



Teknillinen tiedekunta

Konetekniikan koulutusohjelma

BK10A0400 Kandidaatintyö ja seminaari

**OHJEITA OHUTLEVYTUOTTEIDEN VALMISTUSYSTÄVÄLLISEEN
SUUNNITTELUUN**

**INSTRUCTIONS FOR MANUFACTURING-FRIENDLY DESIGNING OF SHEET
METAL PRODUCTS**

Lappeenrannassa 20.1.2010

Anssi Laherto

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	1
1.1 Rajaus ja tavoitteet	1
1.2 DFX –perusteet.....	2
2 LEIKKAUS JA LÄVISTYS	3
2.1 Mekaaninen leikkaus	4
2.1.1 Perusteet ja prosessikuvaus	4
2.1.2 Laitteistot ja työkalut	6
2.2 Terminen leikkaus ja vesisuihkuleikkaus	8
2.2.1 Polttoleikkaus	8
2.2.2 Plasmaleikkaus.....	9
2.2.3 Laserleikkaus.....	10
2.2.4 Vesisuihkuleikkaus	13
2.3 Leikkauksen suunnittelu.....	13
2.3.1 Leikattavat muodot	13
2.3.2 Materiaalipaksuudet.....	18
2.3.3 Nurkan loveukset	19
2.3.4 Leikkauksen tarkkuus	21
2.3.5 Jätepalat	22
3 TAIVUTUS JA SÄRMÄYS	23
3.1 Perusteet ja prosessikuvaus	24
3.2 Laitteistot ja työkalut	26

3.2.1 Särmäyspuristimet	27
3.2.2 Taivutusautomaatit	28
3.3 Taivutuksen suunnittelu	29
3.3.1 Taivutussäde	29
3.3.2 Takaisinjousto.....	30
3.3.3 Oikaistupituus	31
3.3.4 K-kerroin	33
3.3.5 Taivutuksen lähellä olevat muodot.....	34
3.3.6 Taivutuksen dimensiot	35
3.3.7 Taivutuksen tarkkuus.....	36
3.3.8 Reuna- ja nurkkamuotojen suunnitteluohjeita taivutuksessa	37
4 YHTEENVETO.....	39
LÄHTEET	41
LIITTEET	

1 JOHDANTO

Tämä kandidaatinyö on tehty Lappeenrannan teknillisen yliopiston LUT Metalli – osastolle. Työn tarkoituksena on tarjota tiivistetty yleisohje levytuotteiden valmistusystävälliseen suunnitteluun, yleisimpiin valmistusmenetelmiin liittyen. Työ rakentuu siten, että ensin käsitellään erilaisten tuotantomenetelmien teoriaa, minkä jälkeen esitellään kulloinkin tärkeäksi muodostuvat suunnittelun ominaispiirteet ja valmistusystävälliset suunnitteluperiaatteet. Loppuun on koottu eräänlainen tarkistuslista valmistusystävällistä suunnittelua tukemaan.

1.1 Rajaus ja tavoitteet

Levytuotteiden valmistuksessa käytettävien tuotantomenetelmien suhteen työ on rajattu siten, että käsiteltäviksi menetelmiksi on otettu ainoastaan nykyaikaisia ja nykyään käytössä olevia valmistusmenetelmiä. Työssä käsitellään tavallisimmin valmistettavia muotoja, joita voidaan valmistaa joustavilla piensarja menetelmillä. Näin ollen käsittelyn kohteiksi otetut menetelmät ja niihin liittyvät ohjeistukset pätevät suurimpaan osaan ohutlevytuotteisiin tehtävistä leikatuista tai taivutetuista muodoista. Esimerkiksi mekaanista leikkausta käsiteltäessä on aihetta lähestytty modernien levytyökeskusten näkökulmasta, jolloin keskeisimmäksi menetelmäksi on muodostunut lävistys ja nakerrus. Termisistä menetelmistä käsittelyyn on otettu yleisimmät menetelmät, eli polttoleikkaus, laserleikkaus, sekä plasmaleikkaus. Erikoisempaa ja erittäin nykyaikaisena vaihtoehtoisena leikkausmenetelmänä mukana on vesisuihkuleikkaus. Leikkaukseen liittyen työ on lisäksi rajattu käsittelemään ainoastaan 2D –muotojen leikkaamista.

Taivutuksen ja särmäyksen aluetta lähestytään ainoastaan taivutukseen tarkoitettujen koneiden, eli särmäyspuristimien ja taivutusautomaattien perspektiivistä. Tällöin käsitellään ainoastaan suoria särmäyksiä, eikä esimerkiksi erilaisia muovausmenetelmiä, kuten syvävetoa ole käsitelty lainkaan. Myöskään erilaisiin liittämismenetelmiin ei ole tässä työssä puututtu. Materiaalien suhteen työ on rajattu käsittelemään lähinnä seostamattomien tai niukkaseosteisten terästen ryhmää, mutta myös ruostumattomien terästen ja alumiinien erityispiirteet on otettu esille sellaisissa tapauksissa, jossa niiden työstäminen aiheuttaa erityistoimenpiteitä tai rajoituksia.

Työssä käsitellyt tuotantomenetelmät on jaettu seuraaviin ryhmiin: leikkaus ja lävistys, sekä taivutus ja särmäys. Työssä kuvataan ensin eri tuotantomenetelmien perusteet ja tuotantoprosessit, minkä lisäksi käsitellään jokaiseen menetelmään liittyviä tuotantokoneita ja työkaluja. Näiden osioiden tarkoituksena on tarjota suunnittelijalle pintapuolinen kuva siitä, millainen valmistusvaihe oikeastaan on, ja millaista tekniikkaa tuotteen valmistuksessa käytetään. Varsinaiset suunnitteluun liittyvät asiat on puolestaan käsitelty leikkaus- ja taivutus osioiden lopussa, mihin on poimittu eri menetelmiin yleisesti liittyviä erityishuomiota suunnitteluvaihetta ajatellen, sekä eri menetelmien mahdollisuuksia ja rajoituksia esimerkiksi tarkkuuden ja muotojen suhteen. Kyseisistä huomioista ja ohjeista koottua liitteen 1 tarkistuslistaa suunnittelija voi hyödyntää levytyötuotteita suunniteltaessa, ja tarkistaa näin kohta kohdalta tuotteen valmistusystävällisyyden toteutumisen työssä käsiteltyjen valmistusmenetelmien osalta. Tarkistuslista on koottu tässä työssä käytettyjen lähteiden perusteella.

1.2 DFX –perusteet

Tuotteen suunnitteluvaiheessa voidaan vaikuttaa tyypillisesti noin 70 – 80 %:iin tuotteen kehityksessä ja valmistuksessa syntyvistä kustannuksista. Näin ollen suunnitteluvaiheen merkitystä ei voida liikaa korostaa. Hyvän suunnittelutyön perustana on ottaa huomioon mahdollisimman aikaisessa vaiheessa kaikki tuotteen elinkaaren eri vaiheisiin liittyvät tavoitteet ja rajoitukset. Tällöin on mahdollista saavuttaa suuria säästöjä materiaali- ja tuotantokustannuksissa. Tämän tehtävän helpottamiseksi on kehitetty niin kutsuttu DFX (Desing For X) menetelmä. (Kalpakjian & Schmid 2006, s. 11.)

DFX menetelmä on jaettu useaan eri osioon, joiden tarkoituksena on saada suunnittelija miettimään esimerkiksi tuotteen valmistettavuutta, kokoonpantavuutta, luotettavuutta sekä käytön jälkeisiä toimia. Tämän työn aiheina ovat lähinnä valmistettavuuteen ja kokoonpantavuuteen keskittyvät osiot, painopisteenä kuitenkin selkeästi valmistettavuus. Tällöin puhutaan termeistä DFM (Desing For Manufacturing), ja DFA (Desing For Assembly). (Kalpakjian & Schmid 2006, s. 11.)

DFM eli Design For Manufacturing keskittyy siis tuotteen valmistettavuuteen ja sen huomioon ottamiseen suunnitteluvaiheessa. Menetelmän avulla pyritään alentamaan valmistusvaiheessa aiheutuvia kustannuksia, joita tarkasteltaessa tulee huomioida sekä eri materiaaleista, että valmistusprosesseista aiheutuvat kustannukset. Lisäksi valmistuskustannuksiin vaikuttavat myös muut tekijät, kuten osien määrä, kappaleen monimutkaisuus, materiaalin vahvuudet, toleranssit, sekä vaadittu pinnanlaatu. (Kuo, Huang & Zhang 2001, s. 245-246; Timings & Wilkinson 2000, s. 7-9.)

Design For Assembly (DFA) ajatus lähtee puolestaan liikkeelle tuotteen kokoonpanokustannuksista. Nämä pystytään minimoimaan suunnittelemalla kappale alusta asti tarkoituksenmukaisinta ja taloudellisinta kokoonpanojärjestelmää ajatellen. Neljä päätekijää, jotka vaikuttavat kokoonpanon kustannuksiin, ovat osien määrä ja niiden käsiteltävyys, sekä sijoitettavuus ja kiinnitettävyys. Tällöin DFA teorian mukaan suunnittelijan pitää:

- **minimoida:** osien ja kiinnikkeiden määrä, konstruktiovaihtoehtojen määrä, kokoonpanoliikkeiden määrä, sekä kokoonpanosuuntien määrä.
- **tarjota:** sisään/läpivientejä helpottavat viisteet, osien automaattinen kohdistus, helppo luoksepäästävyys asennuspinnoille, symmetriset tai selkeästi epäsymmetriset osat, sekä osien helppokäsiteltävyys ja kuljetus.
- **välttää:** näköesteitä, samanaikaisesti tehtäviä sovituksia ja kiinnityksiä, sotkeutuvia ja takertuvia osia, säätöjä, jotka vaikuttavat aiempiin säätöihin, sekä mahdollisuuksia kokoonpanovirheisiin. (Kuo et al. 2001, s. 243-244.)

2 LEIKKAUS JA LÄVISTYS

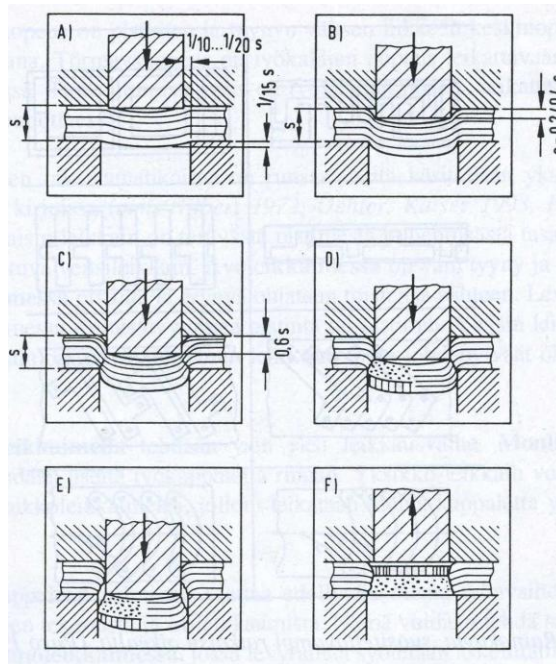
Levytyötuotteiden valmistuksesta puhuttaessa ensimmäinen varsinainen työvaihe on usein leikkaus. Tällöin puhutaan niin kappaleiden irrottamisesta kelalta tai arkista, kuin suljettujen muotojen tekemisestä levyaihioon. Tässä työssä leikkausmenetelmät on jaettu karkeasti kahteen ryhmään: mekaaniseen leikkaukseen ja termiseen leikkaukseen.

2.1 Mekaaninen leikkaus

Mekaaninen leikkaus terminä sisältää suuren määrän erilaisia leikkausmenetelmiä. Mekaanisiksi leikkausmenetelmiksi luokitellaan mm: suuntaisleikkaaminen, rullaleikkaaminen, sahaaminen, nakertaminen, sekä joissain yhteyksissä myös vesisuihkuleikkaus. Näistä sahausta käytetään lähes yksinomaan tankomaisille aihioille, mistä syystä menetelmä on rajattu pois tästä työstä. Lisäksi suuntaisleikkaamista ja rullaleikkaamista käytetään erityisesti erilaisten isompien aihoiden irrottamisessa, jolloin niitä ei kannata tähän työhön sisällyttää. Näin ollen mekaanisen leikkauksen aluetta lähestytään lähinnä levytyökeskusten näkökulmasta, jolloin pääasiallisesti käsiteltäviksi menetelmiksi muodostuvat lävistäminen ja nakertaminen. (Aaltonen, Andersson & Kauppinen 1997, s. 13-14.)

2.1.1 Perusteet ja prosessikuvaus

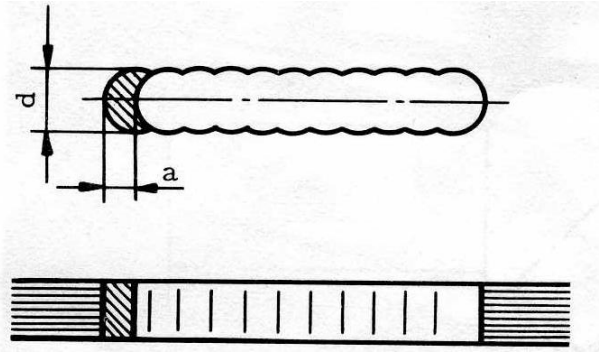
Lukuun ottamatta sahausta ja vesisuihkuleikkausta, on peruseriaate hyvin samantyyppinen kaikissa mekaanisissa leikkausmenetelmissä. Tällöin puhutaan niin sanotusta meistotekniikasta, jossa leikkaus voidaan suorittaa niin pistimen ja tyynyn avulla (esim. nakertaminen), kuin esimerkiksi saksimaisten terien vaikutuksella (suuntaisleikkaus). Meistossa kone painaa leikkaustyökalun vastintyökaluun, jolloin välissä olevaan levyyn muodostuu leikkauspinta osittain leikkautumalla ja osittain murtumalla. Leikkautumisen vaiheet on esitetty seuraavan sivun kuvassa (kuva 1). (Aaltonen et al. 1997, s. 90.)



