

Opinnäytetyö (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

Insinööri (AMK)

2018

Mikko Kiviluoto

SÄRMÄYKSEN TEHOSTAMINEN SUUNNITTELU HUOMIOIDEN

– teknisten epäkohtien havaitseminen



Mikko Kiviluoto

SÄRMÄYKSEN TEHOSTAMINEN SUUNNITTELU HUOMIOIDEN

- teknisten epäkohtien havaitseminen

Opinnäytetyössä selvitetään ohutlevytuotteiden särmäyksen tehostamista suunnittelu huomioiden. Työssä tarkastellaan tietokoneavusteista suunnittelua, särmäyksessä käytettäviä yleisimpiä ohutlevymateriaaleja sekä särmäystä valmistusmenetelmänä. Työssä syvennytään siihen, miten särmäminen voidaan ottaa suunnittelussa huomioon sekä miten särmäystä voidaan tehostaa muita menetelmiä hyödyntäen.

Tietokoneavusteista suunnittelua tarkastellaan tuotesuunnittelun, parametrin piirremallinnuksen, tuotetietojen hallinnan ja attribuuttitietojen näkökulmasta. Ohutlevykappaleen mallintamisen keskeiset piirteet esitetään SolidWorks 3D CAD – suunnitteluohjelmiston näkökulmasta.

Särmäyksessä käytettäviä yleisimpiä materiaaleja selvitetään tarkemmin teknisestä näkökulmasta. Tämän tarkoituksena on antaa riittävää tietoa oikean materiaalin valintaan. Yleisimpiä käytössä olevia materiaaleja ovat kylmävalssatut ja kuumavalssatut ohutlevyteräkset, metallipinnoitetut ohutlevyteräkset, ruostumattomat teräkset, muokattavat alumiiniseokset, erilaiset verkkolevyt ja tinatut teräslevyt eli läkkilevyt. Kupari ja erilaiset kupariseokset, kuten messinki ja tinapronssi ovat myös paljon käytettyjä materiaaleja särmäyksessä. Myös erilaisia muovimateriaaleja, kuten polykarbonaattia käytetään usein särmäyksessä.

Särmäystä selvitetään yleisesti valmistusmenetelmänä periaatteen ja menetelmien osalta, lisäksi tutkitaan särmäyspuristimen käyttäytymistä taivutuksen aikana. Särmäystä syvennytään selvittämään materiaalin käyttäytymisen näkökulmasta, eli selvitetään neutraaliakselin sijaintia ja siirtymää taivutuksen aikana sekä miten takaisinjousto olisi huomioitava, jotta saavutetaan onnistunut taivutus. Valmistusmenetelmässä keskitytään tarkemmin selvittämään myös oikaistun pituuden laskemista, taivutussädettä ja sitä, millaisilla laskennallisilla kaavoilla taivutuksen vähenemä voidaan saada laskettua. Työssä esitetään laskennallisia esimerkkejä K-factorin, Bend Deductionin ja Bend Allowancen selvittämiseksi. Myös särmäyksessä tarvittavan voiman laskemiseen esitetään tarvittava kaava ja esimerkkilaskelma sekä selvitetään ratkaisuja, miten vastimen V – ura voidaan valita vapaataivutukseen. Työssä esitetään taulukoita ja menetelmiä, joilla voidaan nopeasti arvioida taivutusvoiman tarvetta, saada tietoon taivutuksen vähennykset, K-factor sekä millaisella taivutussäteellä ja V – uralla särmäys voidaan suorittaa.

Opinnäytetyössä syvennyttään tarkastelemaan sitä, millaisilla menetelmillä ja toimilla suunnittelussa voidaan huomioida särmäys valmistusmenetelmänä. Tarkastelua tehdään valmistettavuuden, eli DFM – menetelmän näkökulmasta, eli keskitytään tarkastelemaan särmäyksen aiheuttamia rajoitteita levyosan suunnittelussa. Selvityksessä huomioidaan myös valmistuskustannukset, joihin vaikuttavat muun muassa levyosan laatuvaatimukset, materiaalit, särmäysvaiheet, suunnittelijan asiantuntemuksen taso tehokkaasta valmistettavuudesta, kustannusajattelusta sekä särmäyksestä valmistusmenetelmänä. Työssä esitetään myös yleisiä suunnittelussa tapahtuvia virheitä, joiden katsotaan lisäävän valmistusaikaa ja kustannuksia tuotannossa.

Opinnäytetyössä syvennyttään viimeiseksi selvittämään erilaisia menetelmiä särmäyksen tehostamiseksi. Työssä tarkastellaan robotiikan hyödyntämistä joko robottijärjestelmänä tai robottisärmäyssoluna. Käsikäyttöisen särmäyksen tehostamista tarkastellaan erilaisten erikoistyökalujen, AFH – työkalujen, työkalujen teräpitimien, työ- ja mittavälineiden, LEAN – työkalujen, henkilöstön koulutuksen ja ammattitaidon sekä särmäystyökalujen säilytyksen ja huollon näkökulmasta. Lisäksi selvitetään uusien särmäyskoneiden hankintaa osana tehostamista. Särmäyksen tehostamisen menetelminä esitetään valmistusaikalaskelmia kolmen eri tuotteen särmäämisestä käsikäyttöisenä ja robottisärmäyssolun tekemänä. Laskelmien on tarkoitus havainnollistaa robottisärmäyssolun tehokkuutta perinteiseen käsikäyttöiseen särmäykseen nähden. Laskennallista selvitystä tehdään myös yhdelle erikoistyökalulle. Selvityksen tarkoituksena on osoittaa erikoistyökalun käytön kustannustehokkuus ja läpimenoajan lyheneminen särmäyksessä. Menetelmissä osoitetaan myös työkalujen asennuksen tehokkuus, kun käytössä ovat pikakiinnitykseen tarkoitetut teräpitimet.

Lopuksi opinnäytetyössä pohditaan havaittuja tuloksia ja niiden vaikutuksia särmäykseen.

ASIASANAT:

suunnittelu, ohutlevyvalmistus, ohutlevy, särmäys, tehostaminen, ohutlevymateriaalit, robotiikka, ANDON, Bend Allowance, Bend Deduction, K-kerroin, LEAN, DFM, DFA, DFMA, DMAIC, FMEA, SMED, 5S, 3D, PDM, särmäystyökalut, AFH, yläteräpidin, puristusvoima, erikoistyökalut, tuotannonohjaus, toiminnanohjausjärjestelmä, ERP, FEM, KET, taivutusvähennys, bombeeraus, kaareutus, takaisinjousto, neutraaliakseli, vapaataivutus, pohjaaniskutaivutus

Mikko Kiviluoto

ENHANCING THE PROCESS OF BENDING SHEET METAL PRODUCT REGARDING PLANNING

- detecting technical defects

This thesis studies how bending as a manufacturing process can be enhanced in the view of technical designing. The thesis addresses computer-aided-design (CAD), the most common sheet metal materials that are used in bending, and the actual bending as a manufacturing process. The report explores methods of how bending could be taken into account in mechanical designing and which kind of other methods in bending process could be more efficient to get better results.

Computer aided designing is viewed in the perspective of product design, parametric feature modeling, managing product information and attribute information. The key features of sheet metal modeling are viewed in the perspective of SolidWorks 3D CAD –design program.

The most common materials used in bending are being inspected closer from a technical view. This is done to give enough information for choosing correct materials. The most common used materials are cold rolled- and hot rolled sheet metal steels, metal coated steels, stainless steels, alloys, different types of net sheets and tin coated steel sheets, known as tin plate. Copper and different copper mixtures, like brass and tin bronze are also commonly used materials in bending. Different plastic materials, such as polycarbonate, are also commonly used.

Bending is examined in the views of principles and methods as a production process, and also how bending machines behave during bending process. The examination dwells deeper in the materials and how they behave during bending process by studying how the neutral axis location moves during bending and how to take springback in consideration to make quality parts by bending. Also, the measurements of a part before bending and bending radius are studied further by showing mathematical formulas that can be used to find out the reduction of material during bending. Mathematical examples how to find out K-factor, bend deduction and bend allowance are included, as is a formula and example for calculating the needed force for bending. For quick evaluation of needed force, a chart is included with examples of methods of how to evaluate bend deduction and K-factor, and what size of V-die and bend radius are needed to complete the bend.

The thesis examines different methods and ways to take bending process into account during designing process. The examination is done in the angle of DFM –method, focusing on the limitations that bending process causes in designing sheet metal parts. The investigation takes also into consideration the production costs, that are affected by the quality requirements, materials, bending steps and the designers expertise of efficient productivity of sheet metal parts, designers ability to take cost efficiency into account and designers knowledge of bending process. The thesis also reviews common flaws in designing sheet metal parts that are considered to lengthen the production time and make the production less cost efficient.

In the later chapters the thesis studies deeper, different methods and processes to enhance the efficiency of bending. One of these is taking the advantage of robotics, either as a robotic system or robotic bending unit. Enhancing the efficiency of manual bending by using different types of special tools, like AFH –tools, different tool holders, measuring devices, LEAN –tools and by education of employees, tool preservation machine maintenance is also inspected. As a part of studying the enhancing of the efficiency, calculations for purchasing modern bending machines to replace older ones are also shown. Also, calculations of producing three different parts with both manual bending and robotic bending unit are included to demonstrate the efficiency of using robotics compared to traditional manual bending. Calculations of the efficiency of using a one special bending tool are also included in the thesis. This is to point out the cost efficiency of using special tools and shortening of the time the process takes. In the methods section is included the tool setup efficiency when using quick gripping tool holders.

In conclusion, the thesis considers the found results and the effects of these results on bending as a sheet metal manufacturing process

KEYWORDS:

bending, planning, sheet metal, intensify, sheet metal product, sheet metal material, robotics, ANDON, Bend Allowance, Bend Deduction, K-Factor, LEAN, DFM, DFA, DFMA, DMAIC, FMEA, SMED, 5S, 3D, PDM, bending tools, AFH, upper tool holder, bending force, special tools, production management, ERP, FEM, crowning, springback, neutral axis, air bending, bottom bending, coining, WIP

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO	13
1 JOHDANTO	16
2 TOIMEKSIANTAJAN ESITTELY	19
2.1 JL Levytekniikka Oy:n historia	19
2.2 JL Levytekniikka Oy:n liiketoimintaympäristö	20
3 TIETOKONEAVUSTEINEN SUUNNITTELU	21
3.1 Tuotesuunnittelu	22
3.2 Parametrinen piirremallinnus	23
3.3 Ohutlevykappaleen mallintamisen keskeiset piirteet SolidWorks -ohjelmistolla	25
3.4 Tuotetietojen hallinta	26
3.5 Attribuuttitiedot	27
3.6 Simulointi sekä valmistettavuuden ja kustannusten arviointi SolidWorks -ohjelmistolla	28
4 SÄRMÄYKSESSÄ KÄYTETTÄVÄT YLEISIMMÄT OHUTLEVYMATERIAALIT	29
4.1 Kylmävalssatut pinnoittamattomat ohutlevyteräkset	31
4.2 Kuumavalssatut pinnoittamattomat ohutlevyteräkset	34
4.3 Metallipinnoitetut kylmävalssatut ohutlevyteräkset	36
4.4 Ruostumattomat teräkset	42
4.5 Muokattavat alumiiniseokset	44
4.6 Muut särmättävät materiaalit	49
5 SÄRMÄYS VALMISTUSMENETELMÄNÄ	52
5.1 Särmyksen periaate	53
5.2 Särmyspuristimen nykyaikainen ohjaus	55
5.3 Särmyspuristimen numeerisesti ohjatut akselit	56
5.4 Särmysmenetelmät	58
5.5 Särmyskoneen palkin kaareutus (Crowning)	62
5.6 Neutraaliakseli, taivutussäde, oikaistu pituus ja taivutuksen vähenemä särmyksessä	64
5.7 Levymateriaalin takaisinjousto (Springback) särmyksessä	72

5.8 Särmyksessä tarvittava puristusvoima ja vastimen V – uran leveyden valinnan kriteerit	76
5.9 Levytyökeskus ja laserleikkauskone särmättävien levyaihioiden leikkaajina/lävistäjinä	79
6 SÄRMÄYKSEN HUOMIOIMINEN SUUNNITTELUSSA	82
6.1 Valmistettavuuden ja kokoonpantavuuden (DFMA) huomioiminen suunnittelussa	83
6.2 Nykyaikaiset työstöohjelmistot suunnittelijan apuna	85
6.3 Särmättävien laippojen korkeudet sekä lovien- ja reikien sijainti levyosan taivutuslinjasta	86
6.4 Suunnittelusääntöjä ohutlevyosien särmykseen	89
6.5 Toleranssien ja tarkkuuden huomioiminen suunnittelussa	94
7 MENETELMIÄ SÄRMÄYKSEN TEHOSTAMISEEN	98
7.1 Robottiikan hyödyntäminen, robottijärjestelmä	98
7.2 Robottiikan hyödyntäminen, robottisärmyssolu	100
7.3 Käsikäyttöisen särmyksen tehostaminen	107
7.3.1 Särmysteräpitimet	107
7.3.2 Vasteet ja kulmamittalaitteet	108
7.3.3 Mukautuva erikoisvastin	109
7.3.4 Offset – taivutukset (Z – työkalut)	111
7.3.5 Suljetun profiilin särmykseen tarkoitettu erikoistyökalu	113
7.3.6 Erikoistyökaluja haastavampien levyosien särmykseen	113
7.3.7 Säädetävät 1 V matriisit	114
7.3.8 Laatikoiden särmäämiseen tarkoitettu erikoistyökalu	115
7.3.9 AFH (Amada Fixing Height) – työkalut särmyksessä	116
7.3.10 Särmystyökalujen säilytys ja huolto	117
7.3.11 Uudet särmyspuristimet	119
7.4 LEAN – työkalut ja särmyksessä tarvittavan ammattitaidon ylläpitäminen	120
8 POHDINTA JA TULOKSET	124
8.1 Opinnäytetyön pohdinta ja työn eteneminen	124
8.2 Tulokset ja kehitysajatuksia	128
LÄHTEET	131

LIITTEET

Liite 1. Ruostumattomien terästen yleisimmät kemialliset koostumukset ja tärkeimmät mekaaniset ominaisuudet SFS-EN 10088-2 (Matilainen ym. 2010, 29–33).

Liite 2. Mekaaniset ominaisuudet alumiiniseoksissa SFS-EN 485-2 (Matilainen ym. 2010, 65).

Liite 3 (1-6). Esimerkkilaskelmat K-kertoimen, Bend Allowancen sekä Bend Deductionin määrittämiseksi (Javelin Tech 2018). ja (SolidWorks web help 2018).

Liite 3 (7). JL Levytekniikka Oy:n taulukko (Bend Deduction) oikaistun pituuden vähennykseen (JL Levytekniikka Oy 2018).

Liite 3 (8). Teräksen ja ruostumattoman teräksen, puristusvoimataulukko vapaataivutukselle. Taulukosta nähtävissä myös V-uran valinta, eri aineenvahvuuksille (Ama-Prom Finland Oy 2018b, 70).

KAAVAT

Kaava 1. Ulkopuolisen taivutussäteen laskeminen likimääräisesti (Karppinen ym. 1986, 13).	67
Kaava 2. Särmättävän levyaihion oikaistun pituuden laskentakaava (Matilainen ym. 2010, 251).	68
Kaava 3. Oikaistun pituuden laskeminen Bend Allowancen avulla (SolidWorks web help 2018).	69
Kaava 4. Standardin DIN 6935 mukaiset laskentakaavat v-arvon laskemiseksi särmätyn levyaihion oikaistussa pituudessa (Matilainen ym. 2010, 251).	70
Kaava 5. Neutraaliakselin kaaren pituuden laskeminen (BA) (Piironen 2013, 27).	71
Kaava 6. Takaisinjouston suuruutta kuvaava takaisinjoustosuhde k, jolla takaisinjousto voidaan arvioida (Matilainen ym. 2010, 247).	74
Kaava 7. Ylempänä särmäyksessä tarvittavan puristusvoiman laskemiseen tarvittava laskentakaava (Matilainen ym. 2010, 252). Alempana laskentakaava vakioarvo C:n laskemiseen (JL Levytekniikka Oy 2018).	76
Kaava 8. Väljyydsluvun (w) laskemiseen käytettävä laskukaava (Matilainen ym. 2010, 243).	78
Kaava 9. Minimilaipan korkeuden laskemiseen käytettävä kaava, jossa b on minimilaippakorkeus, r_s on sisäsäde ja s on levyaihion aineenvahvuus (Matilainen ym. 2010, 249).	87
Kaava 10. Reikien minimietäisyyksien laskeminen taivutuslinjasta (Matilainen ym. 2010, 258).	88
Kaava 11. Lovien minimietäisyyksien laskeminen taivutuslinjasta (Matilainen ym. 2010, 258).	88
Kaava 12. Lyhimmän mahdollisen sivun pituuden b laskeminen 90° -kulman V -uralle (Matilainen ym. 2010, 258).	89

KUVAT

Kuva 1. JL Levytekniikka Oy:n tuotantotilat (JL Levytekniikka Oy 2018).	19
Kuva 2. SolidWorks 3D CAD -suunnitteluohjelmiston piirrepuu ja siihen liittyvä ohutlevykappale (JL Levytekniikka Oy 2017).	23
Kuva 3. Särmäyksen periaate (Ama-Prom Finland Oy 2018a).	53
Kuva 4. Amada HFE 3i 1003 ylätoiminen särmäyspuristin (Ama-Prom Finland Oy 2018a).	54
Kuva 5. Amadan AMNC 3i -ohjauksella varustettu graafinen ohjelmointipaneeli (Ama-Prom Finland Oy 2018a).	56
Kuva 6. Amada särmäyspuristimen ohjelmoitavat akselit (Ama-Prom Finland Oy 2018a).	57
Kuva 7. Särmäysmenetelmien vertailu (Ama-Prom Finland Oy 2018a).	59
Kuva 8. Särmäysprosessit (Ama-Prom Finland Oy 2018a).	60
Kuva 9. Litistys särmäysmenetelmänä (Ama-Prom Finland Oy 2018a).	60
Kuva 10. Vasemmalla polykarbonaattimatriisi naarmuttomaan särmäykseen (Ama-Prom Finland Oy 2018b, 49). Oikealla elastinen särmäysmenetelmä, jossa elastomeerittyyny muotoutuu painimen mukaan (Matilainen ym. 2010, 242).	61
Kuva 11. Veneilmiöstä johtuvan taivutettavan levyosan kylkien pullistuminen keskeltä (Matilainen ym. 2010, 244).	62
Kuva 12. Amadan särmäyspuristimen integroitu bombeeraus. Reaktiivinen palkkirakenne (Ama-Prom Finland Oy 2018a).	63
Kuva 13. Amadan särmäyspuristimen automaattibombeeraus. Reaktiivinen palkkirakenne (Ama-Prom Finland Oy 2018a).	64
Kuva 14. Neutraaliakselin sijainti ja sen siirtymä särmäyksessä (Matilainen ym. 2010, 250).	65
Kuva 15. Viivoitetuissa kolmioissa on suhteellinen venymä materiaalin (ϵ_a ja ϵ_b) taitoksen poikkileikkauksen eri kohdissa sekä jännitysvenymäkäyrät (Karppinen ym. 1986, 13).	66
Kuva 16. Keinot, joilla taivutussädettä voidaan pienentää: a) poikkipinnan pienentäminen loveamalla, b) vaon tekeminen ohueen levyyn ennen taivuttamista (Matilainen ym. 2010, 249).	67
Kuva 17. Laippojen pituudet a ja b (SolidWorks web help 2018).	68
Kuva 18. Parametrit oikaistun pituuden laskemiseen. α = taivutuskulma, r = taivutussäde, s = materiaalin aineenvahvuus, a = alemman laipan pituus, b = ylemmän laipan pituus (Matilainen ym. 2010, 250).	69
Kuva 19. Tarvittavat parametrit Bend Deductionin laskemiseen (SolidWorks web help 2018).	71
Kuva 20. Ilmainen BendWorks -ohjelmisto, jolla pystytään nopeasti laskemaan ja arvioimaan k-kerroin sekä BD – arvo (PLM Group Suomi Oy 2018).	72
Kuva 21. Takaisinjouston syntyyyn vaikuttavat muodonmuutosvyöhykkeet särmättävän levyosan poikkileikkauksessa (Matilainen ym. 2010, 246).	73
Kuva 22. Särmäyksen takaisinjoustoon liittyviä suureita: α_1 kuvastaa särmättävää kulmaa, α_2 kertoo kulman särmäyksen jälkeen, β on takaisinjoustokulma, ϕ_1 on kaarikulma särmäyksessä, ja ϕ_2 on kaarikulma särmäyksen jälkeen (Matilainen ym. 2010, 247).	74
Kuva 23. Dynaaminen kulmankorjaus (Bending Indicator Sensor BI-S) (Ama-Prom Finland Oy 2018a).	75

