneita kannattaa hyödyntää etenkin tuotannon pullonkauloissa ja pisimpien vaiheikkojen kohdalla. Esimerkiksi hankalien käsinhitsausasentojen vaihtaminen laserilla varustettuun nivelvarsirobottiin voi vaikuttaa merkittävästi tuotteen laatuun ja läpimenoaikaan. Automaation lisääminen vaatii usein tuotannonohjauksen ja työvaiheikkojen miettimistä uusiksi. Tämä kannattaa ottaa positiivisena kehitysprojektina, jonka palkintona on leanin tuotannon ja nopeamman toimitusajan tuoma kilpailuetu, pienempien yksikkökustannusten lisäksi.

Ketterät ja tarkat valmistusmenetelmät voivat olla kilpailukykyisiä halpatuotantomaiden massatuotannon kanssa, kun katsotaan kokonaisuutta toimitusajan, virhekustannusten ja toiminnan sujuvuuden kannalta. Länsimaiden korkeat työvoimakustannukset eivät ole ongelma kansainväliselle kilpailukyvyille, kun käsityön määrä nykyaikaisessa tuotannossa on minimaalista. Automaation avulla yksi operaattori voi

hoitaa useita työasemia. Koneitten käyttöaste ja tehokkuus määräävät yksikkökustannukset tuotantomäärien ohella. Suurten koneinvestointien kohdalla pitäisi päästä vähintään kaksivuorotyöhön. Ympäri vuorokauden toimivilla laitteilla pääomakustannukset ovat pienimmät ja hyödyntämällä automaatiota miehittämättömään ajoon, voidaan yövuoron palkkakustannukset minimoida.

Läpimenoaika

Laserleikkaus on erittäin nopeaa ja mahdollistaa hyvän tuottavuuden ja osien saataavuuden. Levytyökeskuksiin on tullut jopa keveitä hiilikuiturakenteita parantamaan paikoituksen nopeutta ja siten tuottavuutta. Peräkkäisten työvaiheiden koneet ja varastointirobotit on usein suunniteltu toimimaan yhdessä, joka helpottaa automaation käyttöönottoa. Yhdistelmäkoneiden avulla voidaan vähentää välivarastointiin kuluva työ- ja läpäisy-aikaa. Nopeampi tuotannon läpäisy-aika mahdollistaa alhaisemmat puolivalmisteveraston hälytysrajat ja vapauttaa siten varastoon sitoutunutta pääomaa. Nopeasta reagointikyvystä kiireellisten tilausten tullessa voi olla merkittävää kilpailuetua.

10 Pohdinta

Tavoite

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia ohutlevytuotteiden tuotantoon lähivuosina kehitettyjä menetelmiä, laitteistoja ja teknologioita. Ideana oli selvittää, mitä uusia teknisiä ratkaisuja on tarjolla alan yritykselle, joka haluaa kehittää tuotantoaan ja parantaa yrityksen kannattavuutta ja kilpailukykyä.

Tutkimusmenetelmät

Tutkimuksen aloittaminen suureen messumateriaaliin tutustumalla oli työlästä. Se oli kuitenkin tarpeen tämänhetkisten teknologioiden löytämiseksi, koska henkilökohtainen kokemukseni ohutlevyalalta oli vähäistä. Alasta enemmän tietävä olisi voinut aloittaa työn suoraan lukemalla alan uutisia viime vuosilta ja käyttää siten enemmän aikaa aihealueiden kattavuuden varmistamiseen. Koin prosessin kuitenkin hyödyll-

liseksi ammattiosaamisen kannalta, sillä käymällä läpi suuren määrän kirjallisuutta, messumateriaaleja ja tekniikan nettisivustoja sain itselleni asianmukaisen kokonaiskuvan vaihtoehtoisista tuotantomenetelmistä, niiden yksityiskohtaisesta toiminnasta ja käsityksen, missä alan kehitys on menossa.

Tiedon uutuusarvo

Osa ohutlevymenetelmistä osoittautui työn edetessä oletettua vanhemmiksi ja ne jätettiin pois lopullisesta versiosta. Työssä inspiroivinta oli tutkia ja esitellä teknologioita, jotka olivat suomenkielisessä lähdekirjallisuudessa vasta tulossa tai puuttuivat sieltä kokonaan. Joistain löydettyistä menetelmistä ei tuntunut löytyvän netistä mitään aikaisemmin kirjoitettua suomenkielistä tietoa.