Kuva 1. Mekaanisen leikkautumisen vaiheet:

- A) levyn kimmainen taipuminen pistimen(/terän) kohdatessa levyn yläpinnan
- B) levyn plastisen muodonmuutoksen alku
- C) repeytyminen ja jäysteen muodostuminen
- D) lopullinen leikkautuminen
- E) leikkeen läpityöntäminen
- F) pistimen(/terän) palautuminen. (Aaltonen et al. 1997, s. 91.)

Kun mekaanista leikkausta lähestytään levytyökeskusten näkökulmasta, muodostuu pääasialliseksi leikkausmenetelmäksi nakertaminen. Nakerruksen mekaniikka on edellisen kuvauksen mukainen, ja yhtenäinen leikkausjälki syntyy useiden peräkkäisten iskujen seurauksena, iskutaajuuden ollessa tavallisimmin noin 400...1200 i/min. Nakerrustyökalun osat ovat pistin, tyyny sekä irrotin. Erilaisia työkaluja on lukemattoman paljon, ja niiden muoto ja koko tulee valita kulloisenkin käyttökohteen mukaan. Kaikissa tapauksissa on kuitenkin huomioitava nakerruksen syöttö, jonka on oltava sellainen, että jokaisella iskulla pistimen pinta-alasta käytetään yli 50 %. Mikäli näin ei toimita, voi pistin useissa tapauksissa katketa. Nakertamalla syntyvää leikkausjälkeä on havainnollistettu kuvassa 2. (Aaltonen et al. 1997, s. 36.)



Kuva 2. Nakertamalla syntyvä leikkausjälki pyöreällä ja neliskulmaisella työkalulla (Haikonen 1979, s. 19).

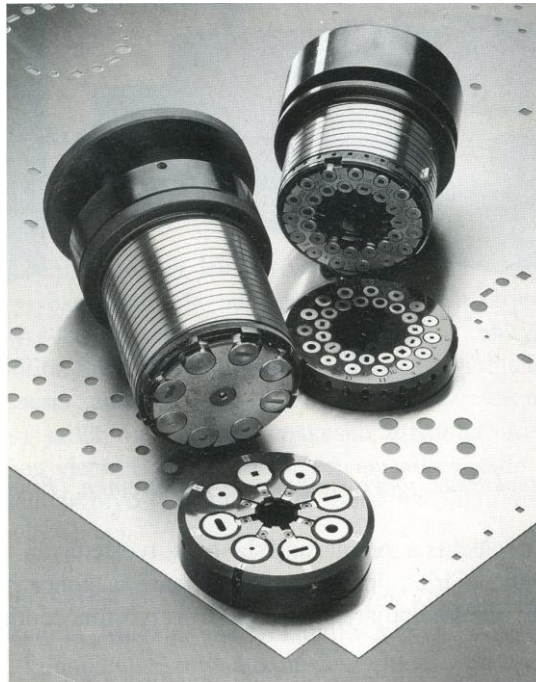
2.1.2 Laitteistot ja työkalut

Merkittävimmiten laitteiksi ja koneiksi mekaanisesta leikkauksesta puhuttaessa, ovat nousseet numeerisesti ohjatut levytyökeskukset. Ne ilmaantuivat markkinoille varsinaisesti 1970-luvun alussa, ja nykyisin niitä valmistetaan hyvin monina erilaisina variaatioina. Eri valmistajien koneet voivat poiketa toisistaan rakenteiden, lisälaitemahdollisuuksien, sekä ohjelmointitapojensa puolesta. Yhteisenä ominaisuutena kaikilla on monipuolisuus ja useat eri sovelluskohteet. (Aaltonen et al. 1997, s. 38-42.)

Runkotyypiltään levytyökeskus on yleisimmin joko C- tai O-runkoinen. C-runko on huomattavasti yleisempi halvemmän ja helpommin valmistettavan runkonsa vuoksi. Toiminnallisesti levytyökeskukset voivat olla joko mekaanisia tai hydraulisia. Mekaaniset levytyökeskukset ovat yleisempiä, sillä ne ovat paljon nopeampia. Toisaalta ne ovat myös monimutkaisempia, ja näin ollen niin hankintahinnaltaan kuin ylläpitokustannuksiltaan kalliimpia. (Ihalainen, Aaltonen, Aromäki & Sihvonen 2003, s. 258.)

Kuten jo aiemmin totesin, on erilaisia nakerrustyökaluja hyvin paljon. Vakioituja työkalumuotoja ovat pyöreä, neliö, suorakaide sekä ovaali. Tärkeän lisänsä työkalupalettiin tuovat nykyisin käytössä olevat erilaiset kääntyvät työkalut. Ne helpottavat ohjelmointia vähentämällä työkalujen määrää ja nopeuttavat vaikeiden muotojen leikkaamista. Kääntyvän työkalun asetuskulman muutos voi olla esimerkiksi 8°/isku nopeuden ollessa noin 350i/min. Kuvassa 3 on esitetty erilaisia

levytyökeskuksen työkaluja niin kutsuttuihin MultiTool –työkalunpitimiin asennettuina. (Ihalainen et al. 2003, s. 259.)



Kuva 3. Levytyökeskuksen erilaisia pistimiä ja tyynyjä MultiTool –työkalunpitimissä (Aaltonen et al. 1997, s. 40).

Levytyökeskuksen eri työkalut on tyypillisesti ladattu erilaisiin revolvereihin, makasiineihin tai kasettisysteemeihin. Nämä mahdollistavat myös nykyisin lähes poikkeuksetta käytetyn automaattisen työkalunvaihdon suorittamisen. Esimerkiksi hyvin yleisesti käytetyn revolverin (kuva 4) tapauksessa työkalua vaihdetaan työkalurevolveria pyöryttämällä, jolloin toiminto on hyvin nopea. Muutoin revolveri ei liiku, vaan leikkauskohdan muuttaminen tapahtuu leikattavaa levyä liikuttelemalla. Liikuttelun hoitavat pitimet ovat joko pneumaattisesti tai hydraulisesti toimivia. Tyypillisen työkalurevolverin työkalumäärä on noin 20 – 72 kpl, jolloin revolverin työkaluja ei tarvitse vaihtaa kovinkaan usein. (Ihalainen et al. 2003, s. 259.)



Kuva 4. Levytyökeskuksen työkalurevolveri (Töyrä, Vaurio & Tajonlahti 1988, s.18).

2.2 Terminen leikkaus ja vesisuihkuleikkaus

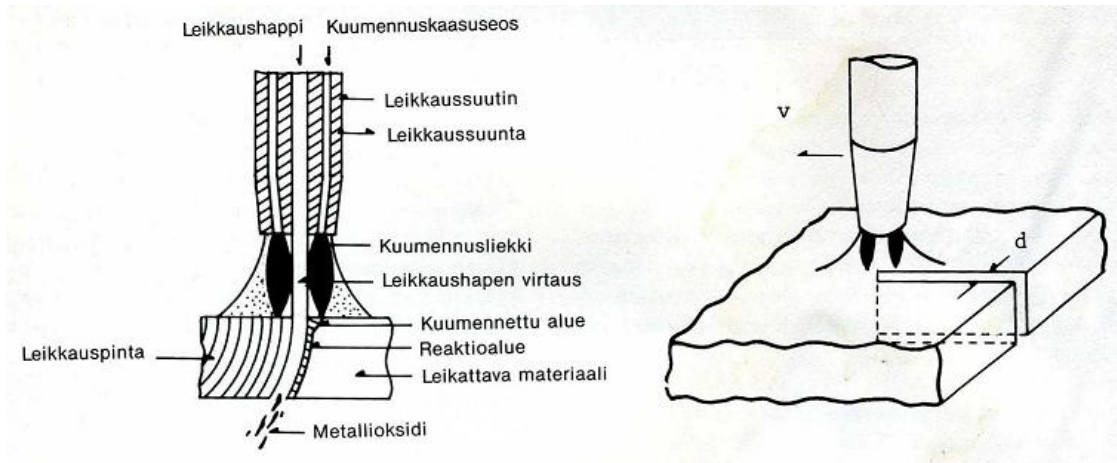
Terminen leikkaus on usein erittäin kilpailukykyinen vaihtoehto mekaaniselle leikkaukselle. Sen etuina ovat leikattavan muodon vapaus, sekä parempi suorituskyky paksumpiin levyihin siirryttäessä (yli 8...10 mm). Tässä työssä käsitellään kolmea tärkeintä termisen leikkauksen menetelmää: polttoleikkausta, plasmaleikkausta ja laserleikkausta. Lisäksi tässä osiossa käsitellään myös vesisuihkuleikkauksen ominaisuuksia. Vesisuihkuleikkaus ei varsinaisesti kuulu termisiin leikkausmenetelmiin, mutta on leikkauslaitteiston ja leikattavien muotojen suhteen hyvin lähellä termisiä leikkausmenetelmiä. Tämän vuoksi se käsitellään useissa tapauksissa niiden yhteydessä. (Aaltonen et al. 1997, s. 16-17.)

2.2.1 Polttoleikkaus

Polttoleikkauksessa leikkaavana elementtinä toimii leikkausuraan suunnattu happisuihku. Leikattava materiaali kuumennetaan paikallisesti syttymislämpötilaansa polttokaasun avulla ja poltetaan sitten puhtaan hapen muodostaman kaasusuihkun vaikutuksella. Sula metalli poistetaan leikkausrailosta hapen kineettisen energian avulla. Polttokaasuina käytetään tyyppillisesti asetyleeniä, propaania tai metaania. (Aaltonen et al. 1997, s. 19.)

Polttoleikkauksen periaate on esitetty kuvassa 5. Polttoleikkaussuuttimesta virtaavan polttokaasun ja kuumennushapen seos palaa suuttimen päähän muodostuvassa liekissä, jolloin palokaasut kuumentavat leikattavan materiaalin. Suuttimen keskeltä puhalletaan leikkaushapetta, joka hapettaa metallin ja puhaltaa sulan pois. Hapettaminen on eksoterminen reaktio, jolloin se vapauttaa lämpöä.

Tämä osaltaan kuumentaa kappaletta ja pitää metallin sulassa muodossa kompensoiden leikkauksessa tapahtuvia lämpöhäviöitä. Kun suutinta liikutetaan leikkaussuuntaan, syntyy haluttu jatkuva leikkausrailo. (Niemi & Aromäki 1985, s. 3-6.)



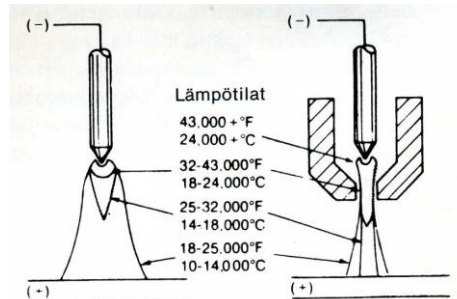
Kuva 5. Polttoleikkauksen periaate (Niemi & Aromäki 1985, s. 4).

Polttoleikkaus soveltuu useille eri teräslaaduille, sekä titaanille ja vanadiinille. Hyvin runsasseosteisten terästen, kuten ruostumattomien- ja haponkestävien terästen leikkaus ei kuitenkaan onnistu. Materiaalivahvuksien suhteen polttoleikkaus on vapaampaa, sillä sen toiminta-alue ulottuu 3 mm:n ainevahvuksista aina jopa 1500 mm:n ainevahvuuksiin. Tämän tekee mahdolliseksi se, että polttoleikkauksessa tarvittava energia saadaan suurilla ainevahvuksilla lähes kokonaan leikkausprosessista itsestään. Tämä puolestaan johtuu siitä, että metallin hapettuminen on eksoterminen reaktio joka vapauttaa lämpöä. Muilla leikkausmenetelmillä näin ei ole, ja polttoleikkaus onkin käytännössä ainoa mahdollinen leikkausmenetelmä kun mennään yli 100 mm:n ainevahvuuksiin. (Niemi & Aromäki 1985, s. 22-23.)

2.2.2 Plasmaleikkaus

Plasmalla tarkoitetaan korkeaan lämpötilaan kuumennettua osaksi dissosioitunutta ja ionisoitunutta kaasua, joka koostuu erillisistä molekyyleistä, atomeista, ioneista ja elektroneista. Plasmaleikkauksessa tämän kuumen plasman lämpöenergiaa hyväksikäyttäen sulatetaan leikattavaan levyyn railo. Sulanut metalli puhalletaan pois leikkaurailosta plasmakaasun kineettisen energian avulla.

Plasmaleikkauksen periaate ja plasmakaaren kuristuksen vaikutus kaaren keskittyneisyyteen ja lämpötiloihin on esitetty kuvassa 6. (Aaltonen et al. 1997, s. 20-21.)



Kuva 6. Plasmaleikkauksen periaate sekä plasmakaaren kuristuksen vaikutus kaaren keskittyneisyyteen ja lämpötiloihin (Niemi & Aromäki 1985, s. 24).

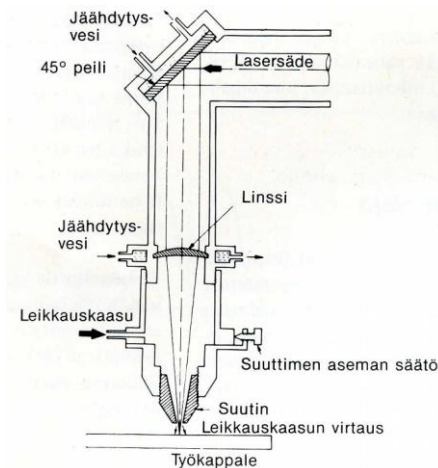
Plasmaleikkauksen suorituksessa tarvittavaa plasmää synnytetään johtamalla plasmatilan muodostava kaasu plasmaleikkaukspolttimessa olevan elektrodin sekä leikattavan levyn välillä palavaan valokaareen. Tämän niin kutsutun plasmakaaren lisäksi käytetään apukaarta, jolla plasmakaasu ionisoidaan sähköä johtavaksi. Plasmakaarta kuristetaan leikkaussuuttimen avulla, jolloin siitä tulee keskittyneempi ja kuumempi. Plasmaleikkauksessa kaaren lämpötila on erittäin korkea, tyypillisesti noin 25 000...30 000 °C. (Niemi & Aromäki 1985, s. 24-25.)