Kuva 24. Taivutusvoiman laskennalle havainnollistava kuva (Matilainen ym. 2010, 246). Esimerkkilaskelma on tehty MathCad ohjelmistolla.	77
Kuva 25. Särjäysvoiman ja V-uran valinta suuntaa antavalla laskentataulukolla (JL Levytekniikka Oy 2018).	79
Kuva 26. Kuvassa vasemmalla servokäyttöinen levytyökeskus EMZ 3510 NT ja oikealla koneen 45 paikkainen työkalurevolveri, jossa on mustaa harjapöytää nähtävissä (JL Levytekniikka Oy 2018).	80
Kuva 27. Amadan valmistama, teknisesti kehittynyt ja tehokas 6kW LCG 3015 AJ -kuitulaser (Ama-Prom Finland Oy 2018a).	81
Kuva 28. Amadan työstöohjelmistot hitsaukseen-, särjäykseen- ja leikkaukseen (Ama-Prom Finland Oy 2018a).	86
Kuva 29. Levyosat, jotka sisältävät reikiä ja lovia (Matilainen ym. 2010, 258).	88
Kuva 30. Erilaisia ohutlevyvalmistuksen suunnittelusääntöjä, joissa s on aineenvahvuus ja r_s on taivutuksen sisäsäde (Karppinen ym. 1986, 43).	91
Kuva 31. Levyosien nurkkien taivutusperiaatteet kohdissa a-n (Karppinen ym. 1986, 44).	92
Kuva 32. Särjäyksen suunnittelusääntöjä (Karppinen ym. 1986, 45).	93
Kuva 33. Robotin tarttuja, jolla käsitellään pieniä levyaihioita, kooltaan maksimissaan 40 x 80 mm: ä. Tarttujassa vakuunitartunta sekä pihtiote. (Ama-Prom Finland Oy 2018a.)	101
Kuva 34. Amada EG 6013 AR -robotisärjäyssolun särjäysohjelman simulointi ennen valmistuksen aloitusta (Ama-Prom Finland Oy 2018a).	102
Kuva 35. Robotisärjäyssolu Amada EG6013-AR, jossa kuvattu soluun kuuluvia laitteita (Ama-Prom Finland Oy 2018a).	103
Kuva 36. Kuvassa vasemmalla Amadan valmistama A GRIP-M-DUAL -teräpidin yläterän pikakiinnitykseen (Ama-Prom Finland Oy 2018b, 58). Kuvassa oikealla Wilson Tool Internationalin valmistamia särjäysteräpitimiä (Wilson Tool International Ltd 2018b).	108
Kuva 37. Kuvassa vasemmalla on asteikolla varustettu kulmasivuvaste (Ama-Pro Finland Oy 2018b, 62). Oikealla on digitaalinen kulmamittaustaite DIGIPRO® (Ama-Pro Finland Oy 2018a).	109
Kuva 38. Kuvassa vasemmalla Wilson V -series Black -erikoisvastimia (Wilson Tool International Ltd 2018c) ja kuvassa oikealla Amada WingBend -erikoisvastimia (Ama-Prom Finland Oy 2018b, 65).	110
Kuva 39. Vasemmalla ja keskellä Wilsonin valmistama Z – taivutustyökalu (Wilson Tool International Ltd 2018f). Oikealla Amadan valmistama säädettävä Super Multi II Z – taivutustyökalu (Ama-Prom Finland Oy 2018b, 61).	111
Kuva 40. Vasemmalla Amadan erikoistyökalu suljetun profiilin särjäykseen (Ama-Prom Finland Oy 2018b, 63) ja oikealla Wilsonin erikoistyökalu (Wilson Tool International Ltd 2018i).	113
Kuva 41. Amadan valmistamia erikoistyökaluja, joista vasemmalta alkaen R – työkalu, hattutaivutustyökalu, U – työkalu, jäykistetyökalu ja erityinen litistystyökalu (Ama-Prom Finland Oy 2018b, 66–67).	114
Kuva 42. Amadan valmistama säädettävä 1V matriisi. Malli VLMDN. (Ama-Prom Finland Oy 2018b, 64).	114
Kuva 43. Wilsonin valmistama Swing Ear – erikoistyökalu laatikoiden särjäämiseen (Wilson Tool International Ltd 2018g).	115
Kuva 44. Esimerkki kustannustehokkaasta moniasetuksesta AFH – työkaluilla HG - ja HFE – sarjan särjäyspuristimissa (Ama-Prom Finland Oy 2018b, 5).	117
Kuva 45. Kuvassa vasemmalla Wilsonin valmistama särjäystyökalujen säilytysjärjestelmä (Wilson Tool International Ltd. 2018d). Oikealla ultraäänipesuri särjäystyökalujen huoltoon (Wilson Tool International Ltd 2018h).	118

KUVIOT

Kuvio 1. Kolmen eri tuotteen käsikäyttöisessä särmäyksessä kuluneita valmistusaikoja (JL Levytekniikka Oy 2018).	104
Kuvio 2. Kolmen eri tuotteen EG 6013 AR -robottisärmäyksessä kuluneita valmistusaikoja (JL Levytekniikka Oy 2018).	105
Kuvio 3. Tuotteiden 1-3 valmistusaikojen prosentuaalinen vertailu robotti- ja käsikäyttöisessä särmäyksessä (JL Levytekniikka Oy 2018).	106
Kuvio 4. Z – taivutustyökalun hyöty verrattuna perinteiseen särmäykseen (JL Levytekniikka Oy 2018).	112

TAULUKOT

Taulukko 1. Teräsiin ja terästuotteisiin liittyviä standardeja (Metsta 2018, 4).	30
Taulukko 2. Viimeistelyvalssattujen teräslajien DC01-DC07 muovausparametrit, mekaaniset ominaisuudet ja niiden voimassaoloaika standardin SFS-EN 10130 mukaan (Matilainen ym. 2010, 9).	33
Taulukko 3. Teräksien nimikejärjestelmän tulkitseminen (Metsta 2018, 20).	35
Taulukko 4. Domex 355 MC:n kuumavalssatun, erikoislujan kylmämuokattavan teräksen mekaaniset ominaisuudet (SSAB Ab 2018).	36
Taulukko 5. Sinkkipinnoitevaihtoehtojen massa ja paksuus (Matilainen ym. 2010, 14).	37
Taulukko 6. Sinkki-alumiiniseospinnoitevaihtoehtojen massa ja paksuus (Matilainen ym. 2010, 15).	38
Taulukko 7. Sinkki-rautaseospinnoitevaihtoehtojen massa ja paksuus (Matilainen ym. 2010, 15).	38
Taulukko 8. Sinkkipinnoitteiden pinnanlaatu-, pinnoite- ja kuviotyypit (Matilainen ym. 2010, 15).	39
Taulukko 9. Sinkki-alumiiniseospinnoitteiden pinnanlaatu-, pinnoite- ja kuviotyypit (Matilainen ym. 2010, 16).	39
Taulukko 10. Sinkki-rautaseospinnoitteiden pinnanlaatu-, pinnoite- ja kuviotyypit (Matilainen ym. 2010, 16).	40
Taulukko 11. Elektrolyyttiset sinkkipinnoitteet (Matilainen ym. 2010, 20).	40
Taulukko 12. Viimeistelyvalssattujen teräslajien DC01-DC07 muovausparametrit, mekaaniset ominaisuudet sekä niiden voimassaoloaika standardin SFS-EN 10152 mukaan (Matilainen ym. 2010, 21).	41
Taulukko 13. Alumiiniseokset ryhmiteltynä pääseosaineen mukaan (Koivisto ym. 2010, 168). Taulukossa esitetty myös yleisimmät kauppalaadut (Matilainen ym. 2010, 61).	45
Taulukko 14. Eri alumiiniseoksien takaisinjousto eri taivutussäteillä (Matilainen ym. 2010, 78).	48
Taulukko 15. Alumiinilevyjen ja -nauhojen paksuustoleranssit (Matilainen ym. 2010, 81).	48
Taulukko 16. Ohutlevyjen valmistusmenetelmät (Matilainen ym. 2010, 4).	52
Taulukko 17. Esimerkki taulukosta, jota käytetään SolidWorks 3D -ohjelmistossa oikaistun pituuden laskemiseen (JL Levytekniikka Oy 2018).	71
Taulukko 18. Takaisinjoustokulmia eri materiaaleille 90 ° särmäyksessä (Matilainen ym. 2010, 248).	75

Taulukko 19. V – uran leveyden valinnassa käytettäviä suosituksia (Matilainen ym. 2010, 243).	78
Taulukko 20. Minimi- ja suositusarvoja teräsohutlevyjen laippakorkeuksille eri aineenvahvuuksilla, kun $r_s = s$ (Matilainen ym. 2010, 249).	87
Taulukko 21. Standardin SFS-EN 22768-1 sallitut poikkeamat pituusmitoissa, lukuun ottamatta viistettyjä kulmia. Lukuarvot ovat millimetrejä. (Pere 2012, 20–111).	95
Taulukko 22. Standardin SFS-EN 22768-1 sallitut poikkeamat kulmamitoissa. Lukuarvot ovat millimetrejä. (Pere 2012, 20–111).	96
Taulukko 23. Standardin SFS-EN 22768-1 sallitut poikkeamat viistetyissä kulmissa. Lukuarvot ovat millimetrejä. (Pere 2012, 20–112).	96

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO

AutoCAD	Tietokoneavusteinen suunnitteluohjelmisto
ANDON	Järjestelmä tuotannon tekemiä avunpyyntöjä ja raportointia varten.
BA	Taivutussäde (Bend Allowance). Taivutuksen kaaren pituus mitattuna levyosan neutraaliakselin ympäri.
BD	Taivutuksen vähennys (Bend Deduction tai v - arvo)
CAD	Tietokoneavusteinen suunnittelu (Computer-aided Design)
CSWPA-SM	Ohutlevy suunnittelu osaamisen sertifiointi (Certified SolidWorks Professional Advanced Sheet Metal)
DFA	Tuotteen kokoonpantavuus (Design for Assembly)
DFM	Tuotteen valmistettavuus (Design for Manufacturability)
DFMA	Tuotteen valmistettavuus ja kokoonpantavuus (Design for Manufacturability and Assembly)
DMAIC	LEAN Six Sigma ongelmanratkaisumenetelmä (Define, Measure, Analyze, Improve and Control)
DWG	AutoCAD-ohjelmiston oma tiedostomuoto
DXF	CAD-tiedostomuoto (Drawing Interchange Format, Drawing Exchange Format)

ERP	Toiminnanohjausjärjestelmä (Enterprise Resource Planning)
FEM	Tietokoneavusteinen lujuuslakenta (Finite Element Method)
FMEA	Vika- ja vaikutusanalyysi (Failure Mode and Effects Analysis)
FMECA	Vika-, vaikutus- ja kriittisyysanalyysi (Failure Mode, Effects, and Critically Analysis)
ISO9001	Laadunhallintajärjestelmä (standardi)
ISO14001	Ympäristöjärjestelmä (standardi)
KET	Keskeneräinen Tuotanto
K-Factor	K-kerroin. Neutraaliakselin sijaintia kuvaava suhdearvo.
LEAN	Tuotantofilosofia. Laatujohtamisen periaatteiden soveltaminen tuottamiseen.
NC	Numeerinen ohjaus (Numerical Control)
SMED	LEAN – työkalu. Vakiomenetelmän kehitys (Single Minute Exchange of Die)
SolidWorks	3D CAD – suunnitteluohjelmisto.
SFS-EN 573-1-4	Alumiini ja alumiiniseokset. Kemialliseen koostumukseen perustuva nimikejärjestelmä.
SFS-EN 1652	Kuparit ja kupariseokset. Levyt, nauhat ja pyörylät yleiseen käyttöön.
SFS-EN 10027-1:2016	Terästen nimikejärjestelmät. Osa 1: Terästen nimikkeet
SFS-EN 10028-7	Painelaiteteräkset. Levytuotteet- Teräslävystandardi.

SFS-EN 10088-2	Ruostumattomat teräkset. Osa 2, tekniset toimitusehdot.
SFS-EN 10130	Tekniset toimitusehdot kylmävalssatuille, kylmämuovattaville ohutlevyteräksille (standardi)
SFS-EN 10131	Kylmävalssatut kylmämuovattavat pinnoittamattomat ja elektrolyytisesti sinkki- tai sinkkinikkelipinnoitetut sekä lujat ohutlevyteräkset. Mitta- ja muototoleranssit.
SFS-EN 10143	Jatkuvatoimisella kuumaupotusmenetelmällä pinnoitetut ohutlevyteräkset. Mitta- ja muototoleranssit.
SFS-EN 10149-2	Osa 2. Yleiset toimitusehdot kuumavalssatuille, lujille kylmämuovattaville ohutlevyteräksille (standardi)
SFS-EN 22768-1	Yleistoleranssit osa 1. Ilman toleranssimerkintää olevien pituus- ja kulmamittojen toleranssit
SFS-EN 22768-2	Yleistoleranssit osat 2. Ilman toleranssimerkintää olevien geometrinen elementtien toleranssit
PDM	Tuotetietojen hallinta (Product Data Management)
3D	Kolmiulotteinen grafiikka (Three Dimensional)
5S	LEAN – työkalu. Viisiportainen työympäristön organisointimenetelmä (Sort, Store, Shine, Standardize, Sustain and Safety)

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön on tilannut turkulainen ohutlevytuotteiden ja kokonaisuuksien sopimusvalmistaja JL Levytekniikka Oy (jäljempänä Levytekniikka). Levytekniikassa haluttiin selvittää mahdollisimman kattavasti, millaisilla menetelmillä särmäystä voitaisiin paremmin huomioida suunnittelussa sekä millaisilla muilla mahdollisilla menetelmillä särmäystä valmistusmenetelmänä olisi mahdollista tehostaa tai parantaa.

Selvitystyö käynnistyy toimeksiantajan eli Levytekniikan liiketoimintaympäristön ja historian esittelyllä. Esittelyn jälkeen työssä siirrytään suunnitteluun, jossa avataan yleisesti tietokoneavusteista suunnittelua sekä siihen liittyvää tuotesuunnittelua, parametrissa piirremallinnusta, tuotetietojen hallintaa, attribuuttitietoja ja SolidWorks -ohjelmistolla tehtävää simulointia (FEM – analyysi) sekä valmistettavuuden ja kustannuksen hallintaa.

Tietokoneavusteinen suunnittelu on nykypäivänä suunnittelijan jokapäiväinen ja tärkeä työkalu, jolla tuotesuunnittelua ja ohutlevykappaleen mallinnuksia tehdään. Ohutlevykappaleen mallintamisen neljä keskeisintä piirrettä esitetään SolidWorks 3D – suunnitteluohjelmiston näkökulmasta katsoen.

Suunniteltaessa särmättäviä levyosia, on tärkeää tiedostaa, millaisia ohutlevymateriaaleja särmäyksessä käytetään ja millaisia ominaisuuksia eri materiaaleilla on. Työssä tarkastellaan särmäyksessä yleisesti käytettäviä ohutlevymateriaaleja ja niiden ominaisuuksia. Materiaalit, joita tarkemmin käydään läpi, ovat kylmävalssatut pinnoittamattomat-, kuumavalssatut pinnoittamattomat- ja metallipinnoitetut kylmävalssatut ohutlevyteräkset sekä ruostumattomat teräkset ja muokattavat alumiiniseokset.

Särmäyksessä käytetään usein muitakin materiaaleja, joita tullaan yleisesti käymään läpi. Tällaisia materiaaleja ovat muun muassa erinäiset muovit, kuten polykarbonaatti (PC) ja polyvinyylidikloridi (PVC) sekä kuparit ja niiden seokset, kuten messinki ja tina-pronssi. Lisäksi joihinkin sovelluksiin käytetään läkkilevyä, valmiiksi maalattuja teräsohutlevyjä, erilaisia verkkolevyjä ja ruostumattomia jousiteräksiä.

Opinnäytetyössä keskitytään tarkastelemaan tarkemmin särmäystä valmistusmenetelmänä. Työssä selvitetään särmäyksen periaatetta, särmäysmenetelmiä, nykyaikaista numeerista ohjausta sekä särmäyspuristimen erilaisia toimintoja, kuten akseleiden ohjausta ja palkin kaareutusta, jolla estetään niin sanottu veneilmiö särmäyksen aikana. Kaareutus tunnetaan yleisesti myös termillä bombeeraus. Työssä tullaan tarkastelemaan mahdollisimman kattavasti särmättävän levyosan takaisinjousto -ilmiön syitä ja sitä, millaisilla menetelmillä takaisinjousto voidaan hallita tai pyrkiä estämään.

Myös neutraaliakselin siirtymää ja siihen liittyviä jännityksiä selvitetään mahdollisimman tarkasti. Levyaihion oikaistua pituutta ja taivutuksen vähenemää selvitetään tarkasti ja havainnollistetaan esimerkkilaskelmilla, joihin vaikuttavat oleellisesti muun muassa taivutussäde ja käytettävä levyateriaali.

Laskelmien lisäksi esitetään vaihtoehtoisia menetelmiä, joilla arvioidaan taivutusvähenemää. Työssä selvitetään myös särmäyksessä tarvittavan puristusvoiman laskemista ja määrittämistä, V – uran leveyden valintakriteerit huomioiden. Työssä tullaan tarkastelemaan yleisesti, millaisilla menetelmillä särmättäviä levyaihioita nykyään leikataan.

Tavoitteena on myös pohtia ratkaisuja, joilla suunnittelu voi ottaa särmäystekniset asiat paremmin huomioon yhteistyössä särmäystä suorittavien henkilöiden kanssa. Työssä keskitytään tarkastelemaan valmistettavuutta ja kokoonpantavuutta DFMA – menetelmää ja nykyaikaisia työstöohjelmia hyödyntäen. Toleranssien ja tarkkuuden huomioiminen levyosien mitoituksissa selvitetään myös käytännön ja suunnittelun näkökulmasta.

Lisäksi särmättävien levyosien suunnittelusääntöjä, suunnittelussa aiheutuvia yleisiä virheitä ja levyosien särmäyksessä huomioitavia mitoitusääntöjä tullaan selvittämään, jotta voidaan välttyä yleisiltä virheiltä, joita suunnittelussa ilmenee. Särmättävissä levyosissa sijaitsevien erilaisten lovien- ja reikien paikoituksista esitetään laskentakaavoja, joilla voidaan välttää särmäyksessä liian lähelle taivutuslinjaa mitoitettujen lovien- ja reikien muodon ja mittojen muuttuminen.

Keskeisenä tarkoituksena on selvittää, millaisilla muilla menetelmillä särmäys voi olla tehokkaampaa, jotta mahdolliset hukkaa aiheuttavat toimet olisivat minimaalisia. Työssä selvitetään useita erilaisia tehostamismenetelmiä kuten robotiikan hyödyntäminen särmäyksessä. Robotiikan hyötyjä särmäyksessä selvitetään laskelmilla, joita verrataan käsikäyttöisessä särmäyksessä tehtyihin laskelmiin.

Käsi­käyt­toisen sär­mäyksen tehostamiseksi esitellään monia menetelmiä, kuten erilaisia erikoistyökaluja, mittalaitteita, sär­mäy­styökalujen teräpiti­miä, Amadan kehittämiä AFH – sarjan sär­mäy­styökaluja, sär­mäy­styökalujen säilytysjärjestelmiä ja huoltoa. Lisäksi sär­mäyksen tehostamisen yhtenä menetelmänä huomioidaan uudet sär­mäyspuristimet, joiden teknisiä ominaisuuksia ja kehityssuuntaa tarkastellaan.

Työssä esitetään myös vertailulaskelma yhden erikoistyökalun osalta ja selvitetään työ­aikasäästöä verrattuna perinteisen sär­mäy­styökalun käyttöön nähden. Yläterien kiinnitykseen käytettävistä teräpiti­mistä tehdään vertailu, jossa vertailtavina ovat perinteinen yläteräpidin ja yläterien pikakiinnitykseen tarkoitettu teräpidin.

Sär­mäyksen tehostamista tarkastellaan teknisten ja konkreettisten menetelmien lisäksi erilaisilla LEAN – työkaluilla, joita voidaan hyödyntää muun muassa sär­mäy­ksessä ja suunnittelussa. Lisäksi pohditaan yleisesti tuottavuuden jatkuvaa parantamista ja kehittämistä.

Tuottavuuden jatkuva parantaminen ja kehittäminen on tärkeää huomioida yrityksen koko henkilöstön keskuudessa. Työssä pohditaan menetelmiä, joilla tuottavuutta voidaan lisätä tuottavuuden jatkuvan parantamisen ja jatkuvan kehittämisen näkökulmista.

Opinnäytetyön lopussa pohditaan saavutettuja tavoitteita, työn tuloksia ja kehitysajatuk­sia edellä mainittujen menetelmien ja keinojen näkökulmasta. Pohdinnassa esitetään yhteenveto siitä, millaisilla toimilla ja toiminnoilla sär­mäystä voidaan kehittää ja tehostaa suunnittelu huomioiden.

2 TOIMEKSIANTAJAN ESITTELY

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimii JL Levytekniikka Oy (jäljempänä Levytekniikka). Levytekniikan toimialana on valmistaa ohutlevyistä mekaniikkatuotteita ja kokonaisuuksia asiakkaan erinäisiin tarpeisiin. Levytekniikka sijaitsee Vahdontiellä Turun ja Raision rajalla, ohikulkutien välittömässä läheisyydessä. Levytekniikalla on käytössä noin 2100 m² tuotantotilat (kuva 1).



Kuva 1. JL Levytekniikka Oy:n tuotantotilat (JL Levytekniikka Oy 2018).

2.1 JL Levytekniikka Oy:n historia

Levytekniikka on vuonna 1994 perustettu ohutlevyosien kokonaisvaltainen sopimusvalmistaja. Liiketoiminta käynnistyi yrityskaupoilla, jolloin Levytekniikan toimiva johto osti Telesten konserniin kuuluvan Telesten metallin. (JL Levytekniikka Oy 2017.) Vuonna 1954 perustetun Telesten liiketoiminta muuttui huomattavasti vuonna 1994, jolloin yritys päätti keskittyä ydinosamisalueeseensa. Tuolloin ”management buy out” järjestelyillä muodostettiin monia yrityksiä jatkamaan Telesten aikaisempia toimintoja, joista yksi oli Levytekniikka Oy. Levytekniikka aloitti, aikaisemmin Telestelle kuuluneen, metallituotevalmistuksen. (Ritakallio 2004, 92.)

Telesten liiketoiminnoista luopumisen seurauksena, näitä kyseisiä yrityksiä alettiin kutsua Telesten perillisiksi (Ritakallio 2004, 126). Levytekniikka jatkoi liiketoimintaansa Turussa Kaurakadulla vuoteen 2001 asti, jonka jälkeen yritys siirtyi Vahdontielle Turun ja Raision rajalle suurempiin tuotantotiloihin nopeasti kasvavan liikevaihdon ja investointien vuoksi. Liiketoiminta jatkuu edelleen Vahdontiellä. (JL Levytekniikka Oy 2017.)

2.2 JL Levytekniikka Oy:n liiketoimintaympäristö

Levytekniikan liiketoiminta keskittyy ohutlevytuotteiden valmistukseen. Toimintamallina on pääasiassa JOT-periaate (Just On Time). Suunnittelun ja tuotekehityksen pääasiallisessa käytössä on SolidWorks 3D CAD -suunnitteluohjelmisto. Levytekniikalla on lähes 25 vuoden mekaniikkaosien suunnitteluosaaminen, jonka avulla yritys pystyy nykyaikaisen ja ammattitaitoisen tuotannon avulla valmistamaan haasteellisiakin kokonaisuuksia niin ajoneuvoteollisuuteen, elektroniikka-, ja sähköteollisuuteen kuin rakennusteollisuuteenkin. Kattavan ja luotettavan toimittajaverkoston avulla, myös pintakäsittelyt, koneistukset sekä muut valmistukseen vaadittavat komponentit ovat hyvin saatavilla. Suunnittelun, ammattitaitoisen tuotannon sekä oman jauhemaalaamon avulla, Levytekniikka pystyy tarvittaessa hyvin nopeisiin toimitusaikoihin. Levytekniikka toimii ISO9001:2015 laatustandardin ja ISO14001:2015 ympäristöstandardin mukaisesti. (JL Levytekniikka Oy 2018.)

3 TIETOKONEAVUSTEINEN SUUNNITTELU

Tietokoneavusteinen suunnittelu, eli Computer-Aided-Design (CAD) tarkoittaa tietokoneen tukemana tehtävää suunnitteluprosessia sen eri vaiheissa. (Pere 2012, 2-11.)

Varsinainen tietokoneavusteinen suunnittelu sai todellisen alkunsa vasta 1980-luvun alussa, kun markkinoille tuli ensimmäiset PC-tietokoneet. Tuolloin tyypilliset CAD-systeemit olivat 16-bittisiä tietokoneita, joiden keskusmuisti oli maksimissaan 512 kilotavua ja joissa oli 20–300 megatavua tallennustilaa kiintolevyllä. AutoCad piirto-ohjelma oli tunnetuin ohjelmisto, joka tuli vasta 1990-luvun alussa mekaniikkasuunnittelijoiden käyttöön. Alkuvaiheessa puhuttiin enemminkin tietokoneavusteisesta piirtämisestä kuin suunnittelusta. Piirtäminen oli alkuvaiheessa kaksiulotteista ja vaikkakin kolmiulotteista suunnittelua kokeiltiin jo 1980-luvulla, näki ensimmäinen parametrisen piirremallinnusjärjestelmään perustuva ohjelmisto päivänvalon vasta 1988. Ohjelmisto toimi UNIX-työasemissa. (Hietikko 2015, 14–15.) Nykyisin CAD on laajempi käsite, joka tarkoittaa tietokoneen käyttämistä suunnittelun apuna, eikä pelkästään piirtämisvälineenä (Pere 2012, 2-11).