Tulokset

Tulokset vastasivat mielestäni hyvin odotettuja. Itsestään selvän automaation käytön laajentamisen lisäksi tuotannon kehittämiseen löytyi useita harkitsemisen arvoisia menetelmiä ohutlevy tuotteiden valmistukseen. Harvinaisempien menetelmien ja tekniikan nykytilanteen osalta opinnäytetyö päivittää lähteenä olleen kirjallisuuden tietoja ja työstä voi olla hyötyä alan opiskelijoille projektitöissä kirjojen uusien versioiden odotellessa. Jo 2000-luvun taitteen tilannetta kartoitettaessa kävi ilmi, ettei kaikkia maailmalla käytettyjä menetelmiä ole Suomessa täysin hyödynnetty. Nykyaikaista teknologiaa käyttämällä voidaan kilpailla kansainvälisillä markkinoilla, mutta tekniikan tarjoamista keinoista, vaihtoehdoista ja ominaisuuksista pitää olla ajantasaista tietoa, jotta huomaa missä kohdin yrityksen tuotantotapa on mahdollisesti jäänyt ajastaan jälkeen ja mitä investoinneilla voisi saavuttaa. Tämä opinnäytetyö toivottavasti tuo uusia ajatuksia ja näkökulmia itseni lisäksi jollekin alan ihmiselle, joka voi niitä työssään hyödyntää.

Onnistuminen

Työssä on esitelty monia näkökulmia ja innovaatioita laajalta alalta, mutta katsauksen kattavuus jäi varmistamatta. Jotkin teknologiat olisivat varmaan sopineet aiheeseen, mutta eivät tulleet vastaan messuryritysten kohdalla tai tiedonhaussa. Kokonaisuutena opinnäytetyö onnistui mielestäni kohtalaisesti, ottaen huomioon lähtötason

tiedot aiheista ja kuinka paljon niistä ymmärsi projektin lopussa. Suurin hyöty opin-
näytetyöstä oli oman ammattiosaamisen kasvu, jota voi hyödyntää myöhemmin ural-
la.

Teollisuus työpaikkana

Yritysten markkinointimateriaaleista kävi selväksi teollisuuden muutos vihreämpään
suuntaan yhteiskunnan mukana. Koneiden ympäristöystävällisyyttä mainostetaan
energiansäästöllä, puhtaudella ja kompaktilla rakenteella, etenkin servokäyttöisissä
särmäyspuristimissa, joissa sähkönkulutusta on saatu vähennettyä merkittävästi.
Alalla pyritään pois likaisen metallipajan mielikuvasta tyylikkällä ja puhtaan näköisil-
lä, kompakteilla ja ”tarpeettomasti” muotoilluilla koneilla. Teollisuuden työpaikkojen
imagonmuutos on nähtävissä tehtaissa, kun työtehtävät muuttuvat haalarityöstä
koneenkäyttäjiksi ja edelleen tuotanto-operaattoreiksi.

Hyödyntämismahdollisuudet

Monet sovelluskohteista löytyivät autoteollisuudesta. Suomessa teollisuus on ollut
perinteisesti raskaampaa tai muihin aloihin painottunutta, joka ehkä selittää, miksi
ohutlevytekniologiaista niin monet tuntuivat uusilta ja innovatiivisilta, vaikka niitä oli
käytetty maailmalla jo pitkään. Toisaalta tämä kuvaa hyvin opinnäytetyön antia suo-
malaiselle ohutlevytuoteteollisuudelle: Luettavan kokoinen kokoelma uusia ja kohta-
laisen uusia käyttökelpoisia menetelmiä sekä tietoa nykyaikaisten tuotantokoneiden
ominaisuuksista, joita käytetään maailmalla, ja joita pitäisi hyödyntää Suomessakin.
Etenkin suurpainemuovauksen menetelmät ovat lähes täysin hyödyntämättä.

Tehokkaimpaan yhden tuotteen sarjatuotantoon voidaan aina suunnitella omat ko-
neensa, mutta olettaisin, että Suomen ohutlevytuoteteollisuudelle merkityksellisem-
piä ovat tämän opinnäytetyön esittelemät monipuoliset työstökeskukset ja mene-
telmät, joilla voidaan valmistaa kustannustehokkaasti useita eri tuotteita suhteellisen
pienissä erissä.