Plasmaleikkausta voidaan soveltaa periaatteessa kaikille sähköä johtaville materiaaleille. Se on erittäin yleinen menetelmä esimerkiksi sinkittyjen LVI-tekniisten tuotteiden valmistuksessa. Lisäksi se on ruostumattomien ja haponkestävien terästen yleisin leikkausmenetelmä. (Niemi & Aromäki 1985, s. 39-40.)

2.2.3 Laserleikkaus

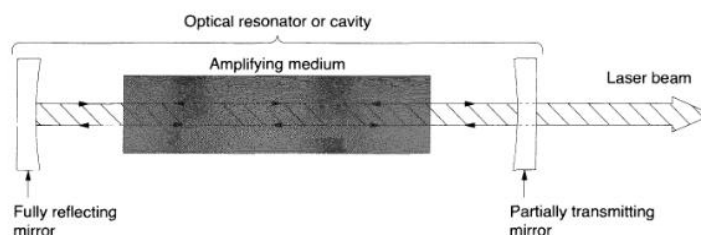
Termi laserleikkaus sisältää kaksi erilaista leikkausmenetelmää: lasersulatusleikkauksen ja laserpolttoleikkauksen. Lasersulatusleikkauksessa työkappaleeseen sulatetaan railo laservalon energiaa hyväksikäyttäen. Sulanut materiaali poistetaan railosta leikkauskohtaan suunnatun kaasusuihkun avulla. Laserpolttoleikkauksessa leikkauskohta kuumennetaan puolestaan

syttymislämpötilaansa. Kaasusuihkun tehtävänä laserpolttoleikkauksessa on metallin hapettaminen, sekä syntyvän sulan metallioksidin poistaminen. Laserleikkauksen periaate ja leikkauspään rakenne käy ilmi kuvasta 7. (Ihalainen et al. 2003, s. 266-267.)



Kuva 7. Laserleikkauksen periaate ja leikkauspään rakenne (Niemi & Aromäki 1985, s. 44).

Laser leikkauksen leikkaavana elementtinä toimiva laservalo synnytetään niin kutsutussa laser-resonaattorissa. Yksinkertainen laser-resonaattori koostuu kahdesta vastakkaisesta peilistä, sekä niiden välillä olevasta laseroivasta väliaineesta. Väliaineeseen pumpataan energiaa joko optisesti tai sähköenergian avulla, jolloin resonaattorin energia kasvaa valon kulkiessa edestakaisin peilien välissä. Toinen peileistä on osittain läpäisevä, jolloin osa laservalosta saadaan otettua käyttöön. Resonaattorista laservalo kuljetetaan työstöpään fokusointioptiikkaan menetelmästä riippuen joko peilien tai optisen kuidun avulla. Laser-resonaattorin rakenne on esitetty kuvassa 8. (Steen 2003, s. 11.)



Kuva 8. Laser-resonaattorin periaate (Silfvast 2004, s. 2).

Laseroiva väliaine voi olla kaasu, neste, tai kiinteä kide lasertyyppistä riippuen. Yleisimpiä leikkaukseen käytettäviä lasertyypppejä ovat CO₂-laser, Nd:YAG-laser, Kiekkolaser, sekä kuitulaser. Näistä CO₂- ja Nd:YAG-laserit edustavat vanhempaa, ja laajasti käytössä olevaa lasertekniikkaa. Vastaavasti kiekkolaser ja kuitulaser ovat vielä suhteellisen tuoreita lasertyypppejä, joiden mahdollisuudet ovat vielä laajasti käyttämättä. Oheisessa taulukossa (taulukko 1) on vertailtu neljän käytetyimmän työstölaserin ominaisuuksia. (Silfvast 2004, s. 510-515.)

Taulukko 1. Yleisimpien leikkauslasereiden ominaisuuksia (Silfvast 2004).

	CO₂-laser	Nd:YAG-laser	Kiekkolaser	Kuitulaser
Laseroiva väliaine	Kaasuseos (CO ₂ ~10 %, N ~12 %, He ~78 %)	Neodyymi (Nd)	Ytterbium (Yb)	Ytterbium (Yb), (säde muodostuu kuidussa)
Aallonpituus	10,6 µm	1,064 µm	1,1 µm	1,1 µm
Ulostuloteho (Maksimi)	< 20 kW (100 kW)	< 6 kW	< 12 kW (25 kW)	< 20 kW (50 kW)
Kokonais-hyötysuhde	n. 10 %	n. 5 %	n. 25 %	n. 30 %
Diodin elinikä	-	n. 10 000 h	n. 30 000 h	n. 100 000 h
Huoltotarve	Vaaditaan	Usein	Usein	Ei vaadita
Lattiapinta-ala (4/5 kW kokoluokka)	n. 3 m ²	n. 6 m ²	n. 4 m ²	n. 1 m ²
Jäähdytys	Vesi	Deionisoitu vesi	Vesi	Ilma/Vesi

2.2.4 Vesisuihkuleikkaus

Vesisuihkuleikkaus perustuu korkeapaineisen vesisuihkun leikkaavaan vaikutukseen. Hydraulisen paineenkohottajan avulla veden paine nostetaan aina 400 MPa asti, jolloin veden nopeudeksi suuttimesta purkautuessaan muodostuu jopa kaksinkertainen äänennopeus. Prosessiin vaikuttavat tärkeimmät parametrit ovat suuttimen halkaisija ja muoto, nesteen paine ja nopeus, suuttimen etäisyys ja kulma työkappaleeseen nähden sekä veden lisäaineet. Veden lisäaineina voidaan joissain tapauksissa käyttää esimerkiksi abrasiivista ainetta, jolloin leikkausvaikutus tehostuu. Tämä on usein välttämätöntä esimerkiksi metallia leikattaessa. (Ihalainen et al. 2003, s. 389.)

2.3 Leikkauksen suunnittelu

Ohutlevy tuotteiden leikkausvaiheella on erittäin suuri vaikutus tuotteen koko valmistuskustannuksiin ja lopulliseen laatuun, jolloin sen suunnitteluun kannattaa kiinnittää suurta huomiota. Tässä osiossa on käsitelty keskeisimpiä ohutlevy tuotteiden leikkaukseen liittyviä suunnittelussa huomioon otettavia seikkoja. Tällaisia ovat kappaleen muotoilu, taivutusta varten tehtävät nurkkien loveukset, leikkauksen tarkkuus, taloudellinen levynkäyttö, sekä materiaalit ja materiaalipaksuudet. Koska käsiteltäviksi materiaaleiksi on rajattu lähinnä mustat teräkset, on materiaaliosiota käsitelty lähinnä nimen omaan materiaalipaksuuksia silmällä pitäen. (Honka 1980, s. 1.)

2.3.1 Leikattavat muodot

Ohutlevyjen leikkauksen suunnittelussa merkittävin osa-alue on leikattavien muotojen optimointi ja oikeanlainen sijoittelu. Muotojen optimoinnilla tarkoitetaan esimerkiksi leikattavien muotojen mahdollisimman yksinkertaista toteutusta. Tällöin päästään mahdollisimman pieniin työkalu kustannuksiin, sekä myös myöhemmin tarkemmin käsiteltävään levymateriaalin tehokkaaseen hyödyntämiseen. Toinen asia on muotojen koon optimointi, jolloin puhutaan esimerkiksi lävistettävän reiän koon suunnittelusta sellaiseksi, että se voidaan valmistaa vakiotyökaluin. Käytännössä tällä tarkoitetaan sitä, että suunnitellaan standardikokoisia reikiä. Leikattavien muotojen oikealla sijoittelulla tarkoitetaan puolestaan niiden etäisyyttä niin kappaleen reunoista, kuin toisistaankin. Kuvissa 9

ja 10 on esitetty muutamia leikattaviin muotoihin liittyviä muistettavia perussääntöjä. Seuraavaan listaan on lisäksi koottu muutamia tärkeitä leikattavien tuotteiden suunnitteluun liittyviä yleissääntöjä:

- Pyöreä reikä on useissa tapauksissa halvempi valmistaa kuin suorakaiteen muotoinen.
- Reikäkoko on valittava sellaiseksi, että se voidaan valmistaa vakiotyökaluin (standardisoitu reikäkoko).
- Reikiä ei saa sijoittaa liian lähelle toisiaan, tai levyn reunaa.
- Leikkauksessa on pyrittävä välttämään kapeita kannaksia, liian teräviä nurkkia ja tarpeettomia pyöristyksiä.
- Kappaleet on voitava valmistaa sellaisella työkaluvalikoimalla, joka mahtuu levytyökeskuksen työkaluvarastoon.
- Piirustusten mitoituksen on oltava sellainen, että se sopii levytyökeskuksen ohjelmointiin (esimerkiksi nollapistemitoitus). (Honka 1980, s. 1-5; Merikoski 1985, s. 9.)

	Epäedullinen	Edullinen
Aineen säästö oikealla osien sijoittamisella nauhaan käyttäen mahdollisesti myös kääntöleikkausta.		
Reunan tasoon taivutettavan ulokkeen juuret lovetettava repeämisen ehkäisemiseksi.		
Meistomuoto erotettava valumuodosta.		
Lähellä neliönmuotoa oleva kappale vaikea asemoida. Neliö tai neliöstä riittävästi poikkeava muoto edullisempia.		
Valssaus suunnan huomioonottaminen taivutuksessa.		

Kuva 9. Suunnittelusääntöjä leikkauksessa ja lävistyksessä (Honka 1980, s. 3).

	Epäedullinen	Edullinen
Mikäli tarkkuusvaatimukset sallivat, voivat käytettävät pyöristykset olla samansuuruiset jolloin säästetään ainetta.		
Pienin muutoksin saavutetaan huomattava aineen säästö, ja työkalu yksinkertaistuu.		
Tarpeettomat ulkopyöristykset lisäävät työkalun hintaa sekä ainehukkaa.		
		 Parempi Valmistuksen kannalta edullisin
Työkalun yksinkertaistaminen muotoilemalla leikattavaa osaa.		
Pyöristykset reiän nurkissa ja reiät riittävällä etäisyydellä reunasta.		

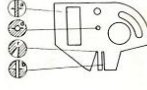
Kuva 10. Suunnittelusääntöjä leikkauksessa ja lävistyksessä (Honka 1980, s. 2.)

Termisillä leikkausmenetelmillä tai vesisuihkuleikkauksella leikkaaminen on muotojen suhteen mekaanista leikkausta vapaampaa. Periaatteessa mahdollista on tehdä millainen muoto tahansa, jolloin menetelmien käyttö antaa suunnittelijalle vapauksia päämittojen, reikien ja yksityiskohtien mitoituksen suhteen. Mielessä on silti pidettävä eri leikkausmenetelmien mahdollistama pienin mahdollinen muoto, jolloin esimerkiksi pienin mahdollinen reiän halkaisija määräytyy

leikkausmenetelmän mukaan. Pienintä mahdollista muotoa rajoittavat esimerkiksi leikkausrailon leveys, leikkausprosessin työkappaleeseen kohdistama lämpövaikutus, saavutettava pinnanlaatu, sekä leikkauskoneen ohjausperiaatteen seurantakyky. (Niemi & Aromäki 1985, s. 52.)

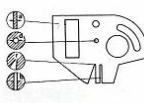
Polttoleikkauksessa leikkausrailo on melko leveä, työkappaleeseen kohdistuvat lämpömäärät suuria, ja leikkauksen mittatarkkuus suhteellisen heikko. Tästä syystä kovin kapeita ja pitkiä, sekä pieniä ja monimutkaisia muotoja ei kannata polttoleikata. Plasmaleikkauksella leikkaus on jo huomattavasti tarkempaa, ja hienosädeplasmalla voidaan leikata hyvinkin pieniä ja monimutkaisia muotoja. Plasmaleikkauksessa on kuitenkin huomioitava tarkkuuden radikaali heikentyminen levynpaksuuden kasvaessa, mikä johtuu leikkaussäteen leventymisestä suuttimesta kauemmas siirryttäessä. Äärimmäistä tarkkuutta vaadittaessa laserleikkaus ja vesisuihkuleikkaus ovatkin useissa tapauksissa parhaita menetelmiä. Silti näitäkin menetelmiä käytettäessä suunnittelijan on leikattavaa osaa suunnitellessaan pidettävä mielessä selkeys ja järkevät liittymismittat tuotteen mahdollisiin muihin osiin. Lisäksi on muistettava, että tarpeettoman tarkka mitoitus aiheuttaa helposti turhia lisäkustannuksia valmistusvaiheessa. Karkeat ohjearvot eri leikkausmenetelmien railonleveyksille ja tarkkuuksille on esitetty lopussa liitteen 2 taulukossa, joka on koottu tässä työssä käytettyjen lähteiden perusteella. Kuvissa 11 ja 12 on puolestaan esitetty eräiden muotoelementtien valmistusmahdollisuuksia plasma- ja laserleikkaamalla. (Niemi & Aromäki 1985, s. 52.)

Muoto- elementti	Levynpak- suus (mm)	
	5	10
Kaistaleen leveys a mm	8	10
Loven leveys b mm	3	4
Reiän halkaisija d mm	15	
Sisäpyöristyssäde r mm	1,4	1,6



Kuva 11. Eräiden muotoelementtien valmistusmahdollisuudet vesistabiloidussa plasmaleikkauksessa (Niemi & Aromäki 1985, s. 40).

Muotoelementti	Levynpaksuus (mm)	5
Kaistaleen leveys a mm		5
Loven leveys b mm		0,25
Reiän halkaisija d mm		1
Sisäpyöristyssäde r mm		0,15

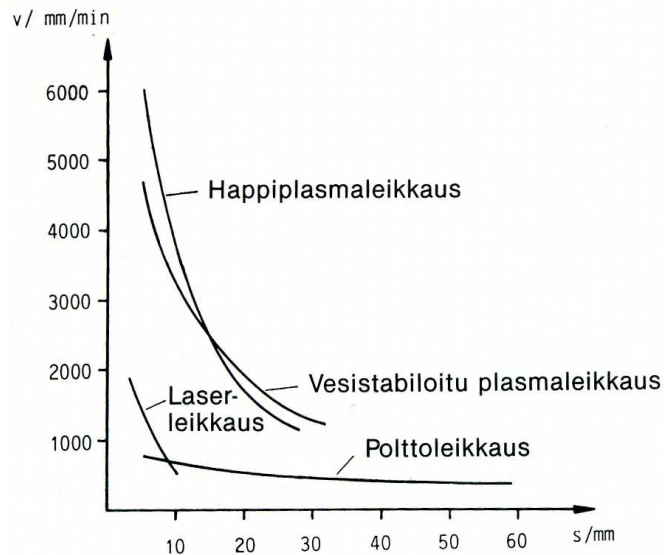


Kuva 12. Eräiden muotoelementtien valmistusmahdollisuudet CO₂ –laserleikkauksessa (Niemi & Aromäki 1985, s. 51).