Vuonna 1995 julkistettiin ensimmäinen Windows-käyttöjärjestelmään perustuva SolidWorks -ohjelmisto. Ohjelmisto herätti tuolloin kiinnostusta muun muassa helppokäyttöisen käyttöliittymänsä vuoksi. (Hietikko 2015, 14–15.) Nykyään tietokoneavusteinen suunnittelu on kokonaisuudessaan syrjäyttänyt käsin piirtämisen useilla eri aloilla. 3D-suunnitteluohjelmien erilaiset simulaatiot, visualisoinnit sekä analyysit ovat yleisessä käytössä ja ne liittyvät yhä läheisemmin suunnittelijan jokapäiväiseen työhön. (Pere 2012, 2-11.)

3.1 Tuotesuunnittelu

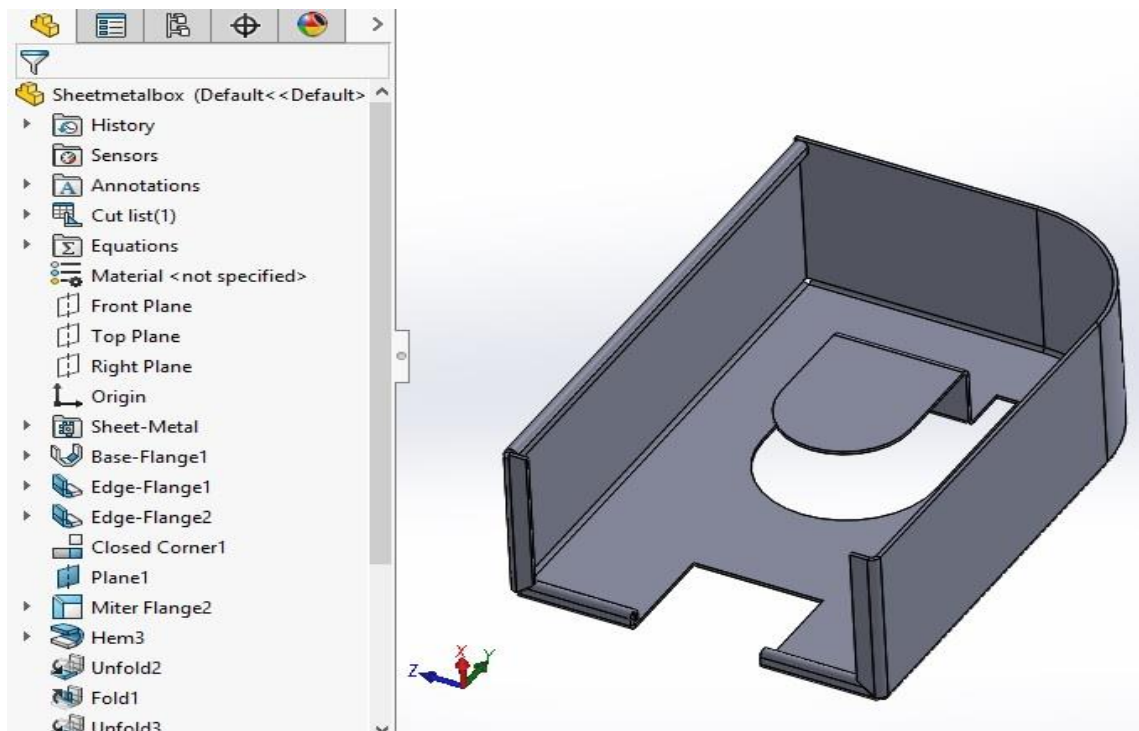
Tuotekehitysprosessin näkyvimpiä osia on tuotesuunnittelu. Tuotesuunnittelua kutsutaan myös termillä detaljisuunnittelu. Tuotekehitys ja tuotesuunnittelu sekoitetaan usein keskenään, vaikka tuotesuunnittelu on osa tuotekehitysprosessia. Prosessia, joka kattaa kaiken toiminnan asiakkaiden tarpeista, aina tuotannon käynnistämiseen, kutsutaan tuotekehitysprosessiksi. Suunnittelu on prosessi, jossa luonnoksena oleva tieto muuttuu tarpeiden, vaatimuksien ja erilaisten reunaehtojen mukaisesti sellaiseen rakenteelliseen kuvaukseen, joka on toteutettavissa. (Hietikko 2015, 12–13). Toisin sanoen, suunnittelu on tietojen keräämistä ja niiden käsittelemistä sellaiseen rakenteelliseen muotoon, joka on asiakkaan vaatimukset täyttävä ja arvoa tuottava.

Tuotesuunnittelun tavoitteena on käytännössä tuottaa valmistusta varten yksiselitteiset dokumentit, jotta tuotannossa kyetään valmistamaan sellaiset kappaleet ja kokoonpanot, joita asiakkaan kanssa on sovittu. Useasti suunniteltava tuotekokonaisuus jaetaan pienempiin osiin, toisin sanoen osakokoonpanoihin. Myös osakokoonpanoja voidaan edelleen jakaa pienempiin osiin. Tuotesuunnittelu on päätösten ja valintojen tekemistä. (Hietikko 2015, 13.)

Tuotesuunnittelussa on hyvin tärkeää tiedostaa ja ymmärtää tuotteiden valmistettavuus ja siitä syntyvät kokonaiskustannukset. Ohutlevyosuunnittelussa suunnittelijan on huomioitava useita tärkeitä asioita, jotta särmäyksessä tehtävät muodot ja taivutukset voidaan tehdä onnistuneesti ja lisäkustannuksia aiheuttamatta. Suunnittelijan on huomioitava muun muassa materiaalien yhteensopivuudet, pyörityssäteet, taivutuskevennykset, toleranssit, levyaihion venyminen sekä reikien ja aukkojen sijainnit, jotta niihin ei kohdistu venymistä. Suunnittelijan on huomioitava myös särmäyskoneiden toimintaperiaatteet, rajoitteet ja työkalut sekä muut rajoittavat tekijät, jotta voidaan varmistua siitä, että kokonaiskustannukset pysyvät hallinnassa ja tuotteet ovat ylipäättään valmistettavissa järkevillä kustannuksilla.

3.2 Parametrinen piirremallinnus

Tietokoneavusteisella suunnitteluohjelmistolla tarkoitetaan parametrista piirremallinnusjärjestelmää, jonka avulla suunniteltavat tuotteet mallinnetaan kolmiulotteisen geometrian avulla (3D). Kolmiulotteista mallia voidaan hyödyntää kaksiulotteista mallia paremmin muun muassa mekaanisen laitteen toiminnan tutkimisessa ja kokoonpanossa, jossa mallinnettuja osia on virheiden havaitsemisen vuoksi tarpeellista sovittaa ennen valmistusta. Piirremallinnuksella tarkoitetaan sitä, että suunniteltavan tuotteen malli koostuu piirteistä. Aluksi luodaan peruspiirre. Peruspiirteeseen lisätään tarvittava määrä uusia piirteitä siten, että lopputuloksena on haluttu tarkka malli. Piirteet näkyvät mallin lisäksi myös niin sanotussa piirrepuussa (kuva 2). Muutoksien tekeminen on piirrepuun avulla nopeaa ja helppoa. Mallinnettavan tuotteen tärkeimmät ja toimintaan eniten vaikuttavimmat piirteet sijoitetaan ja nimetään piirrepuun yläosaan. Visuaaliset ja vähiten vaikuttavat piirteet sijoitetaan piirrepuun alaosaan. Tällaisia ovat esimerkiksi pyöristykset ja viisteet. Piirteisiin on mahdollista lisätä myös muiden valmistusprosessien tarvitsemää informaatiota. (Hietikko 2015, 23–24.)



Kuva 2. SolidWorks 3D CAD -suunnitteluohjelmiston piirrepuu ja siihen liittyvä ohutlevykappale (JL Levytekniikka Oy 2017).

Parametrisuudella tarkoitetaan sitä, että mallinnettavaan tuotteeseen kytkettyjä mittoja pystytään muuttamaan, missä tahansa suunnittelun vaiheessa, jolloin tuotteen geometria muuttuu vastaavissa määrin. Usein suunnittelun alkuvaiheessa käytössä ei ole kaikkia tarvittavia mittoja tuotteen suunnittelemiseksi, vaan ne tarkentuvat suunnittelun edetessä. Mallinnuksen epätarkat mitat voidaan tarkentaa myöhemmässä vaiheessa parametrisuuden avulla, joka helpottaa mallinnustyötä. Parametrisuuden ansiosta myös muutosten tekeminen on helpompaa. Suunniteltavaan tuotteeseen kytkettyjä mittoja voidaan muuttaa ilman, että mallin geometriaan tarvitsee koskea. Muutettu geometria muuttuu mallinnetussa tuotteessa, sekä siihen kytketyissä muissa kohteissa kuten piirustuksissa ja kokoonpanoissa. (Hietikko 2015, 23–25.)

Parametrisessa mallinnuksessa voidaan määrittää myös relaatioita mallin mittojen välille. Relaatiolla tarkoitetaan esimerkiksi sitä, että mallinnettavan tuotteen kaksi mitta ovat aina yhtä suuria, vaikka vain toista mitta muutetaan. Myös matemaattisia yhteyksiä, sekä erilaisia ehtoja, kuten samankeskisyys-, symmetria- tai yhdensuuntaisuusehtoja voidaan luoda. Nykypäivänä valtaosa, jopa yli 90 %:a kaikesta mekaniikkasuunnittelusta, tehdään parametrisella piirremallinnuksella. Nykyaikainen tuotesuunnitteluprosessi sisältää valtavasti muutoksia. Muutoksien huomioiminen on huomattavasti helpompaa, jos käytössä on parametrinen piirremallinnusjärjestelmä. (Hietikko 2015, 23–25.) Toistaiseksi piirrepohjainen 3D-mallinnus edustaa kehittyneintä mallinnustapaa, vaikkakin jotkin järjestelmätoimittajat ovat tuoneet markkinoille mallinnustavan, jota kutsutaan suoramallinnukseksi. Mallinnustapa perustuu geometrian tunnistamiseen eikä piirteisiin. (Pere 2012, 2-21.)

3.3 Ohutlevykappaleen mallintamisen keskeiset piirteet SolidWorks -ohjelmistolla

SolidWorks -ohjelmisto mahdollistaa suunnittelijoille suuren määrän ohutlevytuotteiden mallintamiseen tarvittavia työkaluja. Ohutlevymallinnuksen suurimpana hyötynä on mallinnetun kappaleen levittäminen, jolloin se on mahdollista leikata suorasta levyaihiosta. Tarvittaessa levityskuva voidaan siirtää sähköisessä muodossa leikkauskoneeseen. Ohutlevykappaleen keskeisiä piirteitä on neljä.

- Peruspiirre, eli Base Flange.
 - o Peruspiirre on ohutlevykappaleen ensimmäinen piirre, joka toimii kuten pursotuspiirre, mutta piirteeseen lisätään taivutusta varten automaattisesti nurkkapyöritykset. Pyörityksien arvot ovat muutettavissa.
- Kulmataivutus, eli Miter Flange.
 - o Luotaessa reunoja, jotka ovat tietyssä kulmassa muuhun kappaleeseen nähden, käytetään kulmataivutusta. Kulmataivutusta voidaan käyttää seuraamaan muitakin kuin suoraviivaisia reunoja. Kulmataivutus osaa tuolloin lisätä automaattisesti nurkkaleikkaukset.
- Reunataivutus, eli Edge Flange.
 - o Reunataivutuksella on mahdollista lisätä taivutuksia jo olemassa olevaan reunaan. Taivutuksen kulma voi olla mielivaltainen ja sen asema sekä pituus ovat määritettävissä.
- Liuska, eli Tab.
 - o Liuskan avulla voidaan lisätä materiaalia samalla levynpaksuudella muun mallin kanssa. Ennen liuskapiirteen käyttöä, on muoto määritettävä sketsillä. (Hietikko 2015, 197.)

Suunnittelijoiden on myös mahdollista kehittää ja osoittaa ammattipätevyyttä SolidWorks – ohjelmiston eri osa-alueiden sertifikaateilla joista voidaan mainita ohutlevysuunnittelu osaamisen sertifikaatti CSWPA-SM (Certified SolidWorks Professional Advanced Sheet Metal)

3.4 Tuotetietojen hallinta

Suunnittelussa ja tuotekehityksessä tuotetietojen hallinnalla on keskeinen merkitys. Tuotetietojen hallinnasta käytetään lyhennettä PDM (Product Data Management). Suunniteltavien tuotteiden uudelleenkäytön ja niihin liittyvien rakenteiden hallinnan kannalta on hyvin tärkeää, että tuotetietojen hallintaan liittyvät periaatteet pohditaan tarkasti ja niitä noudatetaan kurinalaisesti. (Hietikko 2015, 107.)

PDM-järjestelmän pyrkimyksenä on hallita suunnitellun tuotteen kaikkea informaatiota koko sen elinkaaren ajan. Tuotteeseen liittyvä informaatio sisältää muun muassa 3D-geometrian, piirustukset, kokoonpanon ja siihen liittyvät ohjeistukset, projektisuunnitelman, NC-ohjelmat ja tarpeen vaatiessa myös FEM-analyysin tulokset ja osaluettelot. PDM on vahvasti tuotekehitysorientoitunut järjestelmä, kun taas useasti yrityksen muiden toimintojen hallinta hoidetaan ERP (Enterprise Resource Planning) toiminnanohjausjärjestelmällä. Useasti näissä kahdessa järjestelmässä on päällekkäisiä toimintoja, jotka voivat aiheuttaa integrointipaineita. (Hietikko 2015, 107.)

PDM-järjestelmä sisältää usein viisi perustoimintoa, joista ensimmäinen on tietovarasto, eli tietoholvi, (data vault). Tietovarastoon tallennetaan kaikki dokumentit ja niiden hallinta suoritetaan sen välityksellä. Tietovarastossa dokumenttien muokkausta voi suorittaa vain yksi henkilö kerrallaan. Muutetut dokumentit talletetaan tietovarastoon aina versio- ja revisiohallinnan sääntöjen mukaisina. (Hietikko 2015, 107.)

Toisena perustoimintona on työnkulun ja prosessin hallinta. Tämän toiminnon tarkoitus on huolehtia siitä, että kaikki dokumentit ja suunnitelmat etenevät järjestelmässä oikeassa järjestyksessä ja että kaikki muutokset suoritetaan hallitusti ja sääntöjen mukaan. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että dokumentin valmistuttua, suunnittelija muuttaa dokumentin elinkaaren tilaksi ”Pending”, eli odottavaan tilaan, jonka jälkeen se tarkastetaan. Jos dokumentissa on korjattavaa, palautuu dokumentti tilaan ”In Design”, eli takaisin suunnitteluun tai jos dokumentissa ei ole korjattavaa, siirtyy se tilaan ”Released”, eli dokumentti on valmis tuotantoon. (Hietikko 2015, 107.)

Kolmantena perustoimintona on tuoterakenteen hallinta. Tuoterakenteen hallinta huolehtii muun muassa osaluetteloista, asiakaskohtaisista räätälöinneistä ja tuotteiden eri konfiguraatioista. (Hietikko 2015, 107.)

Neljäntenä perustoimintona on osien hallinta. Toiminnon tarkoitus on huolehtia standardiosien hakemisesta, käytöstä sekä valmistettavien tuotteiden uudelleenkäytöstä. (Hietikko 2015, 107.)

Viimeisenä perustoimintona on projektien hallinta. Tämän toiminnon tarkoituksena on huolehtia prosessien välisistä koordinoinneista, resurssien aikatauluttamisesta sekä projektien seurannasta. (Hietikko 2015, 107.)

3.5 Attribuuttitiedot

Tuotetiedot ovat useasti sellaisia ei-geometrisia tietoja, joita suunniteltavaan tuotteeseen syntyy tai joita kytketään siihen elinkaaren aikana. Tuotetietoja voidaan tallentaa niin sanottuina attribuuttitietoina suoraan CAD -dokumentteihin. Attribuuttitietoja on mahdollista muokata ja tarkastella dokumentin kaikissa elinkaarenvaiheissa. Tiedot voidaan myös liittää PDM- ja ERP -järjestelmiin, joissa niiden tietoja voidaan hyödyntää esimerkiksi raporteissa, nimiketiedoissa ja hauissa. (Hietikko 2015, 108.)

Attribuuttitietojen hallintaa voidaan hoitaa piirustus- tai osakohtaisesti. Kokoonpanopiirustuksien yhteyteen tulevien osaluetteloiden attribuuttitiedot tulevat suoraan mallinnettujen tuotteiden tiedoista (Hietikko 2015, 108). Tämän vuoksi on tärkeää, että kappalemallinnuksessa kaikki tarvittavat tiedot talletetaan tuotetietoihin.

Tässä työssä tarkastellaan ainoastaan tuotesuunnittelussa tuotettuja kappaleen valmistus- ja kokoonpanopiirustuksiin liittyviä attribuuttitietoja, joita hallinnoidaan SolidWorks -ohjelmistoon kuuluvilla työkaluilla. Näitä tietoja käytetään hyväksi kaikissa valmistusmenetelmissä, kuten esimerkiksi särmäyksessä valmistuspiirustuksen attribuuttitietoina. Piirustuksien perustietojen lisäksi voidaan määrittää särmäykseen vaadittavat työkalutiedot ja ohjelmanumerot.

3.6 Simulointi sekä valmistettavuuden ja kustannusten arviointi SolidWorks -ohjelmistolla

SolidWorks – ohjelmistolla on mahdollista suorittaa FEM (Finite Element Method) – analysointeja, joiden tarkoitus on tarkistaa mallinnetun levyosan muodonmuutoksia ja/tai lujuutta. Joissain tapauksissa myös muiden kuin SolidWorks – työkalulla tehtyjen lujuusanalyysien tuloksia voidaan varmistaa. SolidWorks (FEM) Simulation – ohjelmaa hyödyntäen mallinuksesta voidaan siirtyä suoraan analysointiin. Muutokset voidaan toteuttaa analysoinnin perusteella ilman, että siirrytään ohjelmasta toiseen. Simulation – ohjelma sisältää useita erilaisia laskentamoduuleja. (Hietikko 2016, 255–261.)

SolidWorks – ohjelmistolla on tarjota valmistettavuuden ja kustannusten hallintaan työkaluja, joiden avulla arvioidaan valmistettavuutta ja kustannuksia. SolidWorks Costing – sovelluksen avulla suunnittelijat voivat arvioida mallinnetun osan kustannuksia. Sovelluksen tarkkuus ei kuitenkaan riitä absoluuttiseen kustannuslaskentaan. Sovellusta käytetään pitkälti arvioitaessa vaihtoehtoisia ratkaisuja. Ohutlevyvalmistuksen kustannusarviointiin käytetään vain operaatioihin perustuvaa laskentaa. Mallinnetun kappaleen tiedoston (template) kustannusarviointi perustuu aina jokaiseen erilliseen valmistusmenetelmään. Kustannuksia voidaan vertailla konekohtaisesti ja huomioida myös alihankkijat ja heidän koneensa. (Hietikko 2016, 255–285.)

Pohjatiedostossa määritetään materiaalikoot ja niiden kustannukset sekä valmistus- ja asetuskustannukset. Kustannusanalyysi voi perustua esimerkiksi konekohtaiseen laskentapohjaan, jota muokkaamalla saadaan asetettua tarvittavat lähtötiedot. Muokkaus suoritetaan template editorilla, jolla lisätään tai poistetaan rivejä. Editorissa voidaan muokata laskentapohjaeditoria sekä materiaali-, levynpaksuus-, leikkaus- ja taivutusvaihtoehtoja. Laskentapohja on talletettavissa myös salatussa muodossa, jolloin yksikkökustannukset ovat muiden kuin tallettajan osalta piilotettuna. Yksittäisten kappaleiden lisäksi on mahdollista arvioida myös kokoonpanon kustannuksia. (Hietikko 2016, 255–285.)

SolidWorks DFMXpress – työkalulla voidaan selvittää ohutlevyjen valmistettavuutta tiettyjen sääntöjen perusteella. Yksinkertaisimmillaan analyysi on tehtävissä yhdellä komenolla, jolloin mallin sellaiset kohdat muuttuvat punaiseksi, jotka ovat hankalia tai mahdotomia valmistaa. (Hietikko 2016, 285.) Varsinaista DFMA – menetelmää selvitetään tarkemmin luvussa 6.

4 SÄRMÄYKSESSÄ KÄYTETTÄVÄT YLEISIMMÄT OHUTLEVYMATERIAALIT

Ohutlevyiksi määritetään yleisesti sellaiset levyt, joiden aineenvahvuus on alle 3 mm (Karppinen 1986, 1). Nykytiedon valossa, ohutlevytyön suunnittelussa ei ole kuitenkaan määritelty tarkkaa rajaa levyaihion aineenvahvuudelle (Piironen 2013, 25). Usein ohutlevyjen ymmärretään olevan vain kylmävalssattuja levyjä, mutta nykytekniikalla myös kuumavalssattuja levyjä on mahdollista valmistaa ohutlevyiksi. Ohutlevyäsité sisältää myös pinnanlaatuvaatimuksen ja muun muassa tässä suhteessa kylmävalssatut ja kuumavalssatut levyt erottuvat toisistaan. Kuumavalssatun pinnanlaatu poikkeaa menetelmänsä vuoksi kylmävalssatusta levystä, mutta jälkivalssauksen, viimeistelyvalssauksen tai toisin sanoen kevyellä kylmävalssauksella saavutetaan hyvä parannus pinnanlaatuun. Valssihilseen poistamisen menetelmänä käytetään peittausta, jolla valssihilse saadaan pois. Hilseen poisto jättää kuitenkin hilseestä aiheutuvat epätasaisuudet levyn pinnalle. (Karppinen 1986, 1.) Kuumavalssattuja levyjä käytetään usein tuotteissa, joiden pinnanlaatuvaatimukset ovat vähäiset (Matilainen ym. 2010, 7). Kylmävalssauksella saavutetaan, ilman edellä olevia lisämenetelmiä, hyvä pinnanlaatu ohutlevyille (Karppinen 1986, 1).