Lähteet

Aaltola, J. & Valli, R. 2010. Ikkunoita tutkimusmetodeihin II. 3. uud. ja täyd. p. Jyväskylä: PS-Kustannus.

AE NT Series. N.d. Viitattu 13.4.2015.

<http://www.amada.de/en/punching/ae/punchingmachine.html>

Alcoa Unveils Next-Generation Aluminum Materials Through Breakthrough Manufacturing Technology. 4.12.2014. Lehdistöiedote. Viitattu 17.4.2015.

http://www.alcoa.com/global/en/news/news_detail.asp?pageID=20141204000246en&newsYear=2014

Avure Deep Draw Hydroforming Principle. 1.4.2014. Esittelyvideo. Viitattu 25.4.2015.

<https://www.youtube.com/watch?v=bgXOvMsALAE>

Avure Fluid Cell Press. 16.9.2013. Esittelyvideo. Viitattu 25.4.2015.

https://www.youtube.com/watch?v=Y_OmFcNxMX4

Avure Technologies Sheet Metal Lab Forming Video 1. 12.6.2013. Opetusvideo. Viitattu 25.4.2015. https://www.youtube.com/watch?v=jVmGwu_zSi8

B3 ATA: kit production with press-brake. 27.10.2014. Esittelyvideo. Viitattu 26.4.2015. https://www.youtube.com/watch?v=pn_3Uwqd8e8

Baldwin, L. 2001. Turning the corner on making doors: North Carolina company streamlines the process. Artikkel. Viitattu 10.5.2015.

<http://www.thefabricator.com/article/bending/turning-the-corner-on-making-doors-north-carolina-company-streamlines-the-process>

Cadman-B 3D. N.d. Viitattu 21.4.2015.

http://www.lvdgroup.com/en/metalworking_cadman-b-3d_42.aspx

CellTech Metals. N.d. Yritysesittelyvideo. Viitattu 16.4.2015.

<http://www.celltechmetals.com/movie.php>

Cold Metal Transfer. 2014. Esite. Viitattu 3.5.2015.

http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-27130869-6B2464D7/fronius_international/M_06_0001_EN_CMT_leaflet_Feb_2014_aw19_low_44211_snapshot.pdf

Cutting Tool Automation for Prima Power Express Bender. 18.9.2014. Esittelyvideo.

Viitattu 16.4.2015. <https://www.youtube.com/watch?v=YfLeXoNxOwQ>

Design profiles of cold formed corners. N.d. Kuva. Viitattu 1.5.2015.

<http://www.acf.at/en/corner-finishing-applications/>

Diode Laser Product Features & Applications. N.d. Viitattu 18.4.2015.
<http://www.jenoptik.com/en-diode-lasers-features-applications>

E-BendCell: The productive all-purpose bending cell. N.d. Viitattu 14.4.2015.
<http://www.baykal.com.tr/en/products/press-brakes/e-bendcell/explore>

Edgemaster Corner Forming. 3.6.2014. Video. Viitattu 1.5.2015.
<https://www.youtube.com/watch?v=NZnUL9I29qY>

EML Z NT Series. N.d. Viitattu 13.4.2015. <http://www.amada.de/en/punch-laser/eml/sheet-metal-processing-center.html>

Express Bender video. 11.7.2011. Esittelyvideo. Viitattu 16.4.2015.
<https://www.youtube.com/watch?v=FUGG6O9qCg4>

Fiber Lasers. N.d. Viitattu 18.4.2015.
<http://www.photonics.com/EDU/Handbook.aspx?AID=25158>

Fluid Cell Presses - Rectangular forming trays. N.d. Viitattu 25.4.2015.
<http://industry.avure.com/products/fluid-cell-presses-rectangular-forming-trays>

FLW 4000 M3 Fiber Laser Welder. 4.9.2014. Esittelyvideo. Viitattu 1.5.2015.
<https://www.youtube.com/watch?v=RH-7jjScxkk>

Frequency Doubling. N.d. Viitattu 21.4.2015.
http://www.rp-photonics.com/frequency_doubling.html

HBS Rotating Arc Stud Welding. 13.8.2014. Video. Viitattu 27.4.2015.
<https://www.youtube.com/watch?v=IFrz3zJie1Y>