2.3.2 Materiaalipaksuudet

Levytyökeskuksilla tehtävien mekaanisten leikkausten mahdollisuudet levynpaksuuksien suhteen on otettava aina huomioon. Mikäli toimitaan normaalien ohutlevyjen parissa (materiaalivahvuus alle 3 mm) ei yleensä esiinny ongelmia, mutta paksumpien levyjen tapauksessa asiaan kannattaa aina kiinnittää huomiota. Levytyökeskusten puristusvoima-alue on noin 150...600 kN, mikä tarkoittaa työstettävien levyn paksuuksissa aluetta 3...12 mm. Tavallisimmin levytyökeskusten puristusvoimat ovat kuitenkin vain noin 300 kN:n paikkeilla, jolloin paksumpien levyjen työstäminen voidaan unohtaa. (Aaltonen et al. 1997, s. 36-39.)

Termisten leikkausmenetelmien tapauksessa (tässä vesisuihkuleikkaus mukaan luettuna) leikattavien levyjen paksuudet vaihtelevat runsaasti riippuen niin menetelmästä, kuin kulloinkin käytössä olevasta laitteistosta. Nyrkkisääntöinä voidaan kuitenkin todeta, että laserleikkausta voidaan soveltaa materiaalin paksuus alueella noin 0,1...40 mm, plasmaleikkausta alueella noin 0,5...50 mm ja vesisuihkuleikkauksella alueella noin 0,1...100 mm. Kuten jo aiemmin tässä työssä todettu, on polttoleikkauksen materiaalipaksuus alue menetelmästä laajin, eli noin 3...1500 mm. Kuvassa 13 on esitetty termisten menetelmien materiaalipaksuudet ja niiden mahdollistamat leikkausnopeudet leikattavan materiaalin ollessa seostamatonta terästä. (Niemi & Aromäki 1985, s.52.)



Kuva 13. Termisten leikkausmenetelmien leikkausnopeudet ainepaksuuden mukaan, materiaalina seostamaton teräs (Niemi & Aromäki 1985, s. 52).

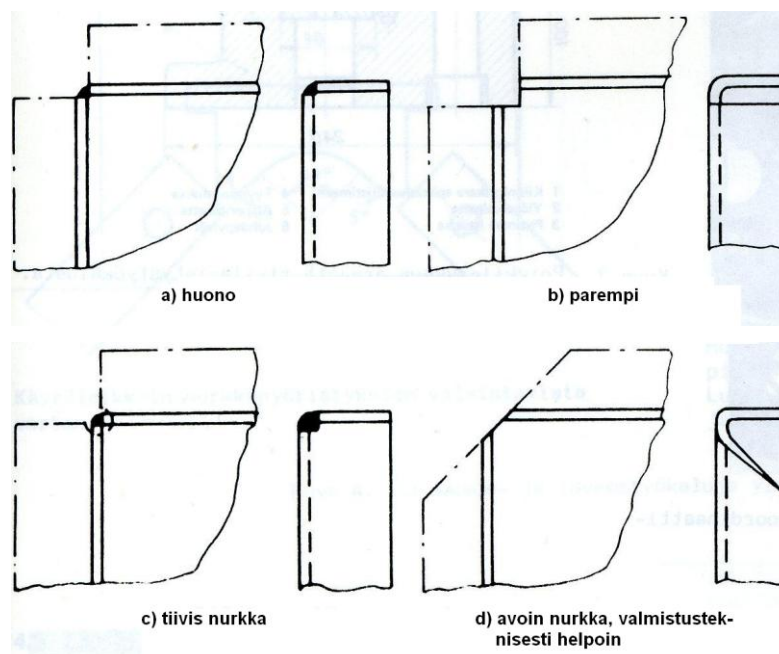
Pelkkää materiaalipaksuutta ajatellessa on usein mahdollista soveltaa useampaa kuin yhtä leikkausmenetelmää. Kun ajatellaan sen lisäksi vielä materiaalia, on menetelmän valinta jo hieman rajallisempaa. Koska tässä työssä on tarkoitus lähestyä leikkausmenetelmiä lähinnä mustia teräksiä, ruostumattomia teräksiä ja alumiineja ajatellen, ei tähän asiaan oteta suuremmin kantaa. Erityisrajoituksista on kuitenkin mainittava melko yleisesti esiin tuleva laserin rajoittuneisuus alumiinin leikkauksen suhteen. Myös aiemmin tässä työssä mainitut rajoitukset polttoleikkaamalla työstettävien materiaalien suhteen on aina syytä muistaa. (Niemi & Aromäki 1985, s. 51.)

2.3.3 Nurkan loveukset

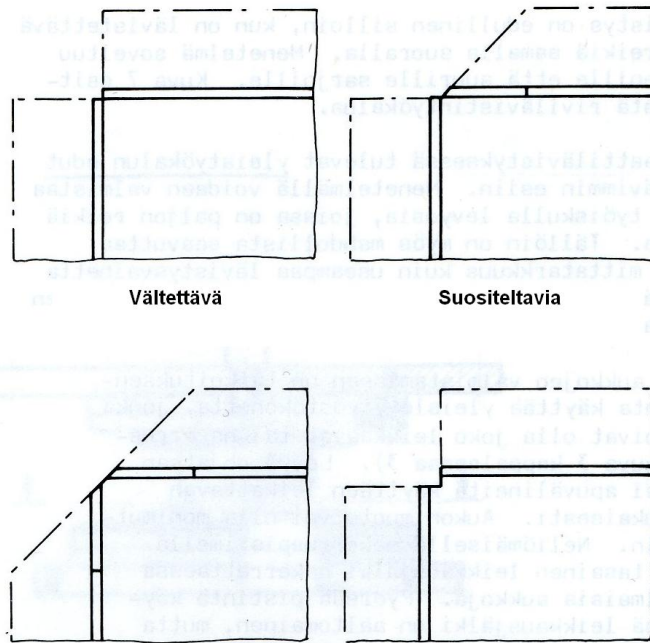
Kun ohutlevy aihioon on tarkoitus taivuttaa laatikkomainen muoto, tulee sen nurkkiin leikata taivutuksen mahdollistavat loveukset. Nykyiset suunnitteluohjelmat tekevät nämä helpotukset automaattisesti, mutta manuaalisesti suunniteltaessa on niiden toteutuksessa tiettyjä lainalaisuuksia, jotka on otettava huomioon. Nurkan suunnittelussa tulisi lähteä liikkeelle tuotteen käyttötarkoituksesta, jolla tarkoitetaan tässä tapauksessa nurkalta vaadittavaa tiiveystasoa. Tässä kohtaa tulee myös miettiä kokoonpano vaihetta eli käytännössä sitä millainen kiinnitys nurkkaan tulee. Esimerkiksi kokoonpanohitsattavaan tuotteeseen täytyy suunnitella täysin

erilainen muoto, kuin vaikkapa niittaamalla koottavaan tuotteeseen. (Haikonen 1979, s. 20.)

Kuvassa 14 on esitetty erilaisia vaihtoehtoja nurkan loveukselle särmättävässä kappaleessa. Mikäli rakenne on väsytytkuormitettu, tulee välttää terävää nurkkaa (kuva 14 a). Vähimmäisvaatimuksena on, ettei särmä ainakaan ala suoraan nurkasta (kuva 11 b). Kuvien 14 a ja 14 c tapauksissa on huomioitava viimeiseksi taivutettavan särmän riittävä ohitaivutusmahdollisuus takaisinjouston kompensoimiseksi. Tämä voidaan toteuttaa esimerkiksi kuvan 15 mukaisilla suositeltavilla nurkan loveuksilla. Kaikissa tapauksissa on tärkeää suunnitella loveussuunta siten, että jäyste jää taivutuksessa sisäpuolelle. Mikäli näin ei tehdä, voi jäyste muodostaa lähtökohdan levyn murtumiselle. Kuvan 14 c nurkkaan tuleva reikä muoto on hyvä lävistää muiden mahdollisten reikämuotojen yhteydessä. Tällaisessa loveuksessa taivutussärmät leikkaavat ympyrän keskipisteessä. Mikäli nurkka voi jäädä täysin avoimeksi, esimerkiksi erillisiä nurkkapaloja käytettäessä, voidaan hyödyntää leikkaus- ja taivutusvaihetta ajatellen valmistusteknisesti helpointa, kuvan 14 d mukaista nurkan loveusta. (Haikonen 1979, s. 20.)



Kuva 14. Särmättävän nurkan loveus. Leikkauksen ja taivutuksen kannalta helpointa d kohdan nurkkaa voidaan hyödyntää vain tietyissä tapauksissa (Haikonen 1979, s. 20).



Kuva 15. Nurkan loveus ohitaivutusmahdollisuus huomioon ottaen (Haikonen 1979, s. 20).

2.3.4 Leikkauksen tarkkuus

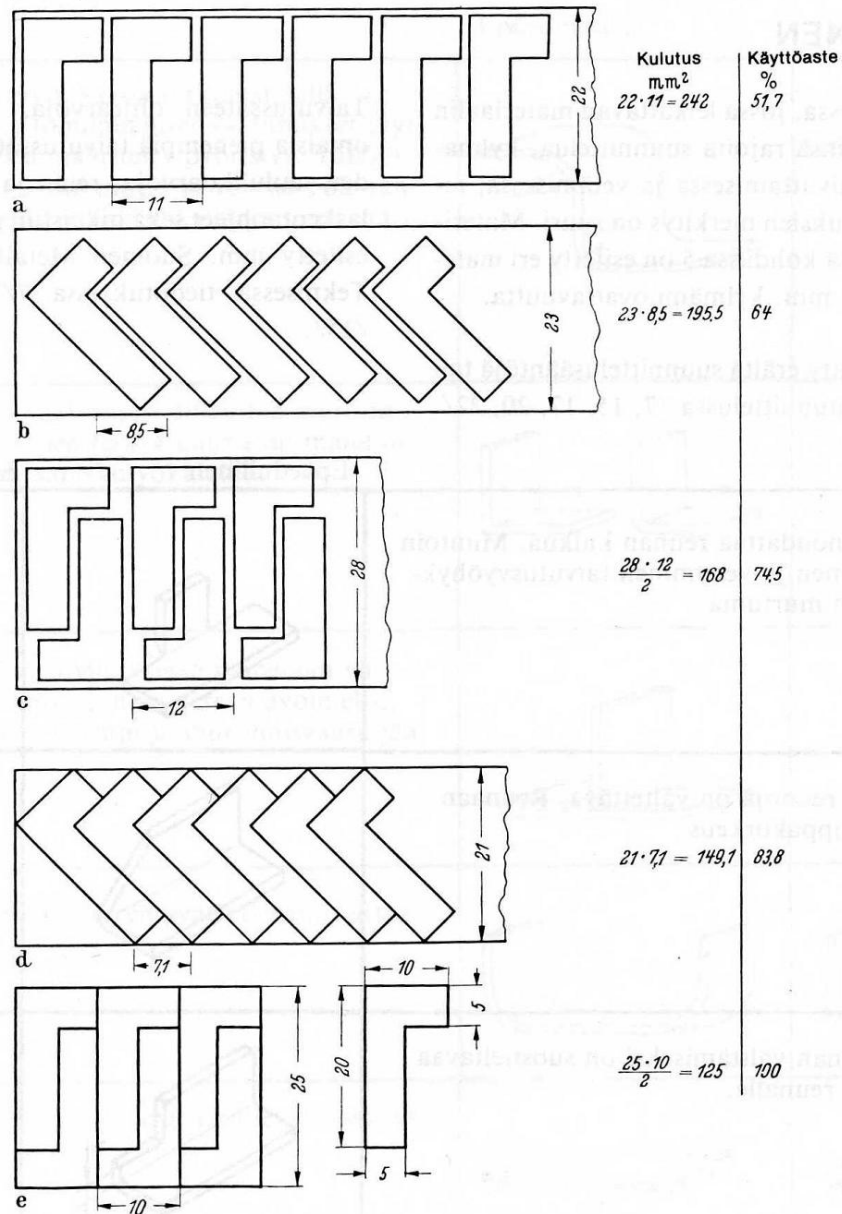
Kuten jo leikattavien muotojen yhteydessä mainittiin, pitää miettiä tarkkaan millaiseen tarkoitukseen suunniteltava kappale tulee, ja millaista tarkkuutta siltä silloin vaaditaan. Tämän pohtiminen ja sen huomioon ottaminen suunnittelussa ehkäisee tarpeettomien tarkkojen tuotteiden suunnittelun ja minimoi turhat lisäkustannukset valmistuksessa. Mikäli suunniteltavalta tuotteelta kuitenkin vaaditaan huomattavan suurta tarkkuutta, on kulloinkin soveltuvien valmistusmenetelmien soveltuvuus syytä tarkistaa erikseen. Standardissa SFS-EN 4012 on esitetty meistotekniikkaan liittyvät työtapakohtaiset toleranssit teräsrakenteiden ja yleisen koneenrakennuksen valssatuista teräslevyistä valmistetuille leikatuille ja muototaivutetuille osille. (Honka 1980, s. 23.)