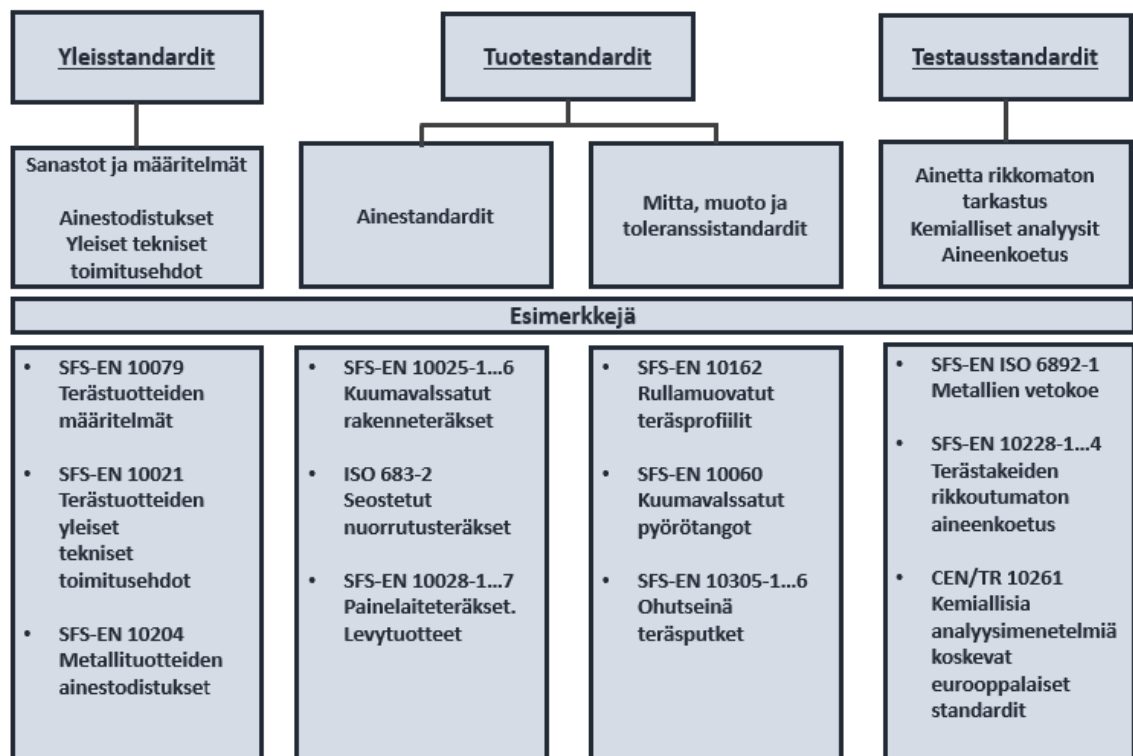
Ohutlevyteräkset jaetaan käyttötarkoituksien ja ominaisuuksien mukaan muovattaviin-, rakenne-, lujiin muovattaviin- ja erittäin lujiin muovattaviin monifaasisiin teräksiin. Muita käytettäviä ohutlevyteräksiä ovat säänkestävät teräkset, emaloitavat teräkset ja karkaistavat booriteräkset, joita käytetään erityissovelluksissa. (Matilainen ym. 2010, 7). Muovattavia teräksiä käytetään muovaavaan työstöön. Niille taataan usein vain lujuudelliset enimmäisarvot, joilla osoitetaan riittävä pehmeys ja murtovenymän vähimmäisarvot. Joissakin muovaavissa tilanteissa on tarpeen määritellä muitakin muovattavuusparametreja kuin myötölujuus $R_{p0,2}$ (N/mm²) tai murtolujuus R_m (N/mm²). (Karppinen 1986, 1.) Tällaisia voivat olla esimerkiksi särmäyksessä usein määritettävä taivutuksen sisäsäde tai vaadittava taivutusvoima F (Newton N). Rakenneteräksien käyttökohteina ovat yleisesti rakenteet, joiden kuormankantokyky on ennalta määritetty. Vaikka rakenneteräkset ovat perinteisiä muovattavia teräksiä lujempia ja niiden muodonmuutoskyky on huonompi, voidaan niitä kuitenkin ongelmitta taivuttaa esimerkiksi särmäyskoneessa (Karppinen 1986, 1). Suunniteltaessa ohutlevytuotteita, on tärkeää huomioida terästoimittajien mitatoleranssit sekä mittavalikoimat, jotta vältetään särmäyksessä valmistusteknisiltä ongelmilta.

Terästoimittajien internetsivuilta löytyy ajankohtaiset mittatoleranssit sekä mittavalikoimat. Toleranssit löytyvät myös standardeista SFS-EN 10143 ja SFS-EN 10131 (Matilainen ym. 2010, 25).

Kaupallisia teräslajeja on saatavilla noin 70 000, jonka vuoksi voi syntyä helposti ongelmalanteita teräslajien valinnassa. (Metsta 2018, 1). Standardisoinnilla tarkoitetaan yhteisten sääntöjen laatimista, jotka on luotu helpottamaan elinkeinoelämän, viranomaisten ja kuluttajien elämää. Standardit valmistellaan yhteistyössä ja ne on tarkoitettu yleiseen tai toistuvaan käyttöön. Standardi on standardisoinnista vastaavan viranomaisen, tunnustetun muun toimielimen tai järjestön hyväksymä. Standardit ovat julkaisuja, jotka on tarkoitettu kaikkien saataville. (Metsta 2018, 2.)

Keskeisiä terässtandardeja ovat ainestandardit, joilla tarkoitetaan terästuotteiden teknisiä vaatimuksia. Tällaisia ovat esimerkiksi mekaaniset ominaisuudet, kemialliset koostumukset sekä testaukset. Ainestandardit ryhmitellään terästyypin mukaan, joita ovat esimerkiksi ruostumattomat teräkset, nuorutusteräkset ja seostamattomat hitsattavat rakenneteräkset. Taulukossa 1 on esitetty teräsiin ja terästuotteisiin liittyviä standardeja. (Metsta 2018, 4.)

Taulukko 1. Teräsiin ja terästuotteisiin liittyviä standardeja (Metsta 2018, 4).



Standardien lisäksi, käytetään myös aineodistusasiakirjaa. Aineodistuksen avulla terästuotteiden valmistaja välittää tietoa käyttäjälle. Käytännössä kaikkiin metallituotteiden siirtoihin ja kauppoihin liittyy nykyään aineodistus ja useasti viranomaiset edellyttävät todistusta esimerkiksi rakenteiden tai laitteiden hyväksynnässä. (Metsta 2018, 14.)

Terässtandardien yhtenä periaatteellisena vaatimuksena on, että ne on pystyttävä varmentamaan. Teräsmateriaaleille on olemassa standardisoitu menetelmä, jotta voidaan testata ja tarkastaa vaadittu ominaisuus. Tarkastuksessa ja testauksessa pyritään käyttämään kansainvälisiä EN ISO -standardeja, joilla pyritään varmentamaan, että kaikkialla käytetään samoja menetelmiä näytteenotossa, koekappaleiden valmistuksessa ja kokeissa. (Metsta 2018, 10.)

4.1 Kylmävalssatut pinnoittamattomat ohutlevyteräkset

Mittatarkkuuden ja hyvän pinnanlaadun vuoksi kylmävalssatut pinnoittamattomat ohutlevyteräkset ovat yleisimpiä ohutlevyjä, joita käytetään ohutlevytöissä (Karppinen 1986, 2). Nykyisin tällaisia levyjä valmistetaan standardin SFS-EN 10130 mukaisesti ainevahvuusalueella 0,35–3,0 mm ja minimivalssausleveydellä 600 mm (Matilainen ym. 2010, 7). Mekaanisessa- tai laserleikkauksessa käytettävien levyaihion tyypilliset arkikoot ovat 1000 x 1000 mm, 1000 x 2000 mm, 1250 x 2500 mm ja 1500 x 3000 mm, joilla saavutetaan hyvän suunnittelun avulla levyaihion hyvä hyötykäyttö erinäisten ohutlevyosien valmistuksessa.

Standardin SFS-EN 10130 mukaan toimitetut kylmävalssatut, kylmämuovattavat ohutlevyteräkset toimitetaan pinnanlaadulla A tai B. Luokan A pinnanlaadussa voi olla huokosia, naarmuja, pieniä jälkiä sekä lieviä painaumuksia. Virheet eivät vaikuta muovattavuuteen tai pinnoitettavuuteen. Vaativammassa luokassa B, levyaihion paremmalla pinnalla ei saa olla virheitä, jotka voivat vaikuttaa visuaalisuuteen, vaativan maalauksen tai elektrolyttisen pinnoituksen jälkeen. SFS-EN 10130 mukaan pinnankarheus voi olla karhea, himmeä, puolikirkas tai kirkas. Yleisimmät pinnankarheudet ovat karhea tai himmeä. (Matilainen ym. 2010, 8.)

Kylmävalssattujen kylmämuovattavien ohutlevyteräksien teräslajit jaotellaan niiden muovattavuuden perusteella. Teräslajien DC01-DC07 välinen valinta perustuu niiden muovattavuusominaisuuksiin. DC01 on tarkoitettu taivutukseen, rullamuovaukseen ja lievään venytysmuovaukseen. DC03 on tarkoitettu vaativaan venytysmuovaukseen ja normaaliin syvävetoon. DC04 ja DC05 ovat vanhenemattomia syvävetolaatuja, jotka on tarkoitettu vaativaan syvävetoon ja venytysmuovaukseen. DC06 ja DC07 on tarkoitettu erittäin vaativiin syvävetoon ja venytysmuovaukseen. (Matilainen ym. 2010, 8.)

Standardin SFS-EN 10130 mukaisesti merkintä D tarkoittaa kylmämuovattavaa ja merkintä C kylmävalssattua. Numerot ilmaisevat muovautuvuutta, mitä suurempi luku on, sitä suurempi ja parempi muovattavuus. Esimerkiksi 01 tarkoittaa peruslaatua ja 03 syvävetolaatua. (Koivisto ym. 2010, 137.)

Vanhenemisilmiön vuoksi teräkseen aiheutuu myötöjuovia, jos tuotetta ei muovata mahdollisimman nopeasti valmistamisen jälkeen. Taulukossa 2, teräslajien DC03-DC05 myötöjuovattomuus on taattu pinnanlaaduille A ja B valmistusajankohdasta alkaen kuudeksi kuukaudeksi. DC01 – teräslajia, jota käytetään hyvin paljon särmäyksessä, myötöjuovattomuusaika pinnanlaatuluokalle B on vain kolme kuukautta ja A luokalle myötöjuovattomuusaikaa ei taata lainkaan. Vaativiin syväveto ja venytysmuovaukseen tarkoitetuilla DC06- ja DC07 – teräslajeilla, myötöjuovia ei esiinny ajan kulumisesta riippumatta. (Matilainen ym. 2010, 9.)

Taulukko 2. Viimeistelyvalssattujen teräslajien DC01-DC07 muovausparametrit, mekaaniset ominaisuudet ja niiden voimassaoloaika standardin SFS-EN 10130 mukaan (Matiainen ym. 2010, 9).

Nimike	Numerotunnus	Pinnanlaatu	Myötöjuovattomuus	R_e (MPa)	R_m (MPa)	A_{80} (min. %)	r_{90} (min)	n_{90} (min)
DC01	1.0330	A		-/280 (a)	270/410	28	-	-
		B	3 kk					
DC03	1.0347	A	6 kk	-/240 (a)	270/370	34	1,3	-
		B	6 kk					
DC04	1.0338	A	6 kk	-/210 (a)	270/350	38	1,6	0,180
		B	6 kk					
DC05	1.0312	A	6 kk	-/180 (b)	270/330	40	1,9	0,200
		B	6 kk					
DC06	1.0873	A	Rajaton	-/170 (b)	270/330	41	2,1	0,220
		B	Rajaton					
DC07	1.0898	A	Rajaton	-/150 (b)	250/310	44	2,5	0,230
		B	Rajaton					

a) Suunnittelussa voidaan käyttää teräslajien DC01, DC03, DC04 ja DC05 myötörajan R_e alarajan arvona 140 MPa.

b) Suunnittelussa voidaan käyttää teräslajin DC06 myötörajan R_e alarajan arvona 120 MPa ja teräslajin DC07 arvona 100 MPa

Standardissa on joitain lisärajoituksia taulukon arvoihin.

Suunniteltaessa ohutlevytuotteita on huomioitava, että standardin SFS-EN 10130 mukaan levyaihioiden pinnanlaadut määritetään vain toispuoleisesti. Usein valmistettaessa erilaisia ohutlevytuotteita vaatimuksena on, että levyosan pinnan parempi puoli on oltava ulkopuolella. Lisäksi myötöjuovattomuusaika on huomioitava. Ohutlevyraaka-ainetta tilitattaessa, on varmistettava, että laadulliset vaatimukset ovat raaka-aineen osalta voimassa ennen muovauksen aloitusta. Esimerkiksi särmäyksessä tällaiset vaatimukset voivat tuoda lisäkustannuksia, jos suunnittelussa ja materiaalien hankinnassa ei ole huomioitu kaikkia laadullisia vaatimuksia.

4.2 Kuumavalssatut pinnoittamattomat ohutlevyteräkset

Kuumavalssattujen ohutlevyteräksien tyypillisiä käyttökohteita ovat erilaiset koneet, ajoneuvot, nostopuomit sekä muut vaativaa kylmämuokkausta tai särmäystä vaativat rakenteet, joissa vaaditaan suurta myötölujuutta, yleisiä rakenneteräksiä parempaa muovattavuutta sekä hitsattavuutta. Kuumavalssattuja ohutlevyteräksiä toimitetaan yleisesti 2,0–3,0 mm aineenvahvuusalueella. Kuumavalssattuja teräksiä on saatavilla kuitenkin myös huomattavasti suuremmilla aineenvahvuuksilla, mutta tuolloin käsite ohutlevy ei enää pidä paikkaansa. Ohutlevytöissä käytetään paljon kuumavalssattuja muovattavia tai kuumavalssattuja erikoislujia muovattavia ohutlevyteräksiä. (Karppinen 1986, 2.)

Nykyään erilaisia kuumavalssattuja ohutlevyteräksiä valmistetaan paljon, joista esimerkiksi yksi yleisesti käytössä oleva on Pohjoismaiden suurimman teräksen tuottajan SSAB:n valmistama Domex 355MC. S355MC -rakenneteräs on erikoislujaa, tasalaatuinen ja hienorakeinen. Domex 355MC on valmistettu EN 10149-2 standardin mukaan ja materiaalille annetaan termomekaanisen valssauksen ja teräksen puhtauden ansiosta erinomaiset särmäys, leikkaus ja hitsausominaisuudet. (SSAB Ab 2018.)

Nimikkeiden rakenne koostuu päätunnuksesta, teräksen lisätunnuksesta ja terästuotteen lisätunnuksesta. Nimikkeet muodostuvat standardin SFS-EN 10027-1 mukaisesti ja teräksen numerotunnukset SFS-EN 10027-2 mukaisesti. Päätunnus kuvastaa teräksen käyttökohdetta, lisätunnus mekaanisia ominaisuuksia, kuten myötölujuutta. (Koivisto ym. 2010, 312.) Taulukossa 3 esitetään nimikkeiden merkintöjen periaatteet, joiden avulla materiaalin soveltuvuutta vaadittuun käyttökohteeseen voidaan selvittää.

Taulukko 3. Teräksien nimikejärjestelmän tulkitseminen (Metsta 2018, 20).

	Teräslaji	Laatuluokat	
Rakenneteräs	S235	JR / J0 / J2	Koelämpötila 0 °C
Ohuimman paksuus- Alueen vähimmäis- myötölujuus (MPa)	S275	JR / J0 / J2	Koelämpötila -20 °C Iskuenergia min. 40 J
	S355	JR / J0 / J2 / K2	Iskuenergia min. 27 J
	S450	J0	

Esimerkiksi SSAB:n valmistaman Domex S355MC:n nimikerakennetta tulkitaan standardin SFS-EN 10149-2 mukaan seuraavanlaisesti. Tunnus S tarkoittaa rakenneterästä. Tunnusnumero 355 kuvastaa rakenneteräksen mekaanista ominaisuutta, joka on myötölujuuden vähimmäisvaatimus (N/mm²). Myötölujuus on todettavissa SSAB:n taulukosta 4. Toimitustilatunnus M tarkoittaa termomekaanisesti valssattua menetelmää. Iso kirjain C osoittaa teräksen soveltuvan kylmämuovaukseen. Standardien tiedot ovat saatavilla Suomen standardisoimisliitolta (SFS), standardit ovat maksullisia. Domex on SSAB:n laaja ja monipuolinen rakenneteräksien tuotevalikoima, eli tuotemerkki. Taulukosta 4 voidaan todeta, että Domex 355MC:n aineenvahvuus alkaa jo 1,80 mm, vaikka yleisesti kuumavalssattujen ohutlevyteräksien aineenvahvuudet ovat 2,0–3,0 mm kuten luvun 4 alussa todettiin. Tällaiset muutokset kuvastavat kuumavalssattujen teräsohutlevyjen kysynnän jatkuvaa kasvua sekä mekaanisten ominaisuuksien vaatimuksien kiristymistä.

Taulukko 4. Domex 355 MC:n kuumavalssatun, erikoislujan kylmämuokattavan teräksen mekaaniset ominaisuudet (SSAB Ab 2018).

Paksuus (mm)	Myötölujuus R_e (min. MPa)	Murtolujuus R_m (MPa)	Venymä A_{80} ⁽¹⁾ (min. %)	Venymä A_5 ⁽²⁾ (min. %)	Pienin sisäpuolinen taivutus säde (taivutus kulma 90 °)
1.80-3	355	430-550	19	23	0.2 xt
3.01-6	355	430-551	-	23	0.3 xt
6.01-16	355	430-552	-	23	0.5 xt

Mekaaniset ominaisuudet pätevät pitkittäin valssaussuuntaan ja taivutusominaisuudet pitkittäis- ja poikittaissuunnassa.

1) Arvo A_{80} koskee paksuuksia < 3,00 mm

2) Arvo A_5 koskee paksuuksia \geq 3,00 mm

4.3 Metallipinnoitetut kylmävalssatut ohutlevyteräkset

Metallipinnoitetut kylmävalssatut ohutlevyteräkset, joita yleisimmin käytetään, ovat sinkkipinnoitettuja, sinkki-alumiiniseospinnoitettuja, sinkki-rautaseospinnoitettuja sekä elektrolyttisesti sinkkipinnoitettuja. Lukuun ottamatta elektrolyttisesti sinkkipinnoitettuja ohutlevyteräksiä, pinnoitus tehdään jatkuvatoimisella kuumaupotusmenetelmällä. Metallipinnoitetut ohutlevyteräkset toimitetaan standardin SFS-EN 10346 mukaan määritetyillä pinnanlaaduilla, jotka luokitellaan A, B ja C – luokkaan. Tavallisin pinnanlaatu on A, jossa sallitaan pintavirheitä, kuten naarmuja, pieniä koloja, kuviokoon vaihteluita, tummia pisteitä, viivamaisia jälkiä, pieniä passivointiliuostahroja sekä paikallisia karheudesta aiheutuvia jälkiä. Pinnanlaatu B on vaativampi ja se valmistetaan viimeistelyvalssaamalla. Pinnanlaadussa B sallitaan viimeistelyvalssimerkit, pienet naarmut, kukkakuvio, pienet pintavirheet kuten poikittaiset myötöjuovat, jotka syntyvät venytysoikaisussa, valumajäljet sekä lievät passivointiliuostahrat. Vaativimmassa pinnanlaadussa C, joka valmistetaan viimeistelyvalssaamalla, pinnanlaadun on mahdollistettava erinomainen maalipinta. C – laadussa vaaditaan myös vastakkaiselle pinnalle minimissään pinnanlaatu B. (Matiainen ym. 2010, 12.)

Sinkkipinnoitetussa (Z) ohutlevyteräksessä sinkin pinnoitepitoisuus on vähintään 99 %:

a. Korroosiosuoja on suoraan verrannollinen pinnoitteen paksuuteen, joka voidaan todeta taulukossa 5. Pinnoitteen paksuudella on merkitystä muovauksessa, jossa pinnoitteen tulisi olla mahdollisimman ohut. Sinkkipinnoitetta on mahdollista saada normaalikuvioisena (N) sekä pienikuvioisena (M). Normaalikuvioinen pinnoite syntyy, kun sinkin annetaan jäähmettyä vapaasti. Pienikuvioinen sinkkipinnoite tehdään erikoismenetelmillä ja sitä tehdään vain, jos normaalikuvioisen ulkonäkö ei täytä visuaalisia vaatimuksia. Sinkkipinnoitteen kuvio ei vaikuta pinnoitteen laatuun. (Matilainen ym. 2010, 13.)

Taulukko 5. Sinkkipinnoitevaihtoehtojen massa ja paksuus (Matilainen ym. 2010, 14).

Pinnoitteen tunnus	Pinnoitteen massa ¹⁾ (g/m ²)	Pinnoitteen paksuus ²⁾ (µm)
Z100	100	7
Z140	140	10
Z200	200	14
Z225	225	14
Z275	275	20
Z350	350	25

1) Massa tarkoittaa levyn molempien puolien pinnoitteiden yhteismassaa.

2) Pinnoitteen yhdenpuolen ohjeellinen paksuus.

Alaluvun 4.3 tiedosta poiketen, sinkkipinnoitettua (Z) teräslevyä on saatavilla myös kuumavalssattuna. Eräät terästoimittajat tarjoavat esimerkiksi 4,0 mm DX51D-275MAC RoHsin mukaista teräslevyä. Aineenvahvuuden vuoksi, materiaali ei tosin täytä ohutlevyteräksen määritelmää.

Sinkki-alumiiniseospinnoitetut (ZA) ohutlevyt tunnetaan kauppanimellä Galftan. Pinnoitteessa on 95 %:a sinkkiä ja 5 %:a alumiinia. Muovattavuus on alumiiniseoksen ansiosta parempi kuin sinkkipinnoitteisessa ohutlevyteräksessä. Kuten sinkkipinnoitetussa ohutlevyssä, myös sinkki-alumiiniseospinnoitetussa ohutlevyssä, liian suuret pinnoitepaksuudet hankaloittavat muovausta, jonka vuoksi pinnoitepaksuus valitaan muovausvaatimusten mukaan (taulukko 6). Sinkki-alumiiniseos on kiiltoiltaan metallinen, pinnassa olevat erikokoiset ja kiilloiset kiteet eivät vaikuta pinnoitteen laatuun. (Matilainen ym. 2010, 13.)

Taulukko 6. Sinkki-alumiiniseospinnoitevaihtoehtojen massa ja paksuus (Matilainen ym. 2010, 15).

Pinnoitteen tunnus	Pinnoitteen massa ¹⁾ (g/m ²)	Pinnoitteen paksuus ²⁾ (μm)
ZA095	95	7
ZA130	130	10
ZA185	185	14
ZA200	200	15
ZA255	255	20
ZA300	300	23

1) Massa tarkoittaa levyn molempien puolien pinnoitteiden yhteismassaa.

2) Pinnoitteen yhdenpuolen ohjeellinen paksuus.

Sinkki-rautaseospinnoitteessa (ZF) rautapitoisuus on 8-12 %: a. Pinnoite tunnetaan kauppanimellä Galvannealed. Rautapitoisuus saadaan sinkityksen jälkeen aikaiseksi lämpökäsittelyllä, jossa rauta diffundoituu sinkkipinnoitteeseen. Ulkonäöltään pinnoite on kuvioton, himmeä ja tasaisen harmaa. Taulukossa 7 todetaan, että pinnoitepaksuudet eivät ole kovin suuria, koska pinnoite on tarkoitettu maalattavaksi. (Matilainen ym. 2010, 14.)