HD ATC Press brake with automatic tool changer. N.d. Viitattu 13.4.2015.
<http://www.amada.de/en/bending/hd-atc/press-brake-with-automatic-tool-changer.html>

Heiska, K. 12.4.2006. VTT:lle Euroopan monipuolisin suurpainemuovauslaite. Viitattu 19.4.2015. <http://www.tiedetoimittaja.com/sivut/suurpainemuovaus.html>

Hergt, O. 17.3.2015. Laser Cutting Breaks New Ground. Viitattu 27.4.2015.
<http://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-30/issue-2/features/laser-cutting-breaks-new-ground.html>

HFE II press brake. N.d. Viitattu 13.4.2015. <http://www.amada.de/en/bending/hfe-m2/pressbrake.html>

Järvinen, P. & Järvinen, A. 2000. Tutkimustyön metodeista. Tampere: Opinpajan Kirja.

Kaminski, D. 18.4.2011. LASER MARKING: How to choose the best laser for your marking application. Kaavio aallonpituuksien absorptiosta. Viitattu 18.4.2015. <http://www.laserfocusworld.com/articles/2011/04/laser-marking-how-to-choose-the-best-laser-for-your-marking-application.html>

Kujanpää, V., Salminen A. & Vihinen, J. 2005. Lasertyöstö. Helsinki: Teknologiainfo Teknova.

Laser brazing. N.d. Viitattu 13.4.2015. http://www.awl.nl/en/technologies/laser_welding/brazing

Laser cutting. N.d. Viitattu 16.4.2015. http://www.erreduegas.com/gas_generators/applications/

LeTang, P. 3.4.2012. Justifying a robotic press brake. Artikkel. Viitattu 11.5.2015. <http://www.thefabricator.com/article/bending/justifying-a-robotic-press-brake>

LVD Pullmax Dynamic Overview. 8.3.2012. LVD Strippit-sarjan esittelyvideo. Viitattu 23.4.2015. <https://www.youtube.com/watch?v=vdqqm0Hi7nc>

Magnetarc Welding. N.d. Viitattu 3.5.2015. <http://www.kuka-systems.com/en/technologies/magnetarc/>

MARC. N.d. Esite. Viitattu 27.4.2015. http://www.hbs-info.com/uploads/tx_hbsproducts/HBS_MARC-Prospekt_eng-web.pdf

Matheson, R. 23.7.2014. The first direct-diode laser bright enough to cut and weld metal. Viitattu 19.4.2015. <http://phys.org/news/2014-07-direct-diode-laser-bright-weld-metal.html>

Matilainen, J., Parviainen, M., Havas, T., Hiitelä, E. & Hultin, S. 2010. Ohutlevytuotteiden suunnittelijan käsikirja. Helsinki: Teknologiainfo Teknova.

McCue, T. 18.7.2014. Kuva. Viitattu 2.5.2015. <http://www.forbes.com/sites/tjmccue/2014/07/18/ford-motor-corp-invents-new-way-to-shape-metal/>

Mäki-Mantila, J. 2001. Ohutlevyjen taivutus ja muovaus. Helsinki: Metalliteollisuuden Kustannus.

New level of bending press technology. N.d. Viitattu 13.4.2015. <http://www.amada.de/en/bending/hd/bendingpress.html>

Ohutlevyjen liittäminen. 1999. MET-julkaisu. Helsinki: Metalliteollisuuden Kustannus.

Palokangas, J. 2015. Analyysi Suomen talouden suuresta ongelmasta. Viitattu 12.5.2015.

http://teknologiateollisuus.fi/sites/default/files/file_attachments/analyysi_suomesta_maaliskuu_2015.pdf

Pelimanni, V-M. 15.5.2014. Putkien ja ohutlevyjen muovaus hydromuovauskoneella. Opinnäytetyö. Lapin ammattikorkeakoulu.

Phillips, D. 2008. Magnetically impelled arc butt (MIAB) welding of chromium plated steel tubular components utilizing arc voltage monitoring techniques. Tutkielma osana tohtorintutkintoa. Viitattu 27.4.2014.

https://etd.ohiolink.edu/!etd.send_file?accession=osu1204567657&disposition=inlin e

Phoenix 3D Metaal. N.d. Yrityksen nettisivusto. Viitattu 3.5.2015.