Termistenleikkausmenetelmien sekä vesisuihkuleikkauksen tarkkuus riippuu hyvin monesta asiasta. Saavutettavaan tarkkuuteen vaikuttavat esimerkiksi leikkaukseen ohjauksen ja rakenteen tarkkuus, käytettävät leikkauksen nopeudet, käytettävien kaasujen/veden paineet, leikattavan materiaalin muodonmuutokset, sekä leikkaussuuttimen asento ja etäisyys leikattavasta pinnasta. Karkeat

ohjeavot eri leikkausmenetelmien leikatun kappaleen mittavirheille on esitetty lopussa liitteessä 2 olevassa taulukossa. (Niemi & Aromäki 1985, s. 17-18.)

2.3.5 Jätepalat

Kuten jo johdannossa todettu, voidaan suunnitteluvaiheessa vaikuttaa noin 70 – 80 %:iin tuotteen kokonaiskustannuksista. Eräänä tärkeänä osana näitä kustannuksia ovat levyjätteen muodostamat kustannukset, joiden minimoimiseksi tulee jo suunnittelu vaiheessa kiinnittää suurta huomiota levynkäyttöön ja levymateriaalien valintaan. Eräs tärkeimmistä apukeinoista levyjätteen määrän minimoimisessa on jo edellä mainittu leikattavien muotojen yksinkertaistaminen. Suunnittelemalla kappaleet mahdollisimman yksinkertaisiksi, voidaan niiden sijoittelua levyarkille helpottaa ja tehostaa huomattavasti. Levynkäytön suunnitteluun on myös olemassa siihen erikseen tarkoitettuja, niin kutsuttuja Nesting -tietokoneohjelmia. Kuvassa 16 on esitetty levynkäytön tehostaminen pelkän kappaleen sijoittelun avulla. Kuvan esimerkki on kuitenkin ainoastaan periaatteellinen ja suuntaa antava, eivätkä kaikki siinä esitetyt sijoitteluvaihtoehdot sovellu suoraan kaikille leikkausmenetelmille. (Merikoski 1985, s. 9-11.)



Kuva 16. Materiaalin käyttöaste irrotettaessa kappale eri tavoin rainasta tai nauhasta (Honka 1980, s. 9).

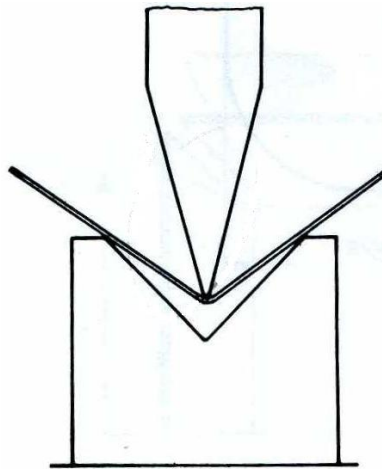
3 TAIVUTUS JA SÄRMÄYS

Erialaisten levytuotteiden valmistukseen liittyy lähes aina taivuttamista. Näin ollen tuotteelle asetettujen vaatimusten täyttämiseksi suunnittelijan tulee tuntea eri rakenneaineiden ja taivutusmenetelmien mahdollisuudet. Tällöin taivutuksen perusperiaatteiden ja prosessien tuntemus on tärkeää. Tässä työssä taivuttamisen teoria on rajattu käsittelemään taivutuksia, joissa taivutus akseli on suora, ja levy

muovautuu vain yhdestä suunnasta. Erikoisemmat menetelmät ja tapaukset on jätetty kokonaan työn ulkopuolelle. (Ihalainen et al. 2003, s. 268.)

3.1 Perusteet ja prosessikuvaus

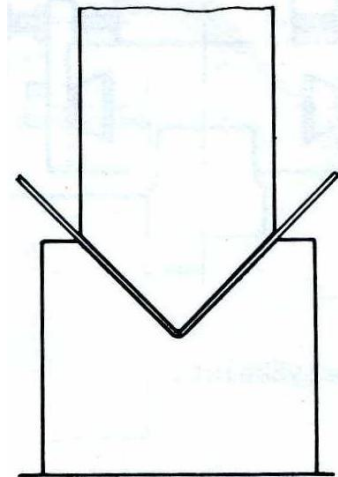
Ohutlevyjen taivuttaminen jaetaan vapaaseen taivutukseen ja pohjaaniskutaivutukseen. Vapaa taivutus on menetelmistä suositumpi joustavuuden, yksinkertaisten standardityökalujen, sekä helpon automatisoinnin vuoksi. Vapaa taivutuksessa levyaiho taipuu niin sanottuna kolmipistetaivutuksena ylätyökalun ja vastimen välissä. Tällöin taivutettava levy ei kosketa vastimeen kokonaan, vaan niiden väliin jää ilmarako. Taivutuksessa käytetään tyypillisimmin teräviä, yli 90° kulmia niin painimessa kuin vastimessakin, jolloin taivutettava kulma saadaan halutuksi ainoastaan ylätyökalun iskunpituutta säättämällä. Vapaa taivutuksen periaate on esitetty kuvassa 17. (Ihalainen et al. 2003, s. 269.)



Kuva 17. Vapaa taivutuksen periaate (Haikonen 1979, s. 22).

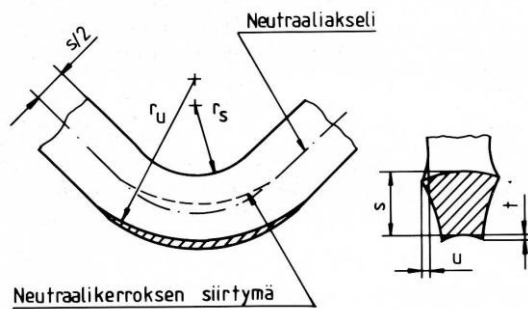
Pohjaaniskutaivutuksen periaatteena on painaa taivutettava levyaiho kokonaan alatyökalua vasten, jolloin siihen syntyy tarkasti sama kulma kuin vastimessa on. Tällöin aihio muovautuu työkalujen välissä täysin plastisesti, jolloin takaisinjousto ei pääse tapahtumaan. Taivutuksesta saadaan tällä tavoin erittäin mittatarkka ja jäykkä, mutta toisaalta taivuttavalta koneelta vaadittavat puristusvoimat ovat noin 3...5 -kertaiset vapaaseen taivutukseen verrattuna. Lisäksi työkalut soveltuvat ainoastaan tietyn kulman taivuttamiseen, mikä tekee menetelmästä

vapaataivutusta jäykemmän menetelmän. Pohjaaniskutaivutusta käytetäänkin yleisimmin suuria sarjakokoja käsittävässä ohutlevytuotannossa, jossa on paljon samaan kulmaan taivutettavia ohutlevykappaleita. Pohjaaniskutaivutuksen periaate on esitetty kuvassa 18. (Ihalainen et al. 2003, s. 270.)

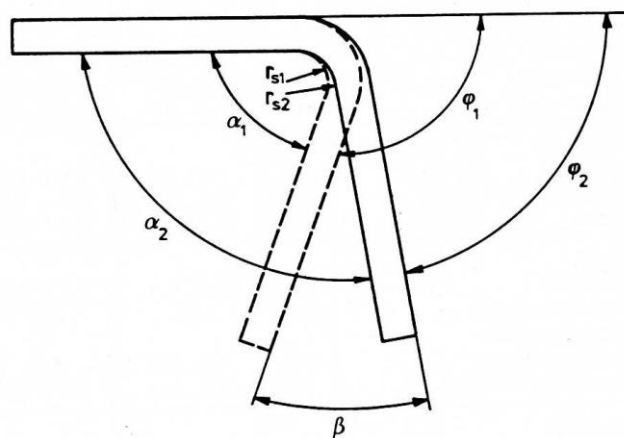


Kuva 18. Pohjaaniskutaivutuksen periaate (Haikonen 1979, s. 22).

Ohutlevyä taivutettaessa tapahtuu taivutuskohdassa monenlaisia muodonmuutoksia. Merkittävimmät muutokset ovat levyn venyminen taivutuksen ulkopinnalla, ja tyssäntyminen sisäpinnalla. Levy myös ohenee, ja sen reunoilla tapahtuu erilaisia muodonmuutoksia. Koska levyn ulkopinnalle muodostuu vetojännitystila, ja sisäpinnalle puristusjännitystila, sijaitsee levyn keskiosissa jännityksetön alue, jota kutsutaan neutraaliakseliksi. Taivutettaessa neutraaliakseli ei pysy enää kappaleen keskellä, vaan siirtyy lähemmäs taivutuksen sisäreunaa. Joissakin tapauksissa, esimerkiksi voimakkaan venytyksen vaikuttaessa taivutuskohtaan, voi neutraaliakseli siirtyä jopa kokonaan kappaleen ulkopuolelle. Kappaleessa syntyvät muodonmuutokset ovat määritettävissä levyn eri kohdissa, ja riippuvat pääasiassa särmän sisäsäteestä ja sen suhteesta levyn paksuuteen. Taivutuksen neutraaliakselin siirtyminen, sekä erilaiset muodonmuutokset käyvät ilmi kuvasta 19. Kuvassa 20 on puolestaan esitelty taivutukseen liittyviä nimityksiä merkintöineen. (Karppinen 1986, s. 12.)



Kuva 19. Neutraaliakseli ja taivutuksen aiheuttamat muodonmuutokset (Karppinen 1986, s. 12).



Kuva 20. Taivutukseen liittyviä nimityksiä merkintöineen (Karppinen 1986, s. 12).

Kuvassa 20 olevien merkintöjen selitykset:

α_1 = taivutuskulma ennen takaisinjousto

α_2 = taivutuskulma takaisinjouston jälkeen

φ_1 = kaarikulma ennen takaisinjousto

φ_2 = kaarikulma takaisinjouston jälkeen

r_{s1} = sisätaivutussäde ennen takaisinjousto

r_{s2} = sisätaivutussäde takaisinjouston jälkeen

β = takaisinjoustokulma

3.2 Laitteistot ja työkalut

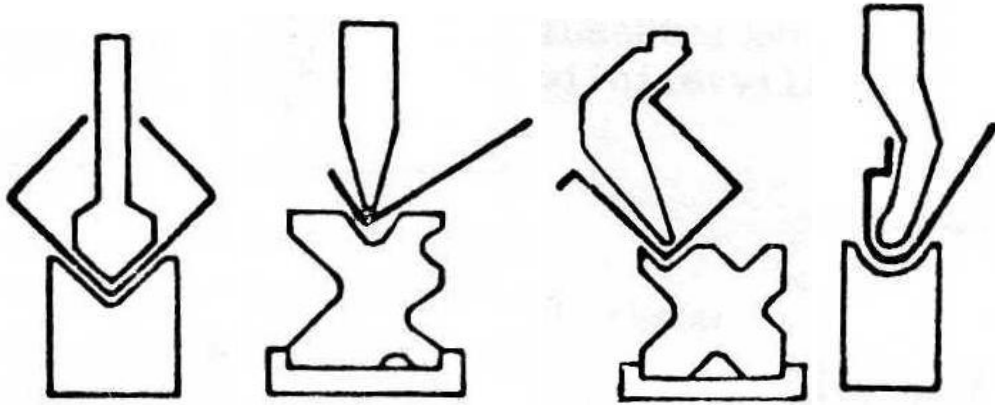
Suurin osa taivutustöistä suoritetaan särmäyspuristimilla, mutta myös erilaisten taivutuskoneiden ja taivutusautomaattien käyttö on varsin yleistä. Tässä työssä laitteistoista käsitellään särmäyspuristimet, sekä taivutusautomaatit. Työkalujen

osalta käsitellään pääasiassa kaikkein yleisimpiä taivutuksessa käytettäviä työkaluja, jotka on tarkoitettu nimenomaan suorien taivutusten tekemiseen. Työkalujen esittely on toteutettu lähinnä havainnollistavan esimerkkikuvan avulla.

3.2.1 Särmäyspuristimet

Särmäyspuristimella taivutettaessa levyaiho sijoitetaan työkalujen väliin, minkä jälkeen painin suorittaa taivutuksen vastinta vasten ja palaa takaisin. Työkappaleen asemointi tapahtuu yleensä numeerisesti ohjattujen takavasteiden avulla, jotka paikoittuvat automaattisesti ohjelmoidun työkierron mukaisesti. Särmäyspuristimen käyttömekanismi voi olla hydraulinen, mekaaninen, sähkömekaaninen tai hydraulimekaaninen. Tällä hetkellä yleisimmin käytettyjä särmäyspuristimia ovat hydraulitoimiset mallit, mutta sähkömekaaninen käyttömekanismi on yleistymässä viimeaikaisten kehitysaskelien seurauksena. (Ihalainen et al. 2003, s. 270 – 271.)

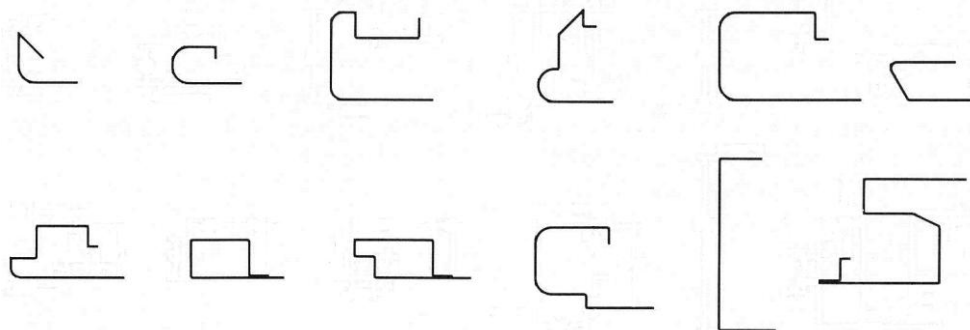
Toiminnalliselta rakenteeltaan särmäyspuristimet voivat olla joko ylä- tai alatoimisia. Nimitys riippuu siitä, suorittaako työiskun ylä- vai alapalkki. Molemmilla toimintaperiaatteilla on etunsa ja esimerkiksi alatoimisen särmäyspuristimen vahvuuksina voidaan pitää yksinkertaista hydrauliiikkaa, sekä työpöydän painon hyväksikäyttömahdollisuutta paluuliikkeen aikana. Alatoimisen pääasiallisena heikkoutena voidaan pitää työkappaleen liikkumista työpöydän mukana, jolloin työkappaleen paikoillaan pitäminen voi muodostua ongelmaksi. Lisäksi alatoimista särmäyspuristinta käytettäessä voi esiintyä ergonomiaongelmia, jotka ilmenevät hankalina työasentoina. Ylätoimisen puristimen pääasiallisina etuina voidaankin pitää parempia ominaisuuksia juuri työkappaleen kiinnityksen ja työergonomian suhteen. Kuvassa 21 on esitelty erilaisia särmäyspuristinten työkaluja. (Ihalainen et al. 2003, s. 270 – 271.)