Taulukko 7. Sinkki-rautaseospinnoitevaihtoehtojen massa ja paksuus (Matilainen ym. 2010, 15).

Pinnoitteen tunnus	Pinnoitteen massa ¹⁾ (g/m ²)	Pinnoitteen paksuus ²⁾ (μm)
ZF100	100	7
ZF120	120	8
ZF140	140	10

1) Massa tarkoittaa levyn molempien puolien pinnoitteiden yhteismassaa.

2) Pinnoitteen yhdenpuolen ohjeellinen paksuus.

Metallipinnoitettujen kylmävalssattujen ohutlevyteräksien yhtenä päätarkoituksena on parantaa korroosionsuojaa sellaisissa tuotteissa, joita ei esimerkiksi maalata. Taulukoissa 8-10 on kuvattu sinkki-, sinkki-alumiiniseos- ja sinkki-rautaseospinnoitteiden erilaiset pinnanlaatu-, pinnoite- ja kuviotyypit.

Taulukko 8. Sinkkipinnoitteiden pinnanlaatu-, pinnoite- ja kuviotyyppi (Matilainen ym. 2010, 15).

Pinnoitteen tunnus ^a	N	M		
	Pinnanlaatu ^a			
Sinkkipinnoitteet (Z)				
Z100	A	A	B	C
Z140	X	X	X	X
Z200	X	X	X	X
Z225	X	X	X	X
Z275	X	X	X	X
(Z350)	(X)	(X)	-	-
(Z450)	(X)	(X)	-	-
(Z600)	(X)	(X)	-	-

a) Suluissa esitetyistä pinnoitteista ja pinnanlaaduista on sovittava erikseen kyselyn ja tilauksen yhteydessä.

Taulukko 9. Sinkki-alumiiniseospinnoitteiden pinnanlaatu-, pinnoite- ja kuviotyyppi (Matilainen ym. 2010, 16).

Pinnoitteen tunnus	Pinnanlaatu		
	A	B	C
Sinkki-alumiinipinnoitteet (ZA)			
ZA095	X	X	X
ZA130	X	X	X
ZA185	X	X	X
ZA200	X	X	X
ZA255	X	X	X
ZA300	X	-	-

Taulukko 10. Sinkki-rautaseospinnoitteiden pinnanlaatu-, pinnoite- ja kuviotyypit (Matilainen ym. 2010, 16).

Pinnoitteen tunnus	Pinnanlaatu		
	A	B	C
Sinkki-rautaseospinnoitteet (ZF)			
ZF100	X	X	X
ZF120	X	X	X

Elektrolyttinen sinkkipinnoite (ZE) tehdään nimensä mukaisesti elektrolyttisesti käyttäen sähkövirtaa sekä sinkki-suolaseosta (Matilainen ym. 2010, 20). Usein pinnoitteesta käytetään myös nimitystä sähkösinkitys.

Sähkösinkittyjä ohutlevyjä ei ole pienen pinnoitepaksuuden vuoksi tarkoitettu ulkokäyttöön ilman erillistä jatkokäsittelyä, kuten maalausta. Taulukossa 11 on esitetty sähkösinkittyjen ohutlevyteräksien pinnoitemassoja ja paksuuksia. (Matilainen ym. 2010, 20.)

Taulukko 11. Elektrolyttiset sinkkipinnoitteet (Matilainen ym. 2010, 20).

Pinnoitetunnus	Pinnoitteen nimellismassa kummallakin puolella		Pinnoitteen vähimmäismassa kummallakin puolella	
	Paksuus (μm)	Massa (g/m^2)	Paksuus (μm)	Massa (g/m^2)
ZE25/25	2,5	18,0	1,7	12,0
ZE50/50	5,0	36,0	4,1	29,0
ZE75/75	7,5	54,0	6,6	47,0
ZE100/100	10,0	72,0	9,1	65,0

Sähkösinkittyjen ohutlevyjen pinnanlaadut A ja B toimitetaan standardin SFS-EN 10152 mukaan. Pinnanlaadulla A sallitaan virheet, kuten naarmut, väri vaihtelut, huokokset, pienet painaumat sekä valssausmerkit, jotka eivät vaikuta pinnoitteen toimivuuteen tai muovattavuuteen. (Matilainen ym. 2010, 20.)

Laadussa B ei sallita sellaisia pintavirheitä, jotka maalauksen jälkeen vaikuttavat yhteisestä ulkonäköä heikentävästi. Toisen puolen pinnanlaatu on oltava vähintään A. Pinnoitteet pysyvät yleensä muovauksen yhteydessä hyvin kiinni, jos ei tapahdu ylimuokkausta. Ylimuokkaus voi aiheuttaa pinnoitteen pulverisoitumista. (Matilainen ym. 2010, 20–21.)

Taulukkoon 12 on luetteloitu standardin SFS-EN10152 mukaiset pinnanlaatuvaltuudet, mekaaniset ominaisuudet sekä muovattavuusparametrit. (Matilainen ym. 2010, 20–21.) Kuten aikaisemmin todettiin, teräkseen aiheutuu vanhenemisilmiön vuoksi myötöjuovia, jos tuotetta ei muovata mahdollisimman nopeasti valmistamisen jälkeen. Vanhenemisilmiöstä aiheutuvien myötöjuovien myötöjuovattomuusaika on myös havaittavissa taulukosta 12.

Taulukko 12. Viimeistelyvalssattujen teräslajien DC01-DC07 muovausparametrit, mekaaniset ominaisuudet sekä niiden voimassaoloaika standardin SFS-EN 10152 mukaan (Matilainen ym. 2010, 21).

Nimike	Numero-tunnus	Pinnan-laatu	Myötö-juovatto-muus	Re (MPa)	Rm (MPa)	A ₈₀ (min. %)	r ₉₀ (min)	n ₉₀ (min)
DC01	1.0330	A		-/280	270-410	28	-	-
		B	3 kk					
DC03	1.0347	A, B	6 kk	-/240	270-370	34	1,3	-
DC04	1.0338	A, B	6 kk	-/220	270-350	37	1,6	0,170
DC05	1.0312	A, B	6 kk	-/220	270-330	39	1,9	0,190
DC06	1.0873	A, B	Rajaton	-/180	270-350	41	2,1	0,210
DC07	1.0898	A, B	Rajaton	-/160	250-310	43	2,5	0,220

Standardissa joitain rajoituksia taulukon arvoihin.

4.4 Ruostumattomat teräkset

Rautaseospohjaisia teräksiä, joiden kromi pitoisuus (Cr) on vähintään 10,5 %:a, pidetään ruostumattomina teräksinä. Kromin lisäksi muita yleisiä seosaineita ovat muun muassa nikkeli, molybdeeni ja typpi, joiden avulla korroosiokestävyyttä voidaan parantaa. Hyvä korroosionkestävyys saadaan aikaiseksi hyvin ohuen kromioksidikerroksen ansiosta, joka muodostuu teräksen pinnalle. Kromioksidikerrosta kutsutaan myös passivaatiokerrokseksi. Kerroksella on rikkoutuessaankin hapettavissa olosuhteissa uusiutumiskyky. Ruostumattomien teräksien käyttäjiä ovat muun muassa prosessi-, elintarvike-, kotitaloustarvike- ja kuljetusvälineiteollisuus. Lisäksi energiatuotanto ja rakennusteollisuus ovat ruostumattoman teräksen merkittäviä käyttäjiä. Tärkeimmät standardit ovat EN 10088-2 ja EN 10028-7 sekä amerikkalaiset ASTM:n mukaiset standardit A 167 ja A 480. (Koivisto ym. 2010, 144.) Liitteessä 1 esitellään yleisimpien ruostumattomien teräksien kemialliset koostumukset, kuvaukset ja tärkeimmät mekaaniset ominaisuudet standardin SFS-EN 10088-2 mukaisesti.

Pääryhmiä, joihin ruostumattomat teräkset jaetaan metallin kiderakenteen mukaan, on yhteensä neljä: austeniittiset-, ferriittiset-, austeniittis-ferriittiset, (dublex) ja martensiittiset ruostumattomat teräkset. (Koivisto ym. 2010, 144.) Pääryhmistä käsitellään yleisimmät Austeniittiset ja austeniittis-ferriittiset teräslajit.

Käytetyimmät ruostumattomat teräkset kuuluvat austeniittisiin ruostumattomiin teräksiin, joita voidaan kutsua myös ruostumattomiksi yleisteräksiksi. (Koivisto ym. 2010, 146.) Austeniittisten CrNi-teräslajien tyypillinen seostus on 18 % kromia (Cr) ja 8 % nikkeliä (Ni). Yleisimmät CrNi-peruslajit ovat EN 1.4301, 1.4307 ja 1.4541. Paremmat lujuusarvot täyttävän EN 1.4318 Cr- ja Ni-pitoisuudet ovat yleisempiä teräslajeja alhaisemmat, mutta tyyppipitoisuus (N) on korkeampi. Korkeissa lämpötiloissa käytetään yleisesti teräslajia EN 1.4541, johon on seostettu pieni määrä titaania (Ti) parantamaan lujuusarvoja. (Matilainen ym. 2010, 30.)

Austeniittiset CrNiMo-teräslajit, eli toisin sanoen haponkestävät teräkset on seostettu tyypillisesti: 18 % Cr, 10 % Ni ja 2-3 % (Molybdeeni) Mo. Haponkestävien teräksien peruslaatuna käytetään EN 1.4404: ää. Muita yleisimpiä laatuja ovat EN 1.4401, 1.4571 ja 1.4432. EN 1.4571 laatu sisältää titaania (Ti), jonka tarkoituksena on parantaa lujuusarvoja korkeissa lämpötiloissa. (Matilainen ym. 2010, 30.)

Meri-ilmastossa ja vaativissa teollisuusympäristöissä käytetään yleisesti EN 1.4432 laatua, jonka molybdeeni (Mo) määrä on suurempi kuin muiden edellä mainittujen teräslajien. Molybdeenin tarkoitus on parantaa pistekorroosion kestävyttä materiaalissa. (Matilainen ym. 2010, 30.)

Austeniittisten CrMn-teräslajien tyypillinen seostus on 17 % Cr, 4 % Ni, 7 % (Mangaani) Mn ja 0,20 % N. Näiden teräslajien nikkelpitoisuus on vähäisempi kuin muiden austeniittisten teräslajien. Nikkeliä on korvattu mangaanilla ja typellä, jotta austeniittinen kiderakenne on pystytty säilyttämään. Teräslajin EN 1.4372 muovattavuus ja korroosionkestävyys ovat lähes samalla tasolla kuin teräslajin EN 1.4301. EN 1.4372 omaa kuitenkin paremmat lujuusominaisuudet. (Matilainen ym. 2010, 30.)

Austeniittis-ferriittisiä-teräslajeja kutsutaan myös duplex-lajeiksi. Tyypillinen duplex-seostus on 22 % Cr, 4 % Ni ja 3 % Mo. Duplex-teräslajien seospitoisuudet määräytyvät pääasiallisesti korroosioympäristön vaatimuksien mukaan. Yleisesti mainittavia duplex-teräslajeja ovat EN 1.4362, 1.4462 ja 1.4410, joita käytetään muun muassa meriympäristössä sekä prosessilaitteissa. Duplex-teräksien etuna voidaan pitää suurta mekaanista lujuutta, joka on lähes kaksinkertainen hehkutettuihin austeniittisiin teräslajeihin verrattuna. (Matilainen ym. 2010, 31.)

4.5 Muokattavat alumiiniseokset

Alumiinia esiintyy maapallon maankuoressa noin 8 %: a. Alkuaineena alumiini on kolmanneksi yleisin ja sitä esiintyy maankuoressa metalleista eniten. Alumiinia valmistetaan pääasiallisesti vain bauksiitista, joka on rapautumisen tuloksena syntynyt kivilaji. (Koivisto ym. 2010, 163.) Alumiinia käytetään nykyään erittäin paljon muun muassa keveyden, hyvän korroosionkeston ja lujuuden vuoksi. Lujuudet alumiinissa vaihtelevat erittäin pehmeästä aina erittäin lujaan, lisäksi sitkeysominaisuudet säilyvät alhaisissakin lämpötiloissa. Puhdasta alumiinia seostamalla saavutetaan paljon haluttuja ominaisuuksia teollisuuden erilaisiin kohteisiin. Alumiinin pinta on hyvin herkkä naarmuuntumaan, jonka vuoksi muun muassa särmäyksessä pinnansuojaus on huomioitava tarkemmin kuin teräslevyjen särmäyksessä. Alumiinien käyttöä rajoittavat jonkin verran alhainen kuuma-lujuus, pieni väsymislujuus sekä pieni virumislujuus. Myös alumiinin ailahtelevat markkinahinnat aiheuttavat joitakin rajoitteita. (Matilainen ym. 2010, 60–61.)

Muokattavia alumiineja koskevat standardit SFS EN 573-1-4. Nimikejärjestelmä koostuu seuraavanlaisesti.

- EN
- tyhjä väli
- kirjain A, joka ilmaisee materiaalin olevan alumiinia
- kirjain W, joka kertoo alumiinin olevan muokattua
- väliviiva
- neljän numeron sarja, joiden tarkoitus on ilmaista kemiallinen koostumus
- kirjain, joka ilmaisee tarvittaessa kansallisen poikkeaman

Nimikejärjestelmän esimerkki: EN W-3103 tai EN W-4043A, jossa kirjain A ilmaisee kansallisen poikkeaman. Nelinumeroisen sarjan ensimmäinen numero ilmaisee seosryhmän pääseosaineen. (Koivisto ym. 2010, 168–171.) Seosryhmiä on kahdeksan jotka ovat luetteloituna taulukkoon 13.

Taulukko 13. Alumiiniseokset ryhmiteltynä pääseosaineen mukaan (Koivisto ym. 2010, 168). Taulukossa esitetty myös yleisimmät kauppalaadut (Matilainen ym. 2010, 61).

Pääseosaine	Kemiallinen merkki	Sarja	Ryhmätunnus	Yleisimmät kauppalaadut
Alumiinia vähintään 99,00 %	Al	1xxx	1000-sarja	AW 1050A
Kupari	Cu	2xxx	2000-sarja	AW 2024
Mangaani	Mn	3xxx	3000-sarja	AW 3103, AW 3003, AW 3105
Pii	Si	4xxx	4000-sarja	AW 4017
Magnesium	Mg	5xxx	5000-sarja	AW 5754, AW 5005, AW 5083, AW5049
Magnesium ja pii	Mg ja Si	6xxx	6000-sarja	AW 6063, AW 6082, AW 6101
Sinkki	Zn	7xxx	7000-sarja	AW 7075, AW 7108
Muut seosaineet	Esim. Fe (rauta) tai Li (litium)	8xxx	8000-sarja	AW 8006, AW 8011A

Seostaulukoissa esiintyy lisäksi kemialliseen koostumukseen perustuvia nimikkeitä. Nimi järjestyksen alku on sama EN AW, jonka jälkeen ilmoitetaan lyhenne Al, joka ilmaisee kyseessä olevan alumiiniseos. Tyhjän välin jälkeen, ilmoitetaan seosainepitoisuudet suurimmasta pitoisuudesta pienimpään. Seosainepitoisuudet ilmaistaan kemiallisella merkillä ja pitoisuus prosentteina. Yleisesti alle 1 % pitoisuuksia ei ilmoiteta. Kemialliseen koostumukseen perustuva nimike ilmaistaan esimerkiksi EN AW-A1Cu4SiMg tai EN AW-EA199,5, jossa kirjain E, Al-alumiiniseos merkinnän edessä, ilmaisee seoksen olevan tarkoitettu sähkökäyttöön. (Koivisto ym. 2010, 168.) Vaikka kaikki muokattavat alumiiniseossarjat käydään läpi, eivät kaikki niistä sovellu särmäykseen.

Muokattavat alumiiniseokset jaetaan karkeneviin seoksiin ja karkenemattomiin seoksiin. Yleisesti karkenemattomista seoksista valmistetaan valssattuja tuotteita, kuten levyjä, nauhoja ja folioita. Karkenemattomiin/valssauslujittuviin kuuluvat 1000-, 3000-, 4000-, 5000- ja 8000 – sarjan seokset, joita käytetään esimerkiksi särmäyksessä. Karkenevat/lämpölujittavat seokset kuuluvat 2000-, 6000- ja 7000 – sarjaan ja niistä valmistetaan muun muassa pursotettuja profiileja. (Matilainen ym. 2010, 61–64.)

Alumiiniseoksia tiedetään maailmassa olevan lukematon määrä. Lopputuotteelta vaadittavat ominaisuudet vaikuttavat seoksien valintaan. Lisäksi kaupallinen saatavuus asettaa omat haastavuutensa valintakriteerien täyttämiseen. Yleiskattavaa taulukkoa alumiinien mekaanisista ominaisuuksista ja seoksista on hankala esittää niiden muokkaus- ja lämpökäsittelyhistorian sekä aineenvahvuuksien vuoksi. Standardissa SFS-EN 485-2 esitetään kuitenkin alumiiniseosten yleisimpien toimitustilojen ja kauppalaatujen mekaanisia ominaisuuksia. Standardi SFS-EN 485-2 käsittää kaikkien levy- ja nauhatuotteiden mekaaniset ominaisuudet liitteessä 2. (Matilainen ym. 2010, 61–64.)

Alumiiniseosryhmän 1000 – sarja koostuu pääasiallisesti seostamattomista alumiineista, joiden puhtaus on vähintään 99,00 %. 1000 – sarjan alumiineja käytetään esimerkiksi koneiden ja laitteiden osissa, liikennemerkkikilvissä, sähkönjohtimissa sekä folioissa ja erinäisissä pakkauksissa. (Matilainen ym. 2010, 62.)

2000 – sarjan alumiinit ovat Al-Cu seoksia. Kyseisiä seoksia sanotaan duralumiiniksi, eli toisin sanoen duraaleiksi. Kuparin (Cu) lisäksi seosaineena on yleisesti magnesiumia (Mg), piitä (Si) sekä mangaania (Mn). Duraaleja käytetään erityisesti lentokoneen-, ja koneenrakennuksessa. 2000 – sarjan seokset ovat erittäin lujia, niiden murtolujuus (R_m) on $> 400 \text{ N/mm}^2$. Suomessa käytetyimmät duraalit ovat EN AW-2017A ja EN AW-7050. (Koivisto ym. 2010, 169.) Al-Cu käyttöhistoria tunnetaan parhaiten NASA:n materiaalikehityksen eri vaiheista (Matilainen ym. 2010, 62).

3000 – sarjan alumiinit koostuvat Al-Mn seoksista. Mangaani (Mn) lisää alumiinin lujuutta pitämällä kuitenkin korroosiokestävyyden hyvänä. 3000 – sarjan seoksia käytetään rakennusteollisuudessa, muun muassa julkisivuelementeissä, poimulevyissä sekä kuljetusvälineiden ja konttien peitelevyissä. Yleisimmät käytössä olevat lajit ovat EN AW-6061 ja EN AW-6082. (Koivisto ym. 2010, 169.) Seoksia käytetään myös lämmönvaihtimissa ja autojen jäähdyttimissä (Matilainen ym. 2010, 62).

4000 – sarjan alumiinit on seostettu piillä (Si). Useimmiten Al-Si seoksia käytetään hitsauslankoina, juottolankoina, lämmönvaihtimissa ja autojen jäähdyttimissä. Käytetyimmät seokset ovat EN AW-4043A ja EN AW-4047A. Yleisimmin 4000 – sarjan seos sisältää piitä (Si) 5 %. (Koivisto ym. 2010, 169.) 4000 – sarjan alumiinia voidaan lujittaa piiseostuksella (Si) 12,5 %:iin asti (Matilainen ym. 2010, 62).

5000 – sarjan alumiineja kutsutaan yleisesti ”merialumiineiksi”, seosaineena on Magnesium (Mg). Al-Mg seosten magnesiumpitoisuuden ovat alueella 0,5-5,5 %: a. (Koivisto ym. 2010, 170.) Jotta 5000 – sarjan alumiiniseos olisi meriveden kestävä, pitää magnesiumia kuitenkin olla vähintään 3 % (Matilainen ym. 2010, 62). Magnesiumpitoisuutta lisäämällä parannetaan lujuutta, mutta samalla muovattavuus heikkenee. 5000 – sarjan lujuusominaisuuksia voidaan lisäksi parantaa lisäämällä seoksiin joitakin määriä mangaania (Mn) tai kromia (Cr). Yleisesti käyttökohteina ovat veneet, laivat, LNG-säiliöt ja erinäisten joukkoliikennevälineiden korien rakenteet. Seosmateriaaleina ovat tavallisesti EN AW-5754 ja EN AW-AMg3 sekä esimerkiksi pallosäiliöissä EN AW-5083 tai EN AW-AMg4,5Mn0,7. 5000 – sarjan seokset ovat saatavilla myös muokkauslujitettuna toimitustiloina. (Koivisto ym. 2010, 170.)

6000 – sarjan Al-Mg-Si-alumiiniseoksia käytetään yli 80 %:sesti profiilien valmistamiseen pursotusmenetelmällä. Hyvien sitkeys-, lujuus, ja väsymislujuus ominaisuuksien lisäksi, 6000 – sarjan alumiiniseoksilla hitsattavuus, työstettävyys sekä anodisoitavuus ovat erinomaiset. Yleisimmät käyttöalueet ovat julkisivu-, ikkuna- ja ovirakenteet sekä huonekalut ja auton osat. (Matilainen ym. 2010, 62.)

7000 – sarjassa pääseosaineena on sinkki (Zn). Sinkki seosaineena mahdollistaa suuret lujuusarvot. Lujuusarvoja voidaan kasvattaa lisäämällä joitakin määriä kuparia (Cu) sekä magnesiumia (Mg). 7000 – sarjan alumiiniseos on taipuvainen jännityskorroosiolle, tyypillisesti käyttökohteina ovat autojen puskurit, sillat, vaativat hitsatut rakenteet sekä avaruus- ja lentokoneteollisuuden erilaiset osat. (Matilainen ym. 2010, 62–63.) Seosmateriaaleina tällaisissa kohteissa ovat yleensä EN AW-7020 ja EN AW-Al4,5Mg1. Lisäämällä 1-2 %:a kuparia Al-Zn-Mg seokseen, saadaan 7000 – sarjasta yhden lujimmista käytössä olevista alumiiniseoksista (Koivisto ym. 2010, 170).

8000 – sarjaan kuuluvat kaikki ne muut seostyytit, jotka eivät sisällyneet aikaisemmin esitettyihin seossarjoihin. Yleisin 8000 – sarjaan kuuluva seosaine on rauta (Fe). Toinen, hieman harvinaisempi seosaine on litium (Li). Litiumseostuksella saadaan pieni tiheys, suuri lujuus sekä korkea kimmokerroin. Litiumseostettua alumiinia käytetään muun muassa avaruuslaite- sekä lentokonerakentamisessa (EN AW-8090, EN AW-ALi25Cu1,5Mg1). Muita mainittavia 8000 – sarjan seoksia on EN AW-8011A. (Koivisto ym. 2010, 170.)