<http://www.phoenix3dmetaal.com/index.php?page=omvormtechnologie>

RAS MultibendCenter. 5.5.2014. Esittelyvideo. Viitattu 14.4.2015.

<https://www.youtube.com/watch?v=rCLEwUxq9Gw>

RAS UpDownCenter. 8.10.2014. Esittelyvideo. Viitattu 14.4.2015.

<https://www.youtube.com/watch?v=kKSDUFFnAel>

Riches, S. 22.10.1998. Industrial lasers and applications in automotive welding. Viitattu 14.4.2015. <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/industrial-lasers-and-applications-in-automotive-welding/>

Riedelsberger, H. 30.10.2006. Laser brazing in the automotive industry. Esitelmä-materiaali. Viitattu 13.4.2015.

<https://app.aws.org/conferences/abstracts/2006/018.pdf>

Second-harmonic Generation. 1.1.2011. Viitattu 21.4.2015.

<http://www.laserfocusworld.com/articles/2011/01/second-harmonic-generation-multicrystal-scheme-yields-56-efficient-shg-to-green.html>

Sheet Metal Forming - Hydroforming. N.d. Viitattu 24.4.2015.

<http://www.engineershandbook.com/MfgMethods/hydroforming.htm>

Speed Comparison Example. N.d. Lasereiden nopeusvertailukuva. Viitattu 11.5.2015.

http://bystronic.com/us-en/news/events_exhibitions/local_events/141015_6kW-Fiber-Premier-Event.php

SPIF-A Project. N.d. Kuva. Viitattu 1.5.2015. <http://spifaproject.wix.com/spifa>

Synrono. N.d. Esittelysivusto. Viitattu 11.5.2015.

<http://www.primapower.com/uk/products/thelaser/synrono-en/>

SyncView. N.d. Viitattu 14.4.2015. <http://www.haco.com/en/our-services/syncview>

TeraDiode Announces Purchase and Supply Agreement with Panasonic Welding Systems. 18.12.2014. <http://teradiode.com/2014/12/18/teradiode-announces-purchase-and-supply-agreement-with-panasonic-welding-systems-co-ltd/>

The Corvette Story. N.d. Viitattu 24.4.2015. Kuva. <http://web-cars.com/corvette/2006-Corvette-2.php>

The Fiber Disk Laser explained. 2006. Viitattu 18.4.2015. <http://www.nature.com/nphoton/journal/vsample/nsample/full/nphoton.2006.6.html>

TRUMPF 3D Laser Cutting. 3.4.2011. Video. Viitattu 26.4.2015. <https://www.youtube.com/watch?v=umJcrGn4buM>

TRUMPF laser systems: TruLaser Cell Series 1000. 22.8.2014. Esittelyvideo. Viitattu 29.4.2015. <https://www.youtube.com/watch?v=wKL184sUySE>

TRUMPF laser systems: TruLaser Robot 5020. 14.1.2014. Esittelyvideo. Viitattu 29.4.2015. <https://www.youtube.com/watch?v=0sW86kEYdMQ>

Tulevaisuuden hitsausjärjestelmä on itsestään oppiva. 2015. Artikkel. Metallitekniikka 3/2015, 36-37.

Tuottavuus tänään. 1998. Helsinki: Kauppakaari.

Up and down folding machines models DB. N.d. Variobend-taivutuskoneen esittelysivu. Viitattu 12.4.2015. <http://www.asco-maschinen.de/index.php/en/product/2-uncategorised/40-up-and-down-folding-machines-models-db>

Vienti. 30.4.2015. Teknologiateollisuuden vientitilastoja. Viitattu 12.5.2015. http://teknologiateollisuus.fi/sites/default/files/file_attachments/vienti.pdf

Väilä, T. 2012. Laserin ja ledin käyttö optisessa tiedonsiirrossa. Opinnäytetyö. Turun ammattikorkeakoulu.

Wallace, J. 2.4.2015. Nonlinear Optical Fiber: All-fiber frequency doubler with engineered glass microlayers under development. Viitattu 21.4.2015. <http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-51/issue-04/world-news/nonlinear-optical-fiber-all-fiber-frequency-doubler-with-engineered-glass-microlayers-under-development.html>

Wright, N. 21.4.2014. Forming the Future. FF Journal April 2014. Viitattu 16.4.2015. <http://www.ffjournal.net/item/12175-forming-the-future.html>