Kuva 21. Erilaisia särmäyspuristimen työkaluja. Äärimmäisenä vasemmalla olevan työkalun tapauksessa tulee huomioida taivutetun kappaleen poistaminen sivusta vetämällä (Haikonen 1979, s. 27).

3.2.2 Taivutusautomaatit

Taivutusautomaattien kannattavuus tulee esille sellaisten työkappaleiden tapauksissa, joissa on useita taivutuksia useammalla sivulla. Taivutusautomaatti kykenee taivuttamaan levyä niin ylös- kuin alaspäinkin. Ainoana rajoittavana tekijänä taivutettavan työkappaleen suhteen voidaan pitää reunakorkeuksien suuruutta, mitä rajoittaa taivutusautomaatin kita ja sen dimensiot. Muutoin taivutettavien kappaleiden koko voi olla suurikin, sillä työkappale makaa koneen pöydällä ja vain taivutettavat reunat liikkuvat. Taivutusautomaatin merkittävimpiä etuina voidaan pitää joustavuutta, sekä kykyä taivuttaa hyvinkin monimutkaisia kappaleita. Automaatin edut tulevat kuitenkin esille vasta kun sen tarjoamat mahdollisuudet otetaan huomioon jo tuotetta suunniteltaessa. Kuvassa 22 on esitely taivutusautomaatilla taivutettavia muotoja ja levyn reunaprofiileja. (Karppinen 1986, s. 37-38).



Kuva 22. Taivutusautomaatilla taivutettavia muotoja (Karppinen 1986, s. 37).

3.3 Taivutuksen suunnittelu

Taivutuksen suunnittelussa on leikkauksen tavoin omat tietyt lainalaisuutensa, jotka pitää hallita onnistuneeseen lopputulokseen pääsemiseksi. Seuraavissa kappaleissa on käsitelty tärkeimpiä suunnitteluun vaikuttavia asioita ja näkökohtia. Näitä ovat taivutussäde, takaisinjousto, oikaistupituus, k-kerroin, taivutuksen tarkkuus, taivutuksen dimensiot sekä taivutuksen lähellä olevat muodot. Loppuun on koottu lisäksi erilaisten reuna- ja nurkkamuotojen taivutukseen liittyviä kuvia. (Haikonen 1979, s. 29-31.)

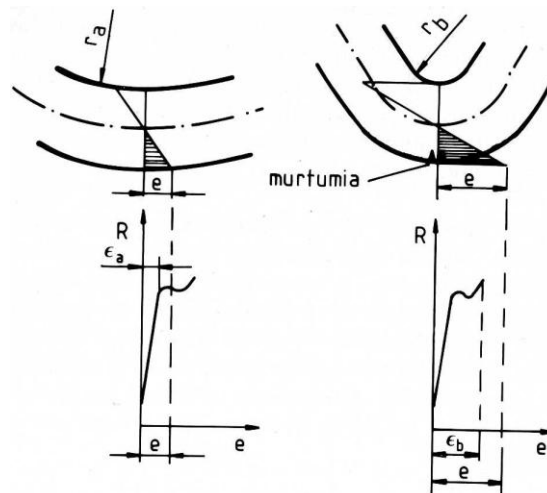
3.3.1 Taivutussäde

Ohutlevytuotetta valmistettaessa on otettava huomioon sen pienin käyttökelpoinen taivutussäde. Se määräytyy tuotteen materiaalin, valmistustavan ja tuotteelta vaadittavien ominaisuuksien mukaan. Käytännössä taivutussäteen on oltava sellainen, ettei levyn ulkopinnan venymä muodostu liian suureksi. Toisin sanottuna ulkopinnan venymä ei saa olla niin suuri, että materiaalin murtoraja tässä kohtaa ylittyy ja kappale murtuu. Näin ollen mitä pienempi taivutuskulma on, sitä suurempi on murtumisen riski. Yleisesti ottaen ulkopuolisen taivutussäteen r voidaan sanoa noudattavan yhtälöä:

$$r = 1,25 \cdot r_s + s \quad (1)$$

jossa r_s = sisäsäde ja s = levynpaksuus. (Karppinen 1986, s. 12.)

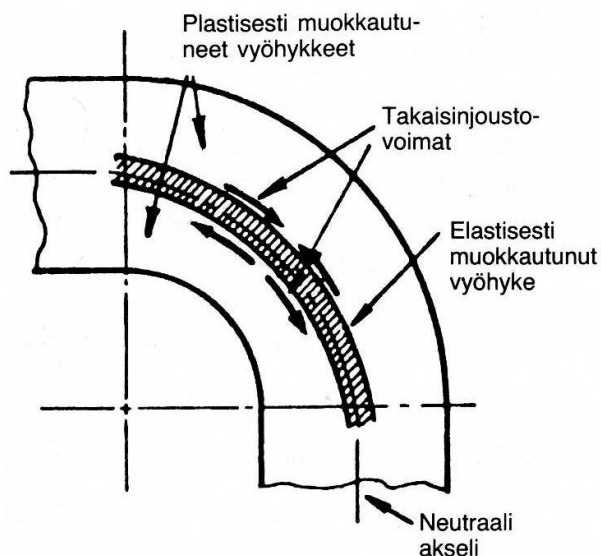
Taivutussäde voi vastaavasti olla myös liian pieni. Tällöin kappaleen ulkopinnan venymä ei ylitä materiaalin kimmorajaa vastaavaa venymää. Näin ollen levyssä ei tapahdu pysyviä muodonmuutoksia, vaan levy joustaa takaisin alkuperäiseen muotoonsa välittömästi kun taivuttava voima poistuu. Pysyvä muodonmuutos syntyy siis vasta silloin, kun kappaleen ulkopinnan venymä ylittää kimmorajaa vastaavan venymän. Kuvassa 23 on esitetty saman kappaleen taivutusta pienellä ja suurella taivutussäteellä. (Karppinen 1986, s. 12-13.)



Kuva 23. Aineen suhteellinen venymä (ϵ_a) taipeen poikkileikkauksen eri kohdissa (viivoitetut kolmiot), sekä jännitys-venymä –käyrät. Vasemmalla suuri taivutussäde ja oikealla pieni taivutussäde (Karppinen 1986, s. 13).

3.3.2 Takaisinjousto

Kuten edellisissä kappaleissa on kuvattu, syntyy levyyn sitä taivutettaessa puristus- ja vetojännitysvyöhykkeet. Näiden vyöhykkeiden välissä olevan neutraaliakselin kohdalle muodostuu kapea vyöhyke, jossa tapahtuu taivutettaessa vain elastisia muodonmuutoksia. Tämä ilmiö aiheuttaa sen, että ulkoisen taivuttavan voiman poistuessa, pyrkii kappale palautumaan alkuperäiseen muotoonsa, ja tapahtuu niin kutsuttua takaisinjoustoja. Takaisinjouston syntyminen on esitetty kuvassa 24. (Karppinen 1986, s. 14.)



Kuva 24. Takaisinjouston syntyminen (Karppinen 1986, s. 14).

Takaisinjousto aiheuttaa ongelmia haluttujen taivutuskulmien ja tarkkuuksien saavuttamisessa. Sitä esiintyy vapaassa taivutuksessa menetelmästä riippumatta, jolloin sen vaikutus on otettava huomioon kaikissa tilanteissa. Vapaassa taivutuksessa takaisinjouston kompensointi voidaan suorittaa helposti vain painimen iskuä pidentämällä eli käytännössä ylitaivuttamalla kappaletta. Menetelmissä joissa työkalujen rakenne ja muoto riippuu taivutettavasta kulmasta, on takaisinjouston huomioiminen vaikeampaa. Esimerkiksi pohjaan isku taivutusta suoritettaessa on tärkeää voida määrittää takaisinjousto etukäteen. Tällöin on apua erilaisista valmiista ohjeista ja taulukoista (taulukko 2), joissa takaisinjouston suuruus on ilmoitettu eri materiaaleilla ja levynpaksuuksilla. Hyvänä nyrkkisääntönä voidaan lisäksi todeta, että takaisinjousto kasvaa levyn ohentuessa ja myötörajan noustessa. (Karppinen, 1986, s. 14.)

Taulukko 2. Takaisinjoustokulmia 90°:n taivutuksessa eri materiaaleilla (Karppinen 1986, s. 14).

		Takaisinjoustokulma β		
Levyn paksuus mm	Taivutus säde r_s mm	Pehmeä teräs Pehmeä messinki Alumiini	Keskikova teräs Kova messinki	Kova teräs
0,8-2	t	2	3-2	5-3
	t-5-t	4-3	5-3	7-5
	5-t	5-4	7-5	9-7
2-5	t	1-0	2-0	3-2
	t-5-t	2-1	3-1	5-3
	5-t	4-2	5-3	7-5
5	t	0	0	2
	t-5-t	1	1	3
	5-t	2	2	4

3.3.3 Oikaistupituus

Ennen taivutuksen suorittamista, pitää levytuotteelle määrittää niin kutsuttu oikaistupituus. Suurien taivutussäteiden ($r > 50 \cdot s$) tapauksessa neutraaliakseli on taivutetun levyn keskellä, jolloin pituus taivutettuna vastaa oikaistua pituutta. Näin ei kuitenkaan ole pienillä taivutuskulmilla, vaan taivutuskohdassa levyn sisäpinta puristuu kokoon vähemmän kuin ulkopinta venyy. Näin ollen neutraaliakselin siirtyessä levy pitenee. Oikaistu pituus voidaan laskea kaavasta:

$$L = a + b - v \quad (2)$$

jossa a ja b ovat laippojen pituudet. (Karppinen, 1986, s. 14-15.) Tekijä v vaihtelee taivutussäteen sekä levynpaksuuden mukaan, ja voidaan määrittää seuraavilla laskutoimituksilla:

Kulman ollessa: $0^\circ < \alpha \leq 90^\circ$:

$$v = \pi \cdot \left(\frac{180^\circ - \alpha}{180^\circ} \right) \cdot \left(r + \frac{s}{2} \cdot k \right) - 2(r + s) \quad (3)$$

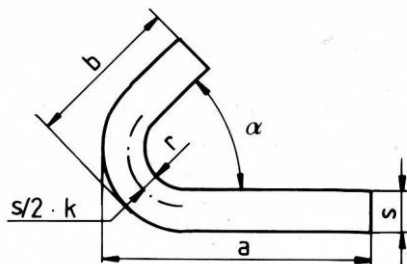
$90^\circ < \alpha \leq 165^\circ$:

$$v = \pi \cdot \left(\frac{180^\circ - \alpha}{180^\circ} \right) \cdot \left(r + \frac{s}{2} \cdot k \right) - 2(r + s) \cdot \tan \frac{180^\circ - \alpha}{2} \quad (4)$$

$165^\circ < \alpha \leq 180^\circ$: $v = 0$.

Kaavoissa s = levynpaksuus, r = taivutussäde. (Karppinen 1986, s. 15.) Kertoimen k merkityksestä ja valinnasta on kerrottu kappaleessa 3.3.4.

Yleisimmille, esimerkiksi 90° :n taivutuskulmille on olemassa valmiita taulukoita, joissa v :n arvot on listattu eri levynpaksuuksilla ja taivutussäteillä. Kuvassa 25 on havainnollistettu oikaistunpituuden laskennassa tarvittavien parametrien merkintöjä. Kuvassa 26 on puolestaan esimerkki v -tekijän määrittämiseen tarkoitetusta taulukosta. (Karppinen 1986, s. 15.)



Kuva 25. Oikaistunpituuden laskennassa tarvittavien parametrien merkinnät (Karppinen 1986, s. 15).

Levyn paksuus s (mm)	Taivutussäde r _s (mm)							
	1,0	1,25	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0
1,0	1,9	2,0	2,0	2,2	2,4	2,6	3,0	3,4
1,25		2,4	2,5	2,6	2,8	3,0	3,3	3,7
1,5			2,8	3,0	3,2	3,3	3,7	4,1
2,0				3,8	4,0	4,1	4,5	4,8
2,5					4,8	4,9	5,2	5,6
3,0						5,8	6,0	6,4

Kuva 26. Oikaistun pituuden v-tekijän arvot 90°:n taivutuskulmalle vapaataivutuksessa (Karppinen 1986, s. 15).