Alumiinien valmistusprosessi on samankaltainen kuin terästuotteiden valmistusprosessi. Sulatuksesta tullut aihio kuumavalssataan sekä lopuksi kylmävalssataan haluttujen ominaisuuksien, aineenvahvuuksien sekä pinnanlaatujen tavoittamiseksi. Alumiinituotteet toimitetaan haluttaessa levyinä, keloina tai nauhoina, toisin sanoen leikattuina rainoina. (Matilainen ym. 2010, 81.) Särmättäessä alumiinilevyä on huomioitava oikea taivutussäde suhteessa aineenvahvuuteen. Vaikka alumiinilevyä voidaan useasti muovata ja särmätä kylmänä ilman murtumisen vaaraa, pitäisi koetaivutuksilla aina käytännössä varmistaa särmäysprosessin toimivuus ja hallittavuus, jotta lopputuloksena olisi onnistunut ja laadullisesti hyväksyttävissä oleva prosessi. Alumiinien särmääminen on parhaimmillaan pehmeässä, hehkutetussa tilassa. Kylmämuokkaus heikentää taivutettavuutta, jolloin myös takaisinjousto on kiinnitettävä erityistä huomiota. (Matilainen ym.2010, 77–78.) Taulukossa 14 esitetään eri alumiiniseosten takaisinjousto eri taivutussäteillä.

Taulukko 14. Eri alumiiniseoksien takaisinjousto eri taivutussäteillä (Matilainen ym. 2010, 78).

Seos	Toimitustila	R _{p0,2} (MPa)	Takaisinjoustotekijä (k)	
			R/t = 1	R/t = 10
1050A	0	35	0,99	0,98
	H14	105	0,98	0,93
3103	0	50	0,99	0,97
	H14	145	0,98	0,90
2014	0	85	0,99	0,92
6082	0	60	0,98	0,93
R = Haluttu taivutussäde				
t = Materiaalin paksuus				

Taulukossa 15 esitetään alumiinilevyjen ja -nauhojen paksuustoleranssit, jotka on myös huomioitava suunniteltaessa alumiiniseosten särmäystä.

Taulukko 15. Alumiinilevyjen ja -nauhojen paksuustoleranssit (Matilainen ym. 2010, 81).

Levyjen ja nauhojen paksuustoleranssit						
Nimellispaksuus		Paksuustoleranssit nimellislevyvedellä				
Yli	Enintään	Enintään 1250	Yli 1250 ja enintään 1600	Yli 1600 ja enintään 2500	Yli 2000 ja enintään 2500	Yli 2500 ja enintään 3500
≥ 2,5	4	± 0,28	± 0,28	± 0,32	± 0,35	± 0,40
4	5	± 0,30	± 0,30	± 0,35	± 0,40	± 0,45
5	6	± 0,32	± 0,32	± 0,40	± 0,45	± 0,50
6	8	± 0,35	± 0,40	± 0,40	± 0,50	± 0,55

4.6 Muut särmättävät materiaalit

Särmäyksessä käytetään nykyään hyvin paljon myös muita materiaaleja kuin mitä edellä käsiteltiin. Tällaisia materiaaleja ovat muun muassa kuparit ja kupariseokset, läkkilevyt, erilaiset muovit, verkkolevyt, ruostumattomat jousiteräsmateriaalit ja valmiiksi maalatut teräsohutlevyt. Esimerkkinä käsitellään lyhyesti kupari, kupariseoksiin kuuluvat messinki ja tinapronssi sekä läkkilevy (tinattu teräsohutlevy) ja muoveista polykarbonaatti (PC) ja polyvinyylikloridi (PVC-TF). Lisäksi käsitellään yleisesti verkko- ja teräsreikälevyjä, valmiiksi maalattuja tai muovipinnoitettuja ohutlevyjä sekä viimeisenä yleisesti käytössä oleva ruostumaton jousiteräsmateriaali.

Myös kupari ja erilaiset kupariseokset ovat särmäyksessä useasti käytetty materiaali. Kuparia ja kupariseoksia ohjaa standardi SFS-EN 1652 (Koivisto ym. 2010, 177). Erilaisia kuparilaatuja ovat puhdistetut kuparit, joita ovat happipitoiset kuparit (sitkot kuparit), kuten liekkipuhdistettu Cu-FRTP sekä elektrolyttisesti puhdistettu Cu-ETP. Tällaisia kupareita käytetään sähkönjohtotarkoitukseen tai kattolevyihin, pellityksiin ja räystäskouruihin. Koska nämä kuparilaadut sisältävät happea 0,02-0,06 %, ne eivät sovellu vetysairauden riskin vuoksi hitsaukseen tai hehkutukseen. (Koivisto ym. 2010, 177.)

Särmäyksessä käytetään myös deoksidoitua (fosforoitua) kuparia, jota on kahta erilaista laatua. Cu-DLP sisältää fosforia 0,005-0,012 %:a ja Cu-DHP sisältää fosforia 0,015-0,050 %:a (Koivisto ym. 2010, 177). Deoksidoituvat kuparit ovat hitsattavia kupareita ja niiden muokkauslujittuminen heikkenee juottamisessa vain vähän. Yleisimmät käyttökohteet ovat lämmönsiirtimet sekä erilaiset prosessiteollisuuden osa-alueet. Kauppanimillä voidaan mainita SFS 2907 Cu-DHP-H065 puolikova (tunnus K2-04) tai Cu-DHP-H040 pehmeä (tunnus K2-02), joista puolikovaa käytetään särmäyksessä eniten. (Koivisto ym. 2010, 177.)

Puhdistettuihin kupareihin kuuluu myös hapeton (johto) kupari Cu-OF. Tällaisia kupareita kutsutaan happivakaaiksi elektrolyttikupareiksi. Cu-OF on laadultaan hyvin sähköjohtava ja sillä on paremmat mekaaniset ominaisuudet kuin edellä mainituilla laaduilla. Elektrolyttisesti puhdistettu Cu-OF valmistetaan hiilipeitteen alla ja valaminen tapahtuu suoja-kaasussa. (Koivisto ym. 2010, 177.) Kyseistä kuparilaatua käytetään hyvin paljon sähkölaiteteollisuudessa, jonka vuoksi se on myös hyvin yleinen materiaali särmäyksessä. Kauppanimenä on muun muassa CU-OF (tunnus K1E). (Koivisto ym. 2010, 177.)

Seostetuiksi kupareiksi kutsutaan kupareita, joihin seostetaan vähintään 2,5 %:a jotakin seosainetta. Seostusta tehdään, jotta kuparille saadaan parempi lujuus, korotettua pehmenemislämpötilaa sekä virumislujuutta. Myös lastuttavuutta pyritään seostuksella lisäämään. Yleisesti tunnettu kupariseos on messinki. Messinki on kuparin (Cu) ja sinkin (Zn) seos, jossa kuparia on vähintään 50 %: a. Koska sinkki liukenee kupariin noin 38 %:iin asti, messingin hilarakenne pysyy kuparin kaltaisena. Messingin rakennetta kutsutaan α -messingiksi. Messingeille ominaisinta on kellertävä väri, joka vaihtelee sinkkipitoisuuden mukaan. Suomalaisissa standardeissa on viisi seostamatonta α -messinkiä, joita ovat CuZn10, CuZn15, CuZn20, CuZn30 ja CuZn37. (Koivisto ym. 2010, 177.) Puolikovaa CuZn37 -seosta käytetään särmäyksessä eniten ja käyttökohteina ovat erilaiset sisäarakenteiden materiaalit ja sähköalan tarvikkeet. Kauppanimenä on esimerkiksi SFS 2919 CuZn37-04 (Tunnus MS63-04) puolikova.

Särmäyksessä käytetään myös tinapronssia. Yleisesti tinapronssi tunnetaan kuparin ja tinan seoksena. Muokattavissa tinapronsseissa tinaa (Sn) on 4, 6 tai 8 %: a. Yli 5 % tinaseoksilla korroosionkestävyys suurenee ja ne kestävät merivettä ja happamia olosuhteita. Hyvän kylmämuokkauksen ansiosta alle 11 %:a tinalla seostettu tinapronssi lujittuu nopeasti ja käyttökohteina ovatkin sähkötarvikkeiden sekä elektroniikkateollisuuden jousi ja kosketintuotteet. Tinapronssin rakenne on sama kuin kuparin. Yli 5 %:a tina-seoksella tinapronssi on kuparimetalleista kestävin. (Koivisto ym. 2010, 177.) Jousikovan tinapronssin kauppanimi on esimerkiksi SFS 2933 CuSn6-07 (Tunnus TP 107-07), jota käytetään särmäyksessä paljon.

Särmäyksessä käytetään materiaalina myös läkkilevyä. Läkkilevy on elektrolyyttisesti tinnattu teräsohutlevy, jonka ainevahvuudet ovat pääsääntöisesti 0,16–0,49 mm. Läkkilevyä käytetään yleisesti elektroniikkateollisuuden erinäisissä sovelluksissa. Materiaalina se on hyvin juotettavissa ja tämän vuoksi useasti myös suosittu materiaali elektroniikkateollisuudessa. Läkkilevyä on yleisesti saatavilla lujuudella (Standardi AISI/ASTM 623) T3-T4 jossa T -arvo määrittää lujuudellisen myötörajan (MPa). Tinan paino ilmaistaan yleensä arvolla E. Esimerkiksi arvo E2,8/2,8 kertoo tinan painon olevan 2,8 g/ m² levyaihion molemmilla puolilla. Useimmiten läkkilevyjen tinan massa on alueella E2,8/2,8–5,6/5,6. (JL Levytekniikka Oy 2018.)

Nykyään särmäyksessä käytetään materiaalina myös muoveja. Muovi valmistetaan polymeereista sekä lisäaineista (Koivisto ym. 2010, 192). Esimerkiksi polykarbonaatti (PC) tai polyvinyylidikloridi (PVC-TF) ovat särmäyksessä paljon käytettyjä muovimateriaaleja. Särmäyksessä kyseiset muovimateriaalit ovat yleisessä käytössä aina 3,0 mm asti. Polykarbonaattia (kauppanimi LEXAN) ja polyvinyylidikloridia käytetään paljon koneenrakennusmuoveina muun muassa iskunkestävyytensä, sähköneristyskykynsä, mittapitävyytensä ja kirkkautensa ansiosta. (JL Levytekniikka Oy 2018.)

Särmäyksessä käytetään paljon myös erilaisia verkko- ja reikälevyjä, joiden aukotukset ovat valittavissa eri jaoilla ja kuvioilla. Pääasiallisina materiaaleina ovat pinnoittamattomat ja sinkityt teräslevyt, ruostumattomat ja haponkestävät teräslevyt sekä alumiini. Verkkolevyjä käytetään muun muassa rakennuksien julkisivuissa, kaiuttimissa ja ihmisten turvallisuutta vaativissa kohteissa kuten koneenrakennuksessa. Jossain määrin särmätään myös erilaisia kudottuja lankaverkkoja, joita käytetään esimerkiksi erinäisissä tarkasti mitoitetuissa käyttökohteissa. Särmättäessä verkko- ja reikälevyjä, on tärkeää huomioida reikien venymät ja siitä johtuvat haasteet mittojen hallinnassa. (JL Levytekniikka Oy 2018.)

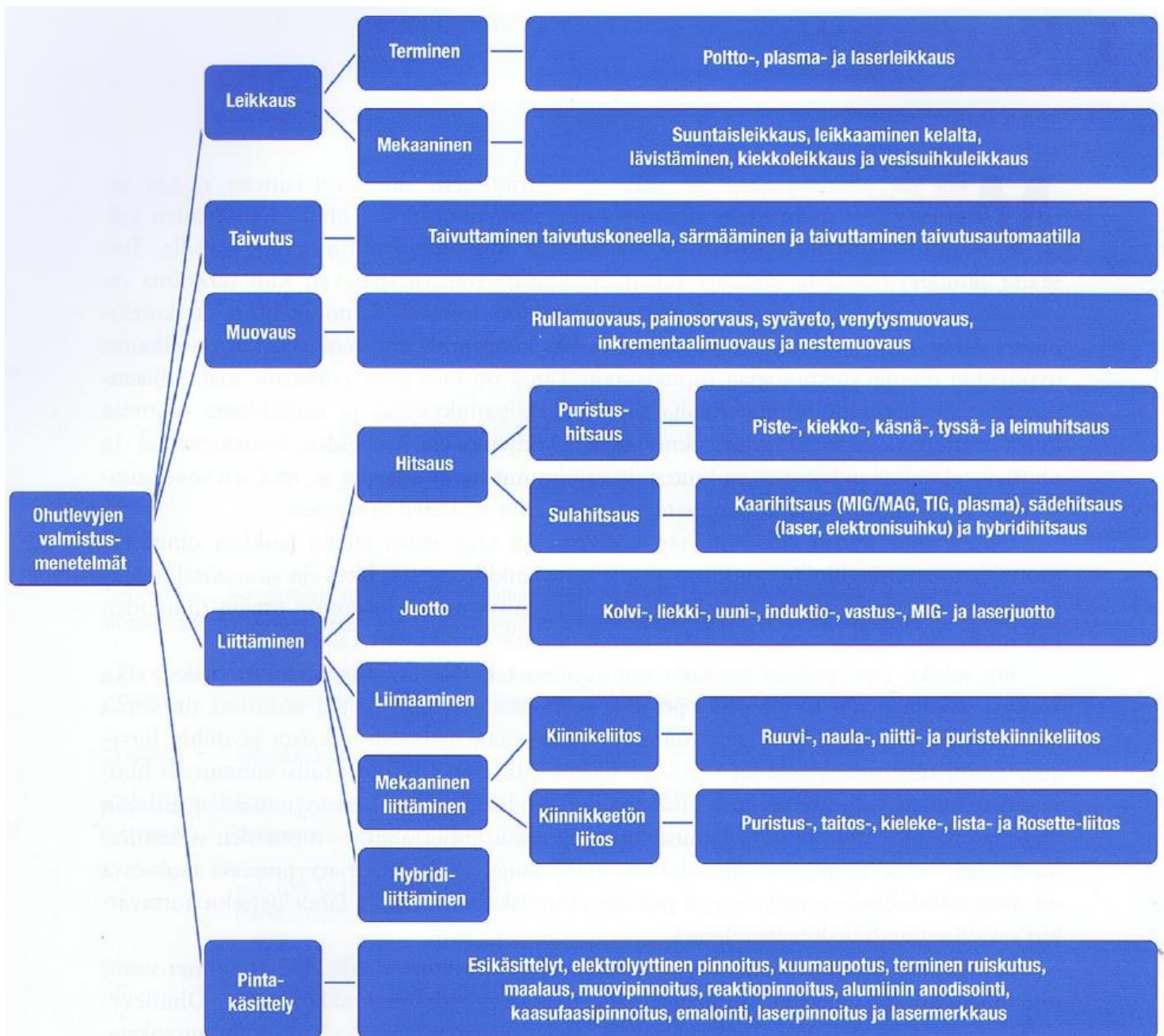
Usein särmätyt ohutlevytkappaleet maalataan jälkivaiheena, mutta joissakin tilanteissa myös valmiiksi maalattuja levyaihioita voidaan särmätä. Raaka-ainetoimittajilta on saatavilla esimerkiksi valmiiksi maalattuja alumiiniarkkeja, joita on levytyöstön jälkeen mahdollista särmätä, kun huomioidaan erityiset valmistustekniset vaatimukset laadukkaan pinnanlaadun varmistamiseksi. Usein särmättävät ohutlevytkappaleet ovat kuitenkin maalin sijaan muovipinnoitettuja teräsohutlevyjä, joita käytetään muun muassa rakennusteollisuuden katto ja sadevesijärjestelmien valmistamiseen. (JL Levytekniikka Oy 2018.)

Särmäyksessä käytetään materiaalina myös muun muassa martensiittista ruostumatonta jousiterästä, jonka EN-standardin teräsnumero on 1,4310. EN-standardinimikkeenä materiaali on tunnettu X10CrNi18-8, jossa on kromia (Cr) 18 % ja nikkeliä (Ni) 8 % (AISI 301). Raaka-ainetta on saatavilla levyinä sekä nauhana. Sitä käytetään muun muassa elektroniikkateollisuudessa erilaisten laitteiden sovelluksiin, joissa vaaditaan suurta joustavuutta. Jousiteräs on nimensä mukaisesti tarkoitettu tuotteisiin, joissa vaaditaan joustavuutta. Kyseisen jousiteräksen murtolujuus on peräti 1100–1300 N/mm². Materiaalin suuri takaisinjousto on huomioitava tarkasti särmäyksen aikana. (JL Levytekniikka Oy 2018.)

5 SÄRMÄYS VALMISTUSMENETELMÄNÄ

Nykyään suurin osa ohutlevyjen taivutustöistä tehdään särmäämällä. Ohutlevykappaleelle asetetut valmistukseen liittyvät vaatimukset kasvavat jatkuvasti. Tämän vuoksi muun muassa suunnittelijan on ymmärrettävä särmäyksen teoria, valmistusmenetelmien mahdollisuudet (taulukko 16) sekä raaka-aineiden käyttäytyminen särmäyksessä. (Karpinen ym. 1986, 1.)

Taulukko 16. Ohutlevyjen valmistusmenetelmät (Matilainen ym. 2010, 4).

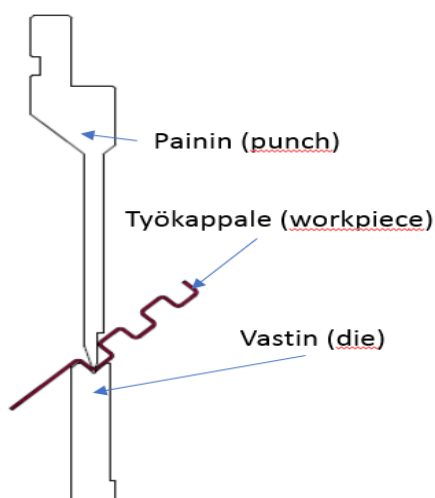


5.1 Särmäyksen periaate

Särmäyspuristimella tarkoitetaan konetta, jolla särmätään metalli- ja muovilevyosia. Yleisesti särmäyspuristimella ymmärretään tarkoitettavan kuitenkin konetta, joka taivuttaa ohutlevyosia, vaikka ohutlevyn määritelmä ei enää toteudu taivutettaessa yli 3,0 mm:n paksuisia materiaaleja. Särmäminen on ohutlevyn taivutusmenetelmä, jossa levyosa taivutetaan puristamalla se painimen ja vastimen välissä haluttuun taivutussäteeseen ja kulmaan (Mäki-Mantila ym. 2001, 6).

Särmäyspuristimet voivat olla mekaanisia-, sähkömekaanisia- tai hydraulisia koneita. Mekaanisessa särmäyspuristimessa sähkömoottorin energia varastoidaan vauhtipyörään, joka vapautetaan kytkimen ja kampimekanismin avulla yläpalkkiin, jolloin saadaan aikaiseksi työliike. Sähkömekaanisessa särmäyspuristimessa taivuttavan palkin liike toteutetaan sähkömekaanisesti vaihteistojen, servomoottorien ja palkin liikkumiseen tarvittavan mekaniikan avulla. Palkin liike voidaan toteuttaa tasaisesti asennetuilla hihnoilla tai vaihtoehtoisesti väkipyörämekanismin mukaan hihnapyörillä. Suurin osa särmäyspuristimista on nykyään hydraulisia. Hydraulisessa särmäyspuristimessa työliike tapahtuu hydraulisyntereillä. (Mäki-Mantila ym. 2001, 8.)

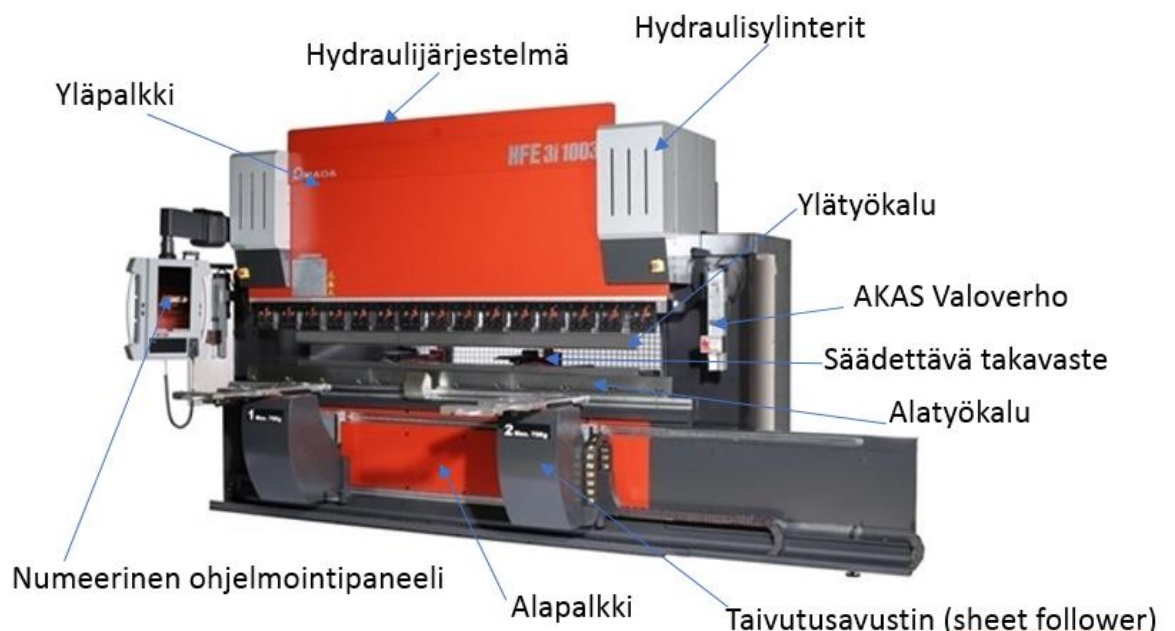
Särmäyspuristimessa taivuttavina työkaluina toimivat yläpalkkiin kiinnitetty painin (punch) ja alapalkkiin kiinnitetty vastin (die), työkappaleen ollessa niiden välissä. Särmättävä levyosa asetetaan painimen ja vastimen väliin, jolloin painimen liike puristaa levyosan vastinta vasten, aiheuttaen taivutuksen (kuva 3). Taivutuksen jälkeen painin nousee takaisin ylös ja seuraava taivutus voidaan suorittaa. (Mäki-Mantila ym. 2001, 6.)



Kuva 3. Särmäyksen periaate (Ama-Prom Finland Oy 2018a).

Ennen särmäyksen suorittamista levyosa paikoitetaan numeerisesti ohjattuihin takavasteisiin. Verrattuna mekaanisesti ohjattuihin takavasteisiin, numeerisesti ohjattujen takavasteiden suurena hyötynä on särmättävien levyosien lyhyempi läpimenoaika ja työkalujen lyhyempi asetus aika. Särmättävä levyosa on mahdollista valmistaa huomattavasti nopeammin myös kerralla valmiiksi, jolloin mahdolliset suunnittelu, aihionleikkaus sekä mittavirheet ovat ajoissa havaittavissa ja hienosäätämällä mittoja, jopa korjattavissa. (Mäki-Mantila ym. 2001, 6-8).