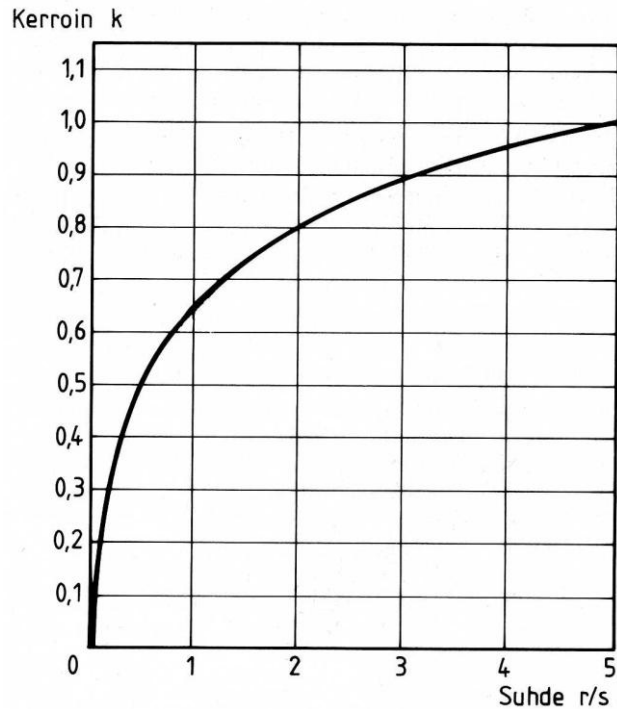
3.3.4 K-kerroin

Oikaistunpituuden laskennassa tarvittava k-kerroin voidaan määrittää likimääräisesti esimerkiksi kuvan 27 kaltaisesta käyrästä, jolloin se määräytyy taivutussäteen ja levynpaksuuden suhteen perusteella. Toisin ilmaistuna k-kerroin saadaan standardin DIN 6935 mukaan seuraavasti:

Kun $r/s > 5$, $k = 1$. Kun taas $r/s \leq 5$:

$$k = 0,65 + 0,5 \cdot \log_{10}(r/s) \quad (5)$$

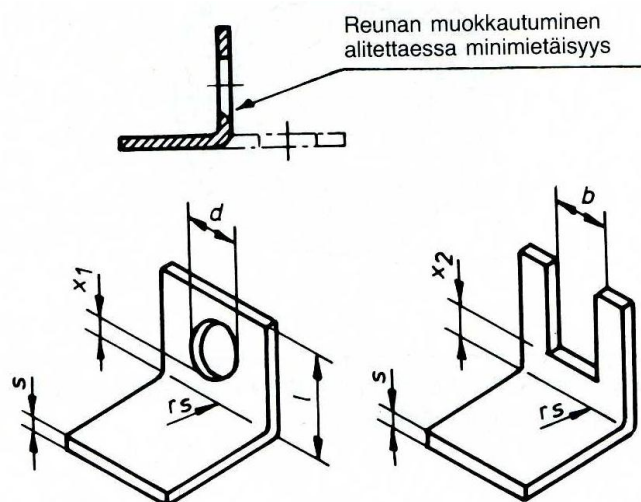
Vaikka edellä esitetyn k-kertoimen määrittämistavan mukaan voidaan oikaistunpituus määrittää likimääräisesti, tulee suurten sarjojen kysymyksessä, tai muuten haluttaessa tarkkaa arvoa, suorittaa taivutuskoe tarkan oikaistunpituuden määrittämiseksi. (Karppinen 1986, s. 15.)



Kuva 27. K-kertoimen määrittäminen suhteen r/s avulla (Karppinen 1986, s. 15).

3.3.5 Taivutuksen lähellä olevat muodot

Kun taivutuksen lähelle halutaan suunnitella esimerkiksi reikä tai loveus, tulee huomioida tarkkaan reiän tai loveuden pienin sallittu etäisyys taivutukseen. Pienintä etäisyyttä ei saa alittaa, mikäli reiän tai loveuden muoto halutaan säilyttää. Kuvassa 28 on esitetty reiän ja loveuksen minimietäisyydet taivutuksesta. (Karppinen 1986, s. 42.)



Kuva 28. Reiän tai loveuden minimietäisyys taivutuskohdasta (Karppinen 1986, s. 42).

Minimietäisyys x_1 tai x_2 on riippuvainen pyöreän reiän halkaisijasta d , loveuksen leveydestä b , taivutussäteestä r_s , sekä levynpaksuudesta s . Minimietäisyyden määrittämistä varten ovat voimassa seuraavat yhtälöt:

Pyöreät reiät:

$$x_1 = \sqrt{d \cdot s} + 0,8 \cdot r_s \sqrt{\frac{1}{d}} \quad [\text{mm}] \quad (6)$$

Kaavassa x_1 = minimietäisyys, d = reiän halkaisija, s = levynpaksuus, r_s = sisäpuolinen taivutussäde.

Loveukset tai nelikulmaiset reiät:

$$x_2 = 1,1\sqrt{b \cdot s} + 0,8 \cdot r_s \sqrt{\frac{1}{b}} \quad [\text{mm}] \quad (7)$$

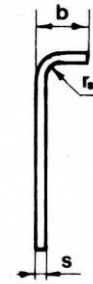
Kaavassa x_2 = minimietäisyys, b = loveuksen leveys, s = levynpaksuus, r_s = sisäpuolinen taivutussäde.

Kaavat pätevät, kun $s = 0,4 - 2,5$ mm ja d ja $b = 1,7 - 7$ mm. (Karppinen 1986, s. 43.)

3.3.6 Taivutuksen dimensiot

Suunniteltaessa levyjen koneellisia taivutuksia, tulee muistaa laippakorkeuksien vaikutukset tuotteen taivutettavuuteen. Käytännössä levyille on olemassa pienin mahdollinen laippakorkeus, jonka likiarvo on $b = r_s + 2s$, missä r_s on sisäpuolinen taivutussäde ja s on levynpaksuus. Kuvan 29 taulukossa on lisäksi esitetty pienimpien suositeltavien laippakorkeuksien arvoja teräsohutlevyille, materiaalipaksuuteen 3 mm asti. Jos tarvitaan pienempää laippakorkeutta, kuin on mahdollista taivuttaa, on ainoa vaihtoehto laipan lyhentäminen sopivaksi taivutuksen jälkeen. (Karppinen 1986, s. 43.)

Levyn paksuus s (mm)	Laippakorkeus b min (mm)	suositeltava (mm)
0,5	1,5	2,8
0,75	2,3	4,7
1,0	3,0	5,6
1,25	3,8	6,8
1,5	4,5	9,4
2,0	6,0	10,6
2,5	7,5	14,0
3,0	9,0	17,0

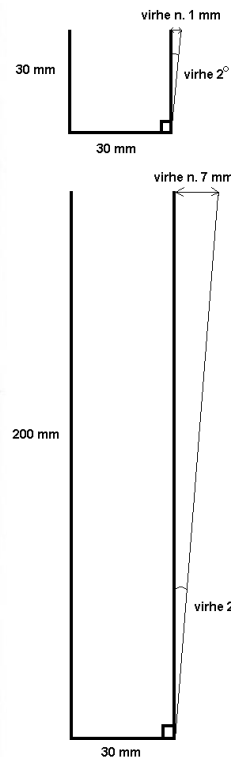


Kuva 29. Teräsohutlevyjen laippakorkeuksia, kun $r_s = s$ (Karppinen 1986, s. 43).

3.3.7 Taivutuksen tarkkuus

Vapaata taivutusta soveltamalla ei päästä yleensä kovinkaan hyvään mittatarkkuuteen, varsinkaan jos tehdään samaan levyyn useampia taivutuksia peräkkäin. Taivutuksessa saavutettava mittatarkkuus riippuu paitsi itse koneesta ja työkaluista, myös levyaineen homogeenisuudesta, aihion paikoittamisesta ja kiinnityksestä, sekä koko tuotantolaitteiston kunnosta. Oheisessa kuvassa (kuva 30) on esitetty toleranssit, jotka saavutetaan normaalimenetelmin taivutettaessa. (Haikonen 1979, s. 29.)

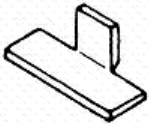
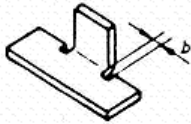
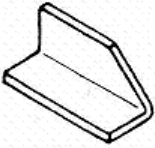
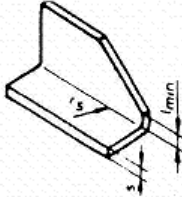
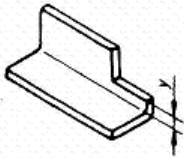
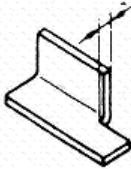
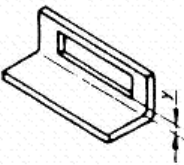
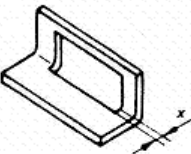
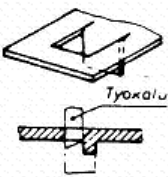
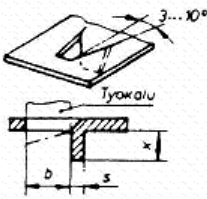
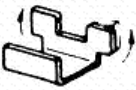
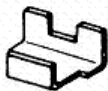
Minimitaivutussäde lujuus (N/mm ²)	toleranssit
...400	+ 0,5 (mm)
400...500	+ 0,8 (mm)
500...650	+ 1,0 (mm)
Kulmatoleranssit lyhyempi kylkipituus (mm)	toleranssit
- 30	± 2°
30...50	± 1°45'
50...80	± 1°30'
80...120	± 1°15'
yli 120	± 1°
Muut mitat nimell.mitta (mm)	toleranssit
alle 10	± 0,4 (mm)
10...50	± 0,5 (mm)
50...180	± 0,7 (mm)
180...500	± 0,9 (mm)
500...1250	± 1,2 (mm)
1250...2500	± 1,5 (mm)
2500...4000	± 2 (mm)
4000...6300	± 2,5 (mm)
6300...10000	± 3 (mm)









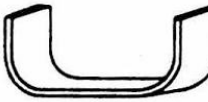
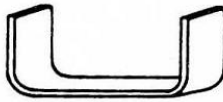

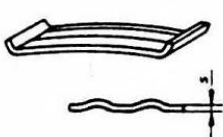

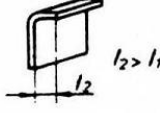

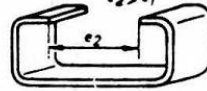
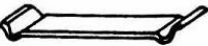
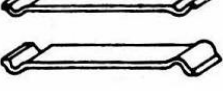
Kuva 30. Tavallisilla menetelmillä taivutettaessa saavutettavat toleranssit. Oikealla on havainnollistettu kulmatoleranssien virhettä käytännössä (Haikonen 1979, s. 29).

3.3.8 Reuna- ja nurkkamuotojen suunnitteluohjeita taivutuksessa

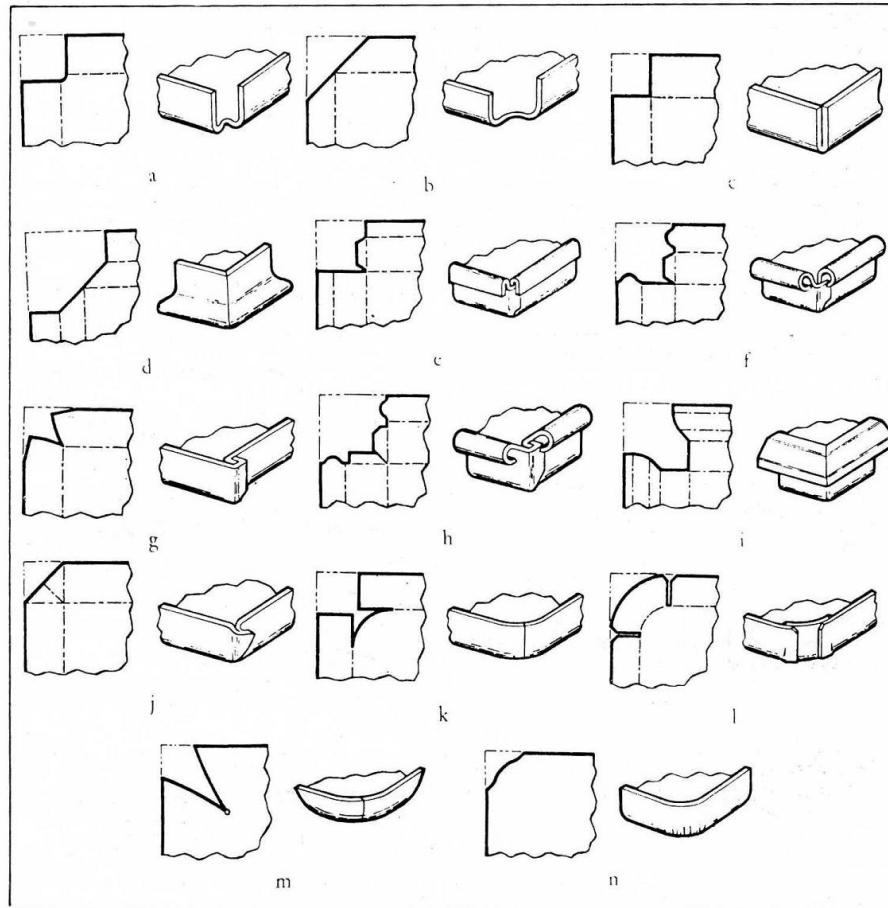
Seuraavissa kuvissa (kuvat 31, 32 ja 33) on esitetty erilaisia reuna- ja nurkkamuotojen yleisiä suunnitteluohjeita. Kuvissa esiintyvät tapaukset toimivat myös esimerkkeinä edellä mainittuihin taivutusten suunnitteluun vaikuttaviin osaluokiin liittyen. Ohjeet on otettu Karppisen laatimasta ohutlevyjen taivutusta käsittelevästä teknisestä tiedotuksesta numero 23/86.

Epäedullinen	Edullinen	
		Taivutuslinja ei saa noudattaa reunan kulkua. Muutoin estetään tyssäntyminen ja venyminen taivutusvyöhykkeessä ja aiheutetaan murtuma. $b = 1,5 s$
		Vinoja taivutettavia reunoja on vältettävä. Reunaan tulee lisätä minimilaippakorkeus. $l_{min} = 2 s + r_s$
		Matalan taivutusreunan välttämiseksi on suositeltavaa asettaa taive toiselle reunalle. $x_{min} = 1,5 s + r_s$
		Matalan taivutusreunan välttämiseksi tulee taivutuskohdan kulkea reiän läpi. $x_{min} = 1,5 s + r_s$
		Leikattava kieleke tulee mitoittaa kartiokkaaksi, jotta työkalussa olisi helpompi poistaa kappale. Kielekkeen pituus tulee mitoittaa siten, että painimen mitta $b_{min} = 3 s$
		Taivutusreunan leveyden ylittäviä muotoja on vältettävä.

Kuva 31. Suunnittelusääntöjä taivutuksissa (Karppinen 1986, s. 43).

	Epäedullinen	Edullinen
Taivutussäteitä ei ole syytä vaatia tarkoiksi, sillä useimmissa tapauksissa toiminnalliset vaatimukset täyttää myös likimääräiseksi määritetty pyöristys. Tällöin voidaan käyttää vapaata taivutusta ja välttää pohjaaniskutaivutuksen vaatimat erikoistyökalut ja suuret taivutusvoimat.		
Liian terävien kulmien vaatiminen aiheuttaa murtumisvaaran. Kuvan A mukainen terävä kulma on mahdollista taivuttaa vain pohjaaniskutyökalulla.		
Kun levyn kyljet 180°:n taivutuksessa painetaan yhteen, olisi syytä jättää taive jonkin verran avoimeksi, jolloin taivutussäde on suurempi ja murtumisvaara jää pienemmäksi.		
Liian suuret taivutussäteet suurentavat takaisinjoustoja.		
Suurille taivutussäteille taivutettavat ohutlevyt olisi syytä jäykistää vaotuksin.		
Taivutusreunan leveys l on valittava riittävän suureksi (minimilaippakorkeus).		
Kotelomaisissa rakenteissa on väli e pyrittävä saamaan riittävän suureksi, jotta välttyttäisiin erikoistyökalujen käytöltä.		
Molempien reunojen profiilit on pyrittävä suunnittelemaan samanlaisiksi, jotta työ voitaisiin suorittaa samoilla työkaluilla.		

Kuva 32. Suunnittelusääntöjä taivutuksissa (Karppinen 1986, s. 45).



Kuva 33. Erialaisten nurkkien taivutusperiaatteita (Karppinen 1986, s. 44).

4 YHTEENVETO

Ohutlevytuotteiden valmistusvaiheen huomioiminen jo suunnitteluvaiheessa on nykyisin yhä tärkeämpää ja tärkeämpää. Nykypäivän teollisuudessa on hyvin tyypillistä, että eri alojen tuotteiden suunnittelu- ja valmistusvaiheet on eriytetty toisistaan täysin. Tällöin on erityisen tärkeää panostaa valmistusvaiheen huomioon ottamiseen alusta lähtien, jolloin mahdollistetaan mahdollisimman tehokas ja taloudellinen tuotanto. Tämä edellyttää suunnittelijalta eri menetelmien mahdollisuuksien ja rajoitusten huomioon ottamista jo suunnitteluvaiheessa, mikä puolestaan edellyttää suunnittelijalta tietyn asteista tietämystä valmistusvaiheen eri menetelmistä ja niihin liittyvistä tekniikoista.

Tässä työssä pyrittiin tarjoamaan yleisluontoinen selvitys tietyn tyyppisten ohutlevytuotteiden valmistukseen liittyvien menetelmien teoriasta, ja niihin

liittyvistä suunnitteluperusteista ja näkökohdista. Työssä käsitellyt ohutlevyjen valmistusmenetelmät jaettiin karkeasti leikkaus- ja lävistysmenetelmiin, sekä taivutus- ja särmäysmenetelmiin. Myös suunnitteluun liittyvät erityishuomiot ja ohjeet oli jaettu näiden otsikoiden alle. Leikkausta ja sen suunnittelua lähestyttiin yleisimpien ja käytetyimpien menetelmien näkökulmasta, mikä rajoitti käsittelyn myös leikattavien muotojen osalta yleisimpiin ja yksinkertaisimpiin 2D-muotoihin. Tällöin merkittävimiksi suunnitteluun vaikuttaviksi tekijöiksi muodostuivat mahdollisuudet leikattavien muotojen ja materiaalien suhteen, nurkan loveusten toteutus, leikkauksen tarkkuus sekä jätteaineiden määrän hallinta. Nämä asiat ja niihin liittyvät tarkemmat suunnittelukysymykset on esitetty liitteen 1 tarkistuslistan ensimmäisessä osiossa.

Taivutukseen ja särmäykseen liittyviä peruseriaatteita ja suunnittelunäkökohtia lähestyttiin lähinnä särmäyspuristimien ja taivutusautomaattien näkökulmasta. Tällöin keskityttiin suorien särmien taivutuksiin, ja esimerkiksi erilaiset muovausmenetelmät jätettiin kokonaan työn ulkopuolelle. Näin ollen suunnitteluvaiheen huomioon ottaminenkin keskittyi hyvin perustavaa laatua oleviin suunnittelunäkökohtiin, ja käsiteltäviksi asioiksi muodostuivat taivutussäde, takaisinjousto, oikaistupituus ja siihen liittyvä k-kerroin, taivutuksen tarkkuus, sekä erilaiset taivutuksen geometriaan liittyvät säännöt ja rajoitukset. Myös näiden asioiden taustalla olevat tarkemmat suunnittelunäkökohdat ja kysymykset on esitetty lopun liitteessä 1, sen toisessa osiossa.

Liitteen 1 tarkistuslistan viimeisessä osiossa on poimittu suunnitteluvaiheessa huomioon otettavia yleisiä asioita, jotka liittyvät lähinnä tuotteen rakenteen yksinkertaistamiseen ja tätä kautta niin valmistusvaiheen kuin kokoonpanovaiheenkin helpottamiseen. Tarkistuslistaa on tarkoitus käyttää suunnittelun tukena, jolloin sen avulla voidaan tarkastaa tuotteen valmistusystävällisyys ja kokoonpanoystävällisyys tässä työssä käsiteltyjen menetelmien ja näkökohtien osalta. Tarkistuslistaan poimitut kysymykset toimivat myös eräänlaisina työn johtopäätöksinä, sillä nimenomaan niissä mainitut asiat ovat ohutlevytuotteiden onnistuneen valmistusystävällisen suunnittelun kannalta niitä kaikkein tärkeimpiä.

LÄHTEET

Aaltonen, K. & Andersson, P. & Kauppinen, V., 1997. Levytyö- ja työvälinetekniikat. 1.painos. Porvoo, WSOY. 264s.

Haikonen, E., 1979. Ohutlevyrakenteiden suunnittelu yksittäisvalmistuksessa ja piensarjatuotannossa. MET, Tekninen tiedotus 18/1979. 59s.

Honka, I., 1980. Meistettävien kappaleiden suunnittelun yleisohjeita. MET, Tekninen tiedotus 23/1980. 39s.

Ihalainen, E. & Aaltonen, K. & Aromäki, M. & Sihvonen, P., 2003. Valmistustekniikka. 10. painos. Helsinki, Hakapaino Oy. 478s.

Kalpakjian, S., Schmid, S., 2006. Manufacturing Engineering and Technology. 5th edition. Upper Saddle River, USA. Pearson Education Inc. 1295s. ISBN 0-13-148965-8

Karppinen, A., 1986. Ohutlevyjien taivutus. MET, Tekninen tiedotus 23/1986. 48s.

Kuo, T-C., Huang, S., Zhang, H-C., 2001. Desing for Manufacture and Desing for 'X': concepts, applications and perspectives. Computers & Industrial Engineering 41, issue 3, sivut 241-260. ISSN 0360-8352

Merikoski, J., 1985. Jäteainekustannusten pienentäminen ohutlevytöissä. MET, Tekninen tiedotus 7/1985. 37s.

Niemi, J. & Aromäki, M., 1985. Teräslevyjien terminen leikkaus. MET, Tekninen tiedotus 9/1985. 85s.

Silfvast, W., 2004, Laser Fundamentals. Cambridge University Press. 2 painos. 666s.

Standard DIN 6935: Cold bending of flat rolled steel products. Deutsches Institut Für Normung E.V. (German National Standard), 1975. 4s.

Steen, W., 2003, Laser Material Processing. Springer-Verlag London Limited, 3.painos. 408s.

Timings, R. L., Wilkinson, S. P., 2000. Manufacturing Technology – volume 2. 2nd edition. Essex, England. Pearson Education Limited. 414s. ISBN 0-582-357977

Töyrä, I. & Vaurio, M. & Tajonlahti, J., 1988. Levytyökeskusten rakenne, käyttö ja ohjelmointi. MET, Tekninen tiedotus 9/1988. 46s.

Ohutlevytuotteiden valmistusystävällisen suunnittelun tarkistuslista.**LEIKKAUS JA LÄVISTYS**

Leikattavat muodot	OK?
<ul style="list-style-type: none"> - Onko osa mahdollisimman yksinkertainen? - Onko hyödynnetty standardisoituja muotoja? - Onko mahdollista käyttää samoja esim. reikäkokoja ja pyöristyssäteitä useammassa kohdassa? - Onko suunnitellut muodot mahdollista valmistaa suunnitellulla menetelmällä? 	
Materiaali ja materiaalipaksuudet	OK?
<ul style="list-style-type: none"> - Onko mahdollista säästää halventamalla lähtömateriaalia? - Onko mahdollista ohentaa levynpaksuutta ja tarvittaessa jäykistää rakennetta oikealla muotoilulla tai levyyn tehtävillä jäykisteillä? - Onko valittua materiaalia/materiaalipaksuutta mahdollista työstää valitulla menetelmällä? 	
Nurkan loveukset	OK?
<ul style="list-style-type: none"> - Onko taivutuksen vaatimat loveukset toteutettu oikein ja mahdollisimman yksinkertaiseksi? 	
Leikkauksen tarkkuus	OK?
<ul style="list-style-type: none"> - Onko rakenne "sopivan" tarkka? - Onko mahdollista säästää pienentämällä tarkkuusvaatimuksia? - Onko valittuun tarkkuuteen mahdollista päästä valitulla valmistusmenetelmällä? 	

Jäteaineet	OK?
<ul style="list-style-type: none"> - Onko osien sovittelu levyille toteutettu levyjätteen määrä minimoiden? - Onko mahdollisesti syntyvä levyjäte mahdollista käyttää saman tuotteen jonkin muun osan lähtöaihioksi? - Onko levyjätteen määrää mahdollista vähentää sopivamman levykoon valinnalla tai tarkemmalla ohjelmoinnilla? - Onko ylijäävä levymateriaali mahdollista käyttää rakenteen jäykistämiseksi esimerkiksi särmäämällä levyn reunat? 	

TAIVUTUS JA SÄRMÄYS

Taivutussäde	OK?
<ul style="list-style-type: none"> - Onko taivutussäde sopiva tuotteelta vaadittavien ominaisuuksien perusteella? - Onko taivutussädettä mietittäessä otettu huomioon materiaali ja valmistusmenetelmä? 	
Takaisinjousto	OK?
<ul style="list-style-type: none"> - Onko takaisinjouston vaikutus otettu huomioon? 	
Oikaistupitus	OK?
<ul style="list-style-type: none"> - Onko oikaistupitus otettu huomioon ja laskettu oikein? 	
K-kerroin	OK?
<ul style="list-style-type: none"> - Onko k-kerroin valittu oikein materiaalin, levynpaksuuden ja taivutussäteen mukaan? 	

Taivutuksen lähellä olevat muodot	OK?
- Onko taivutuksen läheisyyteen suunnitellut reiät ja loveukset sijoitettu riittävän kauas taivutussärmästä?	
Taivutuksen dimensiot	OK?
- Onko taivutuksen laippakorkeus riittävän suuri?	
Taivutuksen tarkkuus	OK?
- Onko taivutuksen tarkkuus suunniteltu sopivaksi? - Onko suunniteltu tarkkuus mahdollista saavuttaa suunnitellulla valmistusmenetelmällä?	
Reuna- ja nurkkamuotojen taivutus	OK?
- Onko reunojen ja nurkkien taivutusten suunnittelussa otettu huomioon valmistusystävälliset toimintaperiaatteet? - Onko taivutusjärjestys suunniteltu oikeaksi/mahdolliseksi?	

MUUTA

Onko sovellettu:	OK?
- Standardiosia, helposti hankittavia osto-osia tai aikaisemmin suunniteltuja osia ja puolivalmisteita?	

Onko mahdollista:	OK?
<ul style="list-style-type: none">- Yksinkertaistaa koko rakennetta?- Yhdistää useampia osia yhdeksi?	
Voidaanko, osataanko:	OK?
<ul style="list-style-type: none">- Lukea mitoitus oikein eri valmistusvaiheissa ja esiintyvätkö piirustuksessa kaikki tarvittavat mitat?- Kiinnittää kappale eri valmistusvaiheissa ja riittääkö sen jäykkyys estämään muodonmuutokset?- Mitata ja suorittaa laaduntarkkailua?- Kuljettaa, pinota jne. kappaleita?- Moduloida tuotetta?	
Onko kokoonpanovaihe:	OK?
<ul style="list-style-type: none">- Yksinkertainen suorittaa ja mahdollista jakaa esimerkiksi osakokoonpanoihin?- Mahdollista suorittaa ilman sovitus- ja viimeistelytyötä?	

Erialaisten leikkausmenetelmien vertailua.

	Mekaaninen leikkaus	Polttoleikkaus	Laserleikkaus	Plasmaleikkaus	Vesisuihkuleikkaus
Leikattavat materiaalit	Ei rajoituksia	Rautametallit + titaani ja vanadiini	Materiaalit joilla on riittävä säteen absorptiokyky	Kaikki sähköä johtavat materiaalit	Ei rajoituksia
Leikattavat materiaalipaksuudet (metallit)	0,1 - 12 mm	3 – 1500 mm	0,1 – 40 mm	0,5 – 50 mm	0,1 – 100 mm
Leikkausnopeus (materiaalipaksuus 3 mm)	n. 3500 mm/min	n. 800 mm/min	n. 5000 mm/min	n. 6000 mm/min	n. 1000 mm/min (abradiileikkaus)
Leikkatun kappaleen mittavirheet (numeerisesti ohjatut koneet)	± 0,2 mm	± 0,6 mm	± 0,2 mm	± 0,4 mm	± 0,2 mm
Leikkaurailon leveys	Riippuu pistimen halkaisijasta	n. 3 - 6 mm	n. 0,2 – 1 mm	n. 0,5 - 6 mm	n. 0,1 – 0,9 mm
Kustannukset	Alhaiset hankinta- ja käyttökustannukset	Alhaiset hankinta- ja käyttökustannukset	Leikkurilaitteisto erittäin kallis, käyttökustannukset alhaiset	Halpa laitteisto, mutta kalliit käyttökustannukset	Melko kallis laitteisto, mutta säästöjä viimeistelyn vähentyessä
Erityishuomiot	Leikkausnopeudet ja materiaalipaksuudet riippuvat suuresti laitteistosta ja työkaluista	Suuret lämpövaikutukset heikentävät leikkauksen tarkkuutta	Tiettyjä rajoituksia esimerkiksi alumiinin ja kuparin leikkauksessa	Leikkurailon leveys riippuu suuresti työstettävän levyn paksuudesta	Ei aiheuta lainkaan lämmöntuonnista johtuvia muodonmuutoksia