Särmäyspuristimessa olevat akselit ovat nykyaikaisissa puristimissa ohjelmoitavissa erikseen. Särmäyspuristimen rakennetta esitetään tarkemmin kuvissa 4 – 6. Kuvassa 4 on nykyaikainen Amadan valmistama taajuusmuuttajalla varustettu hydraulinen ja servo-ohjattu HFE 3i – ylätoiminen särmäyspuristin. Taajuusmuuttajan avulla puristimen energiankulutus on saatu optimoitua särmättävän kappaleen tarpeisiin. Hydraulipumppu käynnistyy vain työliikkeen ajaksi, jolloin puristimen käyttö on energiatehokasta. Puristin on varustettu muun muassa AKAS -laservaloverholla, kahdeksalla eri ohjelmoitavalla akselilla, DIGIPRO® -kulmamittausrakenteella ja graafisesti ohjatulla numeerisella ohjelmointipaneelilla (AMNC 3i, Amada Multimedia Network Controller). Taivutusavustin, jota toimitetaan optiona, on tarpeellinen, jos särmätään isoja ja raskaita levyosia. (Ama-Prom Finland Oy 2018a.)



Kuva 4. Amada HFE 3i 1003 ylätoiminen särmäyspuristin (Ama-Prom Finland Oy 2018a).

5.2 Särmäyspuristimen nykyaikainen ohjaus

Nykyään lähes kaikki nykyaikaiset hydrauliset särmäyspuristimet ovat numeerisesti ohjattuja ja toiminnaltaan ylätoimisia. Numeerisessa ohjauksessa on tapahtunut paljon kehitystä, josta esimerkkinä Amadan AMNC 3i kuvassa 5. Ohjelmointi voidaan suorittaa etänä (offline) Amadan Solution Pack Bend – ohjelmistoa hyväksi käyttäen, jolloin särmäyspuristimen hyötykäyttöä saadaan parannettua. Tarvittaessa särmäysohjelmat ovat simuloitavissa jolla mahdolliset virheet ovat havaittavissa ennen varsinaista särmäystä. Särmäysohjelmat voidaan paikallisesti tehdä automaattisesti tai manuaalisesti.

Ohjelmointitiloja on neljä: 3D – tila, 2D ja 2D (cross section) – tila, direct – tila (angular programming) sekä manuaalinen -tila (programming by bending depth). 3D – tilassa ohjelmointi suoritetaan 3D – mallia hyödyntäen joka noudetaan esimerkiksi palvelimelta tai tuodaan USB – muistitikulla. 2D – tilassa ohjelma luodaan muodon tiedoilla, jolloin ohjauspaneeliin muodostuu 2D – piirros havainnollistamaan särmättävää levyosaa. 2D – tilassa on mahdollista myös lukea yleisiä CAD – formaatteja kuten DXF – tiedostoja, joissa on taivutuslinjat määritettynä. Taivutusjärjestykset ovat ohjaustilassa helposti muutettavissa ja järjestys informoidaan näytössä koko särmäysprosessin ajan. Direct ja manuaalinen – tila ovat lähempänä aikaisempien ohjauksien perinteiseksi muodostunutta ohjelmointia.

Ohjausjärjestelmässä on lisäksi särmäysteräkirjasto ja särmättävät materiaalit ovat valittavista ohjelmoinnin alussa. Valmiit ohjelmat on mahdollista myös noutaa viivakoodin avulla, joka on AMNC 3i – ohjauksessa vakiovarusteena. Vanhempiin ohjauksiin nähden, AMNC 3i – ohjaus on huomattavasti nopeampi ja tarvittavaa informaatiota on suurelta 18,5 ” kosketusnäytöltä jatkuvasti saatavissa, jotta särmäysprosessi on tehokasta. (Ama-Prom Finland Oy 2018a.)



Kuva 5. Amadan AMNC 3i -ohjauksella varustettu graafinen ohjelmointipaneeli (Ama-Prom Finland Oy 2018a).

5.3 Särmäyspuristimen numeerisesti ohjatut akselit

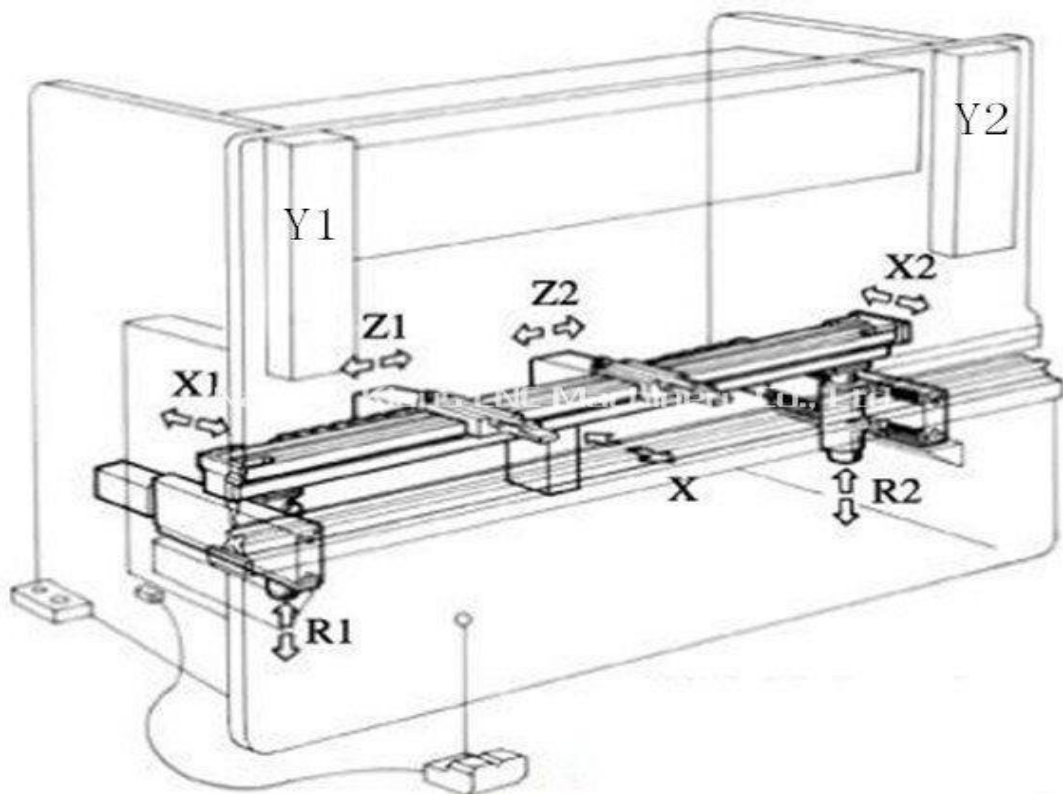
Nykyisin särmäyspuristimissa on useita akseleita, jotka ovat numeerisesti (NC) ohjattuja ja niitä kutsutaan X-, Y-, R- tai Z – akseleiksi (kuva 6). X – akseli liikuttaa takavastetta eteen tai taakse, se on yleisin numeerisesti ohjattava takavasteen akseli. Jos takavasteita voidaan liikuttaa toisistaan riippumatta, kutsutaan akseleita X1- ja X2 – akseleiksi. X – akseleiden liikuttaminen toisistaan riippumatta helpottaa huomattavasti vinojen levyosien taivuttamista. (Mäki-Mantila ym. 2001, 8-9.)

Y – akselit liikuttavat taivutuspalkkia ylös tai alas. Jos taivutuspalkin molempia sylintereitä voidaan liikuttaa toisistaan riippumatta, kutsutaan akseleita Y1- ja Y2 – akseleiksi. Y1- ja Y2 – akseleiden riippumattomalla ohjauksella voidaan levyosaan särmätä sellaisia kulmia, joiden säteet muuttuvat särmäysvaiheen aikana. (Mäki-Mantila ym. 2001, 8-9.)

R – akselilla liikutetaan takavastetta ylös tai alas. Jos takavastetta voidaan liikuttaa toisistaan riippumatta, kutsutaan akseleita R1- ja R2 – akseleiksi. (Mäki-Mantila ym. 2001, 8-9.)

Takavasteen korkeutta muuttamalla voidaan samalla asetuksella särmätä hankaliakin levyosia, joiden muoto muuttuu särmäyksen aikana. Takavasteen korkeutta on myös muutettava, jos käytössä on erikorkuisia työkaluja. Z – akseli liikuttaa takavastetta sivusuunnassa. Jos kahta takavastetta voidaan liikuttaa toisistaan riippumatta, kutsutaan akseleita Z1- ja Z2 – akseleiksi. Särmäyspuristimissa, joissa on käytössä vain Z1 – akseli, molemmat vasteet liikkuvat koneen keskilinjaan nähden symmetrisesti. Edellä mainittujen akselien lisäksi särmäyspuristimissa on takavasteen väistö, jolla vältetään taipuvan levyosan törmääminen takavasteeseen. (Mäki-Mantila ym. 2001, 8-9.)

Ohjelmoitavat Z1- ja Z2 – akselit ovat edelleen mekaniikan vuoksi arvokkaita mutta ne ovat siitä huolimatta yleistyneet muun muassa Amadan särmäyspuristimissa. Kuvasta 6 nähdään myös särmäyspuristimen jalkapoljin, jolla yläpalkin työliike voidaan suorittaa.



Kuva 6. Amada särmäyspuristimen ohjelmoitavat akselit (Ama-Prom Finland Oy 2018a).

Särmäyspuristimien työleveydet vaihtelevat 1 – 10 metrin alueella ja niitä voidaan liittää sarjaan, jolloin pidempien levyosien särmääminen on mahdollista samalla ohjauksella (Matilainen ym. 2010, 240). Tällaisia puristimia kutsutaan yleisesti tandem – puristimiksi. Puristusvoimat riippuvat särmättävän levyosan materiaalista ja paksuudesta (Matilainen ym. 2010, 4).

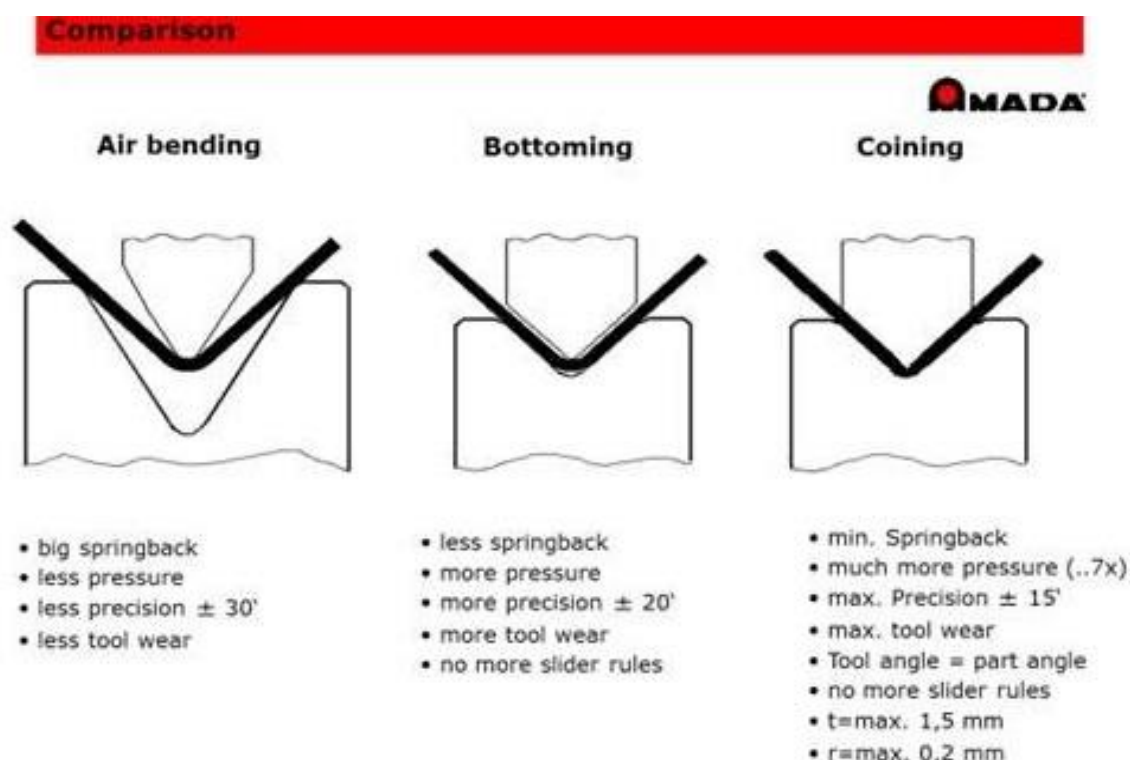
Puristusvoiman tarpeeseen vaikuttavat huomattavasti myös särmäysmenetelmät, joita ovat vapaataivutus, pohjaaniskutaivutus, lyöntitaivutus, litistys ja taivutus elastisella vastimella. Menetelmistä vapaataivutus, pohjaaniskutaivutus ja litistys ovat ohutlevytaivutuksessa yleisimmin käytettyjä ja niiden menetelmät on kuvattu tarkemmin alaluvussa 5.3. Joustavalla, elastisella vastimella varmistetaan särmättävän levyosan näkyvän pinnan virheettömyys. Menetelmällä voidaan särmätä haastaviakin muotoja. Elastisen materiaalin käyttö ei ole sarjatuotannossa kovin yleistä, koska polyuretaanimateriaalien elinikä ei ole välttämättä kovin suuri. Särmäyspuristimen puristusvoimat vaihtelevat alueella 100 – 25 000 kN:a (Matilainen ym. 2010, 240).

5.4 Särmäysmenetelmät

Särmäyspuristimessa käytetyin menetelmä on vapaataivutus (air bending), jossa levyosaa taivutetaan kolmipistetaivutuksena. Työliike lopetetaan ennen kuin levy osuu vastimen pohjaan, kuten kuvasta 7 voidaan todeta. Vapaataivutuksessa vaadittava puristusvoima on pieni ja menetelmä soveltuu käytettäväksi jopa työkaluja vaihtamatta eri materiaalivahvuuksille. Työliikkeen säädöillä voidaan särmätä erisuuruisia kulmia, takaisinjousto huomioiden. Levymateriaalin takaisinjousto (springback) huomioidaan tekemällä ylitaivutus. Menetelmän haastavuutena on säilyttää vaaditut mittatarkkuudet esimerkiksi materiaalien aineenvahvuuden muutoksista huolimatta. (Mäki-Mantila ym. 2001, 6-8.) Takaisinjouston vaikutuksia käsitellään tarkemmin alaluvussa 5.4.

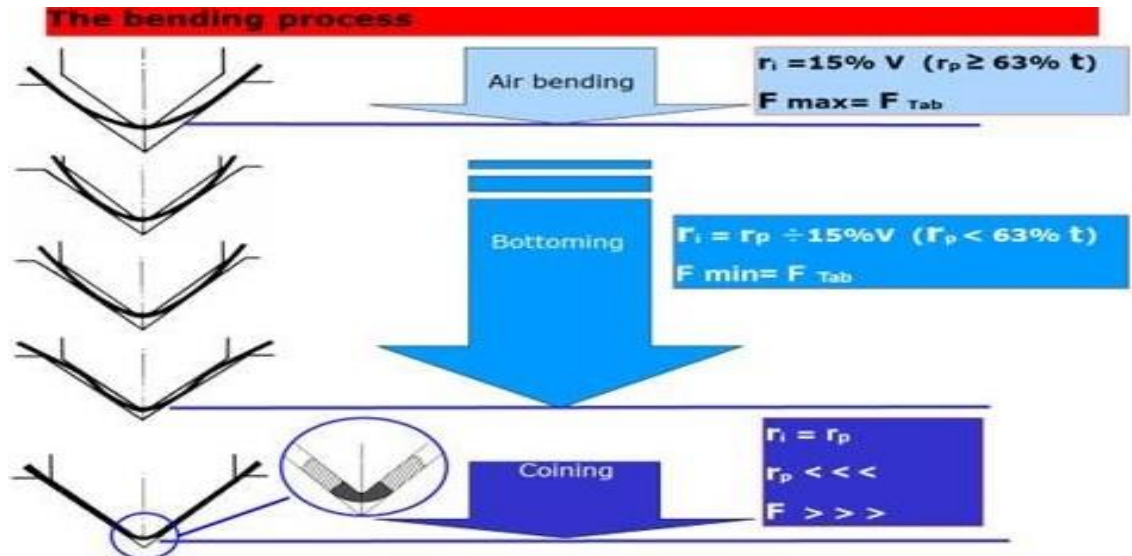
Pohjaaniskutaivutuksessa (bottoming) työliike säädetään niin suureksi, että painin painautuu vastinta vasten kokonaisuudessaan, kuten kuvasta 7 nähdään. Levymateriaalin takaisinjousto pohjaaniskutaivutuksessa on huomattavasti pienempi kuin vapaataivutuksessa. Menetelmä on yleisesti käytetty silloin, kun särmäyksessä vaaditaan tarkka ja jäykkä muoto levyosalle, mutta rajoittavana tekijänä on yleisesti käytetty 2,0 mm:n maksimiaineenvahvuus. Pohjaaniskutaivutus vaatii noin 3-5 kertaa suuremman puristusvoiman kuin vapaataivutus, jonka vuoksi pohjaaniskutaivutuksessa vaaditaan tukeva särmäyskone ja jokaiselle taivutuskulmalle on oltava omat kestävät työkalut, koska työkalujen kuluminen on suurempaa kuin vapaataivutuksessa. (Matilainen ym. 2010, 241.)

Eräänlainen pohjaaniskutaivutus on myös pakotustaivutus (coining). Pakotustaivutuksessa painin tunkeutuu särmättävään levyosaan sisälle puristaen sitä kasaan, jolloin painin voi tunkeutua levymateriaalin neutraaliakselin yli. Menetelmä on yleinen muun muassa rahan valmistuksessa, jolloin kohokuviot ja muodot syntyvät pakottamalla materiaali haluttuun muotoon. Toisin sanoen levyosan muoto vastaa täsmälleen painimen ja vastimen muotoa ja kulmaa. Pakotustaivutus vaatii hyvin suurta puristusvoimaa ja se kuluttaa menetelmistä eniten työkaluja. Coining – menetelmässä ei ole käytännössä takaisinjoustoja ja haluttu tarkkuus saavutetaan toistettavasti. Coining – menetelmä voidaan todeta kuvasta 7. (Wilson tool International Ltd 2018a.)



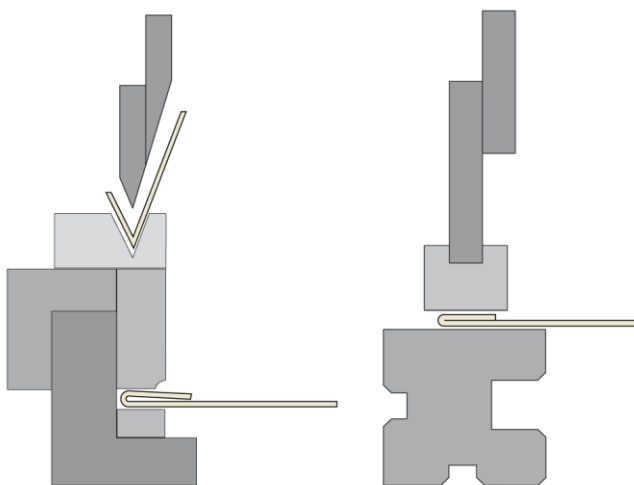
Kuva 7. Särmäysmenetelmien vertailu (Ama-Prom Finland Oy 2018a).

Kuten aikaisemmin todettiin, vapaataivutusta kutsutaan myös kolmipistetaivutukseksi. Kuvasta 8 nähdään särmäysprosessin muuttuminen, kun työliikkeen syvyyttä lisätään. Vapaataivutuksessa levyosa on painimen kärjen ja vastimen kulmissa kiinni. Pohjaaniskutaivutukseen siirryttäessä tarvittava puristusvoima lisääntyy ja särmättävän levyosan muoto muuttuu siten, että levyosa ottaa kiinni useammasta kohdasta paininta. Lisäämällä puristusvoimaa saavutetaan haluttu pohjaaniskutaivutus. Pakotustaivutukseen siirryttäessä painimen kärki tunkeutuu levymateriaaliin puristaen sitä kasaan, jolloin aineenvahvuus ohenee ja materiaalin lujuusarvot taivutuskohdasta heikkenevät.



Kuva 8. Särmäysprosessit (Ama-Prom Finland Oy 2018a).

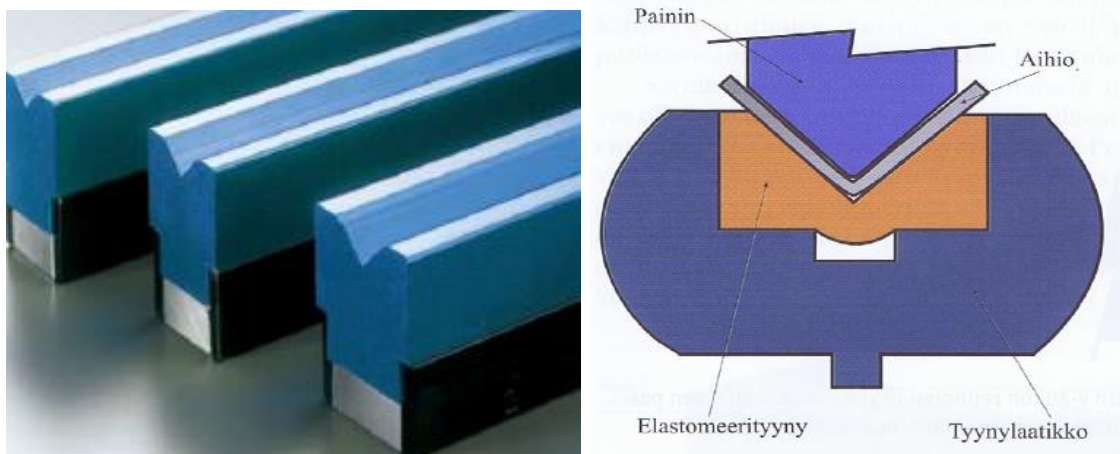
Kuvassa 9 havainnollistetaan litistys, joka voidaan tehdä nopeimmin esimerkiksi Amandan tai Wilson tool Internationalin valmistamalla erityisellä litistystyökalulla, joka nähdään kuvan 9 vasemmalla puolella. Litistys voidaan suorittaa, kun riittävä alkutaivutus on tehty. Yleisesti alkutaivutuksen kulma on noin 45 astetta, jolloin litistys on helpoimmin ja turvallisimmin suoritettavissa. Toinen vaihtoehto on suorittaa litistys omana työvaiheena, joka nähdään kuvassa 9 oikealla. Litistys suoritetaan tasapäisellä painimella ja vastimella. Oikeanpuoleinen menetelmä ei ole kustannustehokasta valmistamista, eivätkä litistysvaiheessa mahdollisesti havaitut mittavirheet ole enää välttämättä korjattavissa. (JL Levytekniikka Oy 2018.)



Kuva 9. Litistys särmäysmenetelmänä (Ama-Prom Finland Oy 2018a).

Levyosien särmäystä voidaan tehdä myös kuvan 10 (oikealla) mukaisesti elastista vastinta käyttämällä, jolloin taivutettava särmä muotoutuu painimen mukaan. Menetelmää käytetään haastavien muotojen tekemiseen, joissa särmättävän levyosan näkyvän pinnan on oltava naarmuton. Elastinen vastin vaatii tavallista vapaataivutusta enemmän puristusvoimaa, mutta voitelemalla vastimen tyynyn pintoja, voidaan voiman tarvetta saada vähennettyä. Elastisen vastimen haittapuolina ovat tyynyjen lyhyt elinikä ja pitkien levyosien taivutuksessa epätarkkuus mitoissa. (Matilainen ym. 2010, 242.) Elastinen materiaali on usein polyuretaania ja se on vaihdettavissa tyynynpitimeen, toisin sanoen polyuretaanimatriisiin. Nykyään on saatavilla lisäksi vastimia, joiden materiaali on polykarbonaattia. Tällaisia vastimia kutsutaan polykarbonaattimatriiseiksi. Tällaiset vastimet ovat muotoonsa tehtyjä ja ne eivät ole elastisia, mutta käyttötarkoituksena on pystyä särmäämään erilaisia levyosia naarmuttomasti.

Kuvassa 10 vasemmalla esitetään Amadan polykarbonaattimatriiseja, joissa puristusvoimat V -urilla 4-12 voivat olla enintään 320 kN/metri ja suuremmissa V -urissa 500 kN/metri. Naarmuttomaan särmäykseen on saatavilla myös uretaanisia suojakalvoja, -putkia sekä -nauhaa, jotka asennetaan teräksestä valmistetun vastimen päälle tai reunoille. (Ama-Prom Finland Oy 2018a.)

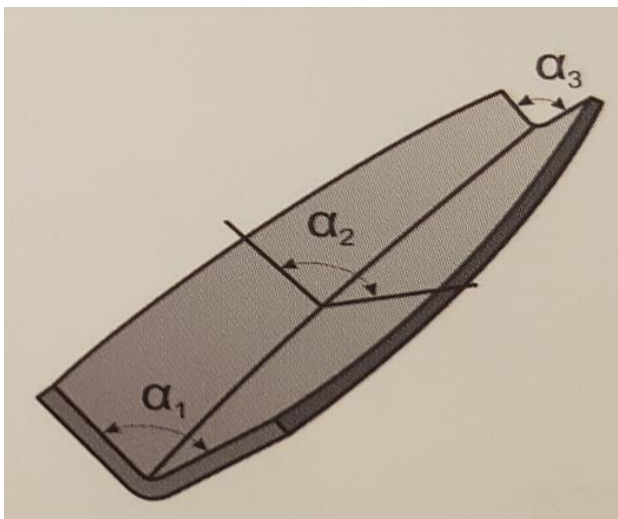


Kuva 10. Vasemmalla polykarbonaattimatriisi naarmuttomaan särmäykseen (Ama-Prom Finland Oy 2018b, 49). Oikealla elastinen särmäysmenetelmä, jossa elastomeerityyny muotoutuu painimen mukaan (Matilainen ym. 2010, 242).

5.5 Särmäyskoneen palkin kaareutus (Crowning)

Tarkan taivutustuloksen varmistamiseksi palkkia on kaareutettava särmättäessä pitkiä levyosia tai käytettäessä työkaluja useissa erilaisissa ryhmissä. Kaareutumistarve johtuu puristavan palkin särmäyksen aikaisesta taipumisesta. (Mäki-Mantila ym. 2001, 9). Kaareutusta kutsutaan myös bombeeraukseksi. Varsinaista palkin taipumisongelmaa kutsutaan veneilmiöksi. Bombeerauksella eli työkalujen esitaivutuksella korjataan särmäyksen aikainen palkin taipuminen erillisellä bombeeruslaitteistolla tai reaktiivisella palkilla ennen särmäystä. Kuvassa 11 havainnollistettu veneilmiö, eli taivutettavan levyosan kylkien pullistuminen, johtuu särmäysvoiman epätasaisesta jakautumisesta särmättävän levyosan koko matkalle, jolloin särmän suoruus levyosan keskellä ei vastaa haluttuja vaatimuksia. (Matilainen ym. 2010, 244).

Levyaihioon syntyvä kylkien pullistuminen johtuu osaltaan myös levymateriaalin takaisin joustosta, jota käsitellään tarkemmin alaluvussa 5.4. Bombeeruslaitteiston tai reaktiivisen palkin tarkoitus on kompensoida särmäysvaiheessa tapahtuvaa runkopalkin taipumaa työkalujen keskikohdassa, jolloin vastimeen kohdistuva todellinen iskunpituus on samanlainen koko palkin työkalujen pituudelta. (Matilainen ym. 2010, 244). Särmän suoruus on yksi mittatarkkuuteen vaikuttava tekijä. Vääränlainen kaareutus vaikuttaa särmäysaikoihin, koska puristinta joudutaan jatkuvasti säätämään. Lisäksi lisääntyvät mitaustoimet pitkittävät läpimenoaikoja, jolloin työvaiheeseen suunnitellut työtunnit ylittyvät.



Kuva 11. Veneilmiöstä johtuvan taivutettavan levyosan kylkien pullistuminen keskeltä (Matilainen ym. 2010, 244).

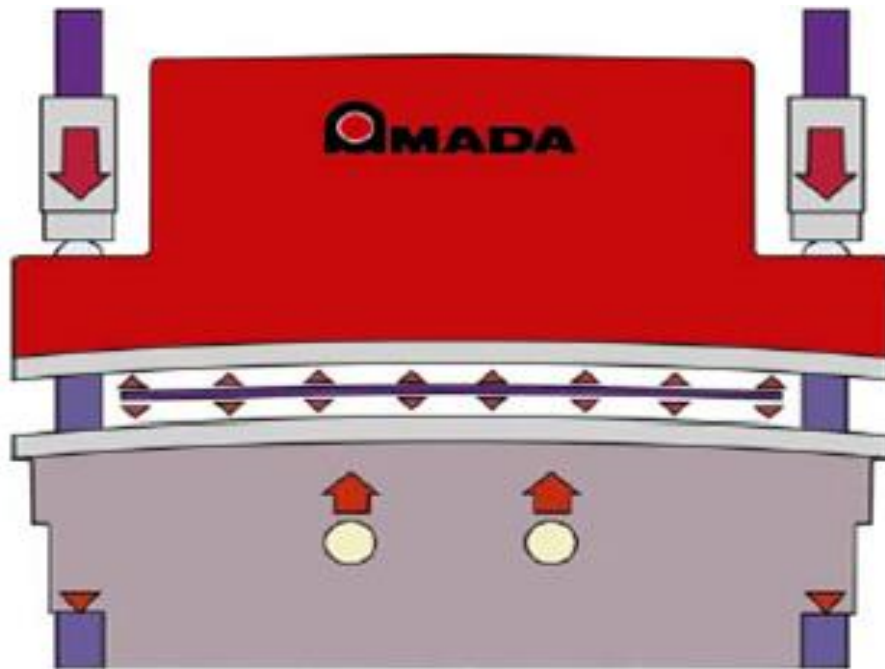
Kaareutukseen on useita erilaisia menetelmiä, kuten sylinterikäyttöinen kaareutus, sandwich – rakenteinen alapalkki ja kiilaluistikaareutus. Kompensointi voidaan tehdä manuaalisesti tai NC – ohjatusti, mutta yleisesti menetelmät on suunnattu pidemmille särmäyspuristimille. Lyhyemmissä puristimissa bombeerauslaitteistoa ei yleensä tarvita. (Mäki-Mantila ym. 2001, 10.) Bombeeraus on nykyään NC – ohjattu kaikissa teknisesti kehittyneissä särmäyspuristimissa.

Kuvassa 12 havainnollistetaan Amadan ylätoimisen särmäyspuristimen veneilmiötä. Amada käyttää kahta erillistä patentoitua bombeerausta, joista kuvassa 12 on havainnollistettu integroitu bombeeraus. Erillistä bombeerauslaitteistoa ei tarvita reaktiivisen eli vastavaikutteisen palkkirakenteen vuoksi. Reaktiivinen alapalkki taipuu saman verran ja samaan suuntaan kuin yläpalkki. Amadan patentoiman rakenteen ansiosta särmättävän levyosan kulma pysyy koko palkkiosuudella samana taivutustilanteesta riippumatta. (Ama-Prom Finland Oy 2018a.)



Kuva 12. Amadan särmäyspuristimen integroitu bombeeraus. Reaktiivinen palkkirakenne (Ama-Prom Finland Oy 2018a).

Kuvassa 13 havainnollistetaan Amadan ylätoimisen särmäyspuristimen automaattibombeerausta. Erillistä bombeerauslaitteistoa ei tarvita reaktiivisen palkkirakenteen vuoksi. Automaattibombeerauksessa levyosan kulma pysyy koko palkkiosuudella samana riippumatta taivutustilanteesta. Amadan reaktiivisten alapalkkien bombeeraus on suunniteltu puristusvoimaltaan 1000 kN:niin asti. (Ama-Prom Finland Oy 2018a.)

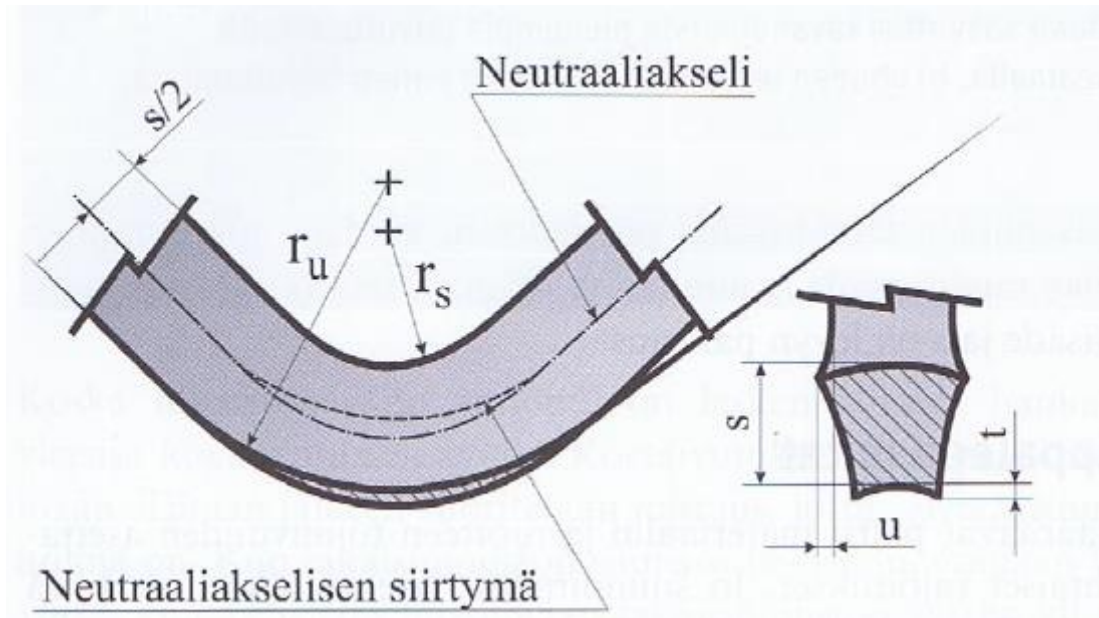


Kuva 13. Amadan särmäyspuristimen automaattibombeeraus. Reaktiivinen palkkirakenne (Ama-Prom Finland Oy 2018a).

5.6 Neutraaliakseli, taivutussäde, oikaistu pituus ja taivutuksen vähenemä särmäyksessä

Neutraaliakseliksi kutsutaan linjaa, jossa tapahtuu jännitysten vaihtumista. Särmäystilanteessa levyaihion sisäreunassa vallitsee puristusjännitystila, jolloin materiaali puristuu ja särmän kohdalla ulkoreunassa vetojännitystila jolloin materiaali venyy. Levyaihion neutraaliakselilla jännityksen arvo on nolla. Neutraaliakselin sijainti ei aina sijaitse geometrisella keskiviivalla, vaan siirtyy puristus- ja vetojännitystilojen erinäisten muodonmuutostilojen vuoksi. Neutraaliakselin siirtymällä on suuri merkitys särmättävän levyaihion oikaistun pituuden laskemisessa. (Ihalainen ym. 2007, 236–237.)

Kuvassa 14 esitetään neutraaliakselin sijainti ja sen siirtymä särmättävässä levyaihi-ossa. Kuvassa on myös havaittavissa särmäyksen aiheuttamat plastiset eli palautumat-
tomat muodonmuutokset. Särmäyksen aikaisessa liian voimakkaassa venyttämässä
neutraaliakselin siirtymä voi olla jopa aihion ulkopuolella (Karppinen ym. 1986, 12).



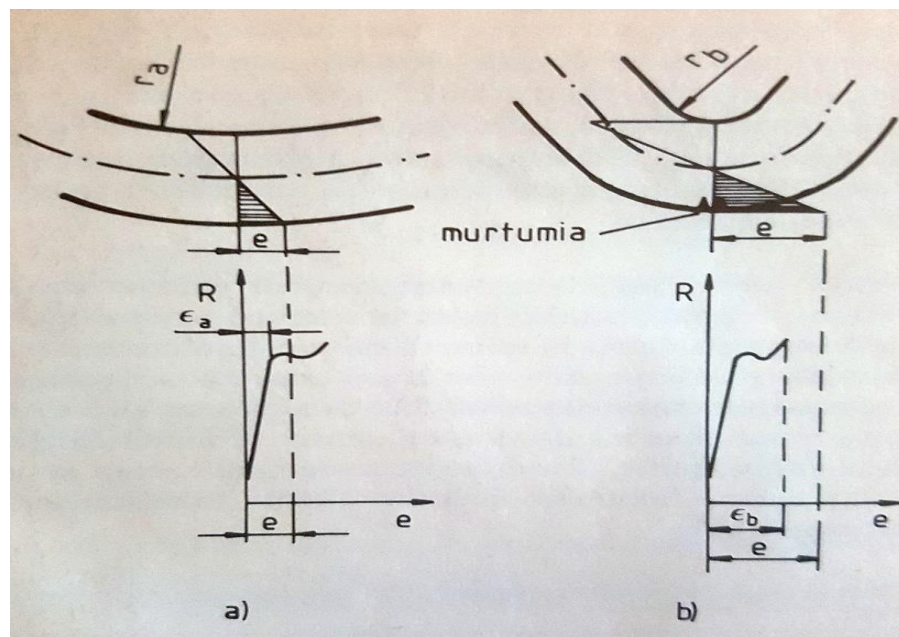
Kuva 14. Neutraaliakselin sijainti ja sen siirtymä särmäyksessä (Matilainen ym. 2010, 250).

Muodonmuutoksien suuruuksia pystytään määrittämään poikkileikkauksen eri kohdissa, jotka riippuvat pääasiallisesti levyaihiön särmän sisäsäteen suhteesta levyn aineenvahvuuteen. Kaksi oleellista perustekijää, jotka on otettava huomioon taivutuksen suunnittelussa, ovat taivutetun osuuden takaisinjousto ja ulkopinnan murtuminen. Takaisinjousto kutsutaan toleranssintekijäksi ja ulkopinnan murtumisen huomioimista turvallisuustekijäksi. (Karppinen ym. 1986, 12.)

Särmättäessä ohutlevyosia määritetään pienin taivutussäde työtavan, levymateriaalin sekä valmistettavalta tuotteelta vaadittujen ominaisuuksien mukaan. Särmäyksessä suurin venymä on levyosan ulkopinnassa, jonka vuoksi se ei saa missään tilanteessa ylittää materiaalille ilmoitettua murtorajaa, jotta levyssä ei tapahdu murtumaa. Suunniteltaessa särmättäviä ohutlevyosia, on huomioitava, että mitä pienempi on sisäsäde, sitä suurempi on usein ulkopinnan venymä, jolloin riski murtumien syntymiseen kasvaa. (Karppinen ym. 1986, 12–13.)

Vapaataivutusmenetelmää (air bending) käytettäessä taivutussäde on kytköksissä painimen säteeseen sekä vastimen V – aukon leveyteen. Jos särmättävän levyosan taivutussäde on tarkka osan toiminnan kannalta, vapaata V – särmäysmenetelmää ei suositella käytettäväksi, koska yleispätevää laskentamenetelmää taivutussäteen laskemiseksi ei ole. (Matilainen ym. 2010, 248.)

Kuvassa 15 esitetään kaksi erilaista levyosan taivutustapausta (a ja b), joista a – tapauksessa särmäys on tehty suurella taivutussäteellä ja b – tapauksessa pienellä taivutussäteellä. Kuvassa oleva tarkastelu on tehty ainoastaan levyosan neutraaliakselin alapuolelle (vetoalue), neutraaliakselin on oletettu olevan levyosan keskellä. Kuvassa on esitetty tapauksien a ja b jännitysvenymäkäyrät sekä viivoitettujen kolmioiden avulla venymää (ϵ) taitoksen poikkileikkauksen eri kohdissa. Pysyvää muodonmuutosta ei tapahdu, jos venymä ei ylitä kimmorajaa (Hooken laki) vastaavaa venymää levyaihion pinnassa. Tuolloin levy palautuu alkuperäiseen muotoonsa, kun puristusvoimat lakkaavat vaikuttamasta. Tapauksessa b havaitaan, että ulkopinnan venymä on ylittänyt murtorajan, jolloin taitokseen on syntynyt murtumia. (Karppinen ym. 1986, 13.)



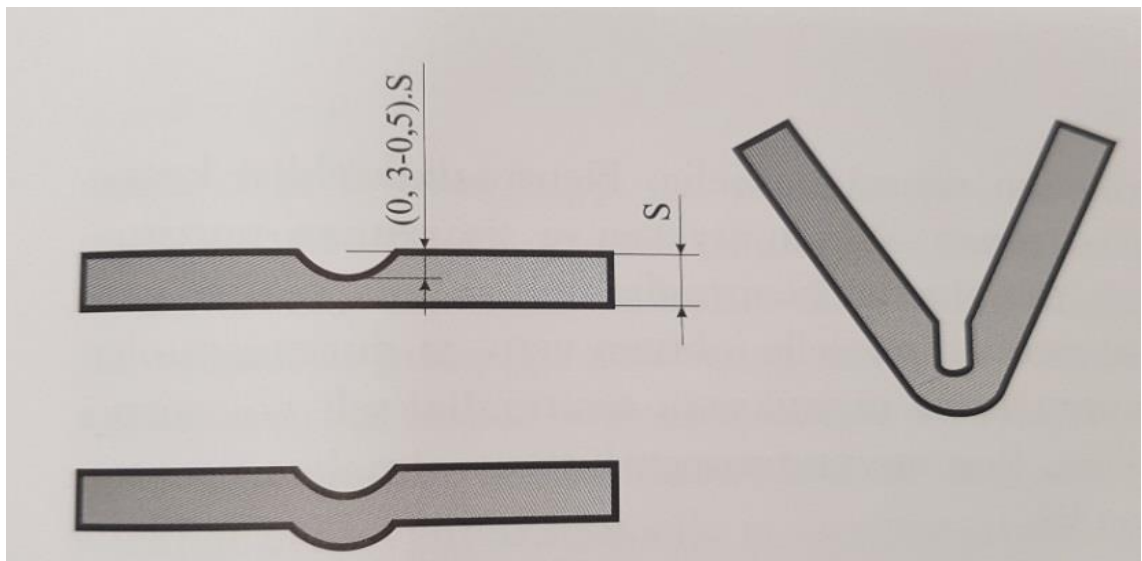
Kuva 15. Viivoitetuissa kolmioissa on suhteellinen venymä materiaalin (ϵ_a ja ϵ_b) taitoksen poikkileikkauksen eri kohdissa sekä jännitysvenymäkäyrät (Karppinen ym. 1986, 13).

Särmäyksessä on otettava huomioon myös työkalujen aiheuttamat vetojännitykset särmäyksen aikana sekä levyaihiossa olevat mahdolliset leikkausjäysteet, jotka yhdessä lisäävät murtumisen riskiä. Yleisenä vaatimuksena on, että taitokset eivät heikennä lujuutta tai levypinnan ulkonäköä. Ulkopuolinen taivutussäde (r_u) voidaan likimääräisesti laskea kaavalla 1, jossa (r_s) on sisäsäde ja (s) on levyn aineenvahvuus. (Karppinen ym. 1986, 13.)

$$r_u = 1,25 \times r_s + s$$

Kaava 1. Ulkopuolisen taivutussäteen laskeminen likimääräisesti (Karppinen ym. 1986, 13).

Taulukoiden määrittelemiä taivutussäteitä on mahdollista tehdä myös pienempinä, jos levyaihion poikkipintaa pienennetään tekemällä siihen lovi tai ohueen levyyn vako kuvan 16 mukaisesti. Kyseistä menetelmää on käytettävä harkiten, eikä sitä suositella tehtävän varauksetta. (Karppinen ym. 1986, 13.)



Kuva 16. Keinot, joilla taivutussädettä voidaan pienentää: a) poikkipinnan pienentäminen loveamalla, b) vaon tekeminen ohueen levyyn ennen taivuttamista (Matilainen ym. 2010, 249).

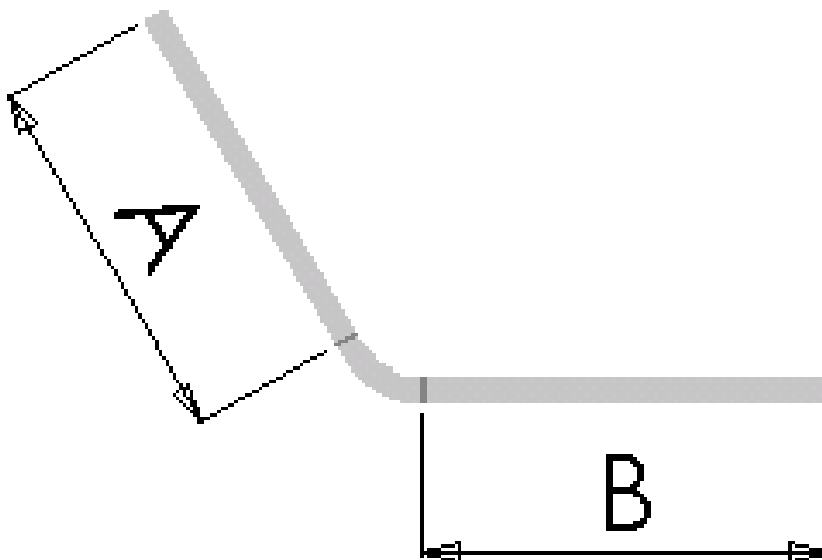
Taivutussädettä on mahdollista saada myös pienennettyä perforoimalla. Taivutuslinjaan leikataan reikäjono tai aukotus, jotta särmäys voidaan tehdä mahdollisimman pienellä taivutussäteellä. (Matilainen ym. 2010, 262.) Aukot tai reiät heikentävät kuitenkin rakenteellista lujuutta. Menetelmä on käytössä lähinnä protosarjoissa tai levyosissa, joiden särmäminen muilla menetelmillä on haastavaa ja kallista.

Ennen särmäämistä levyaihiolle määritetään oikaistu pituus. Kuten kuvassa 14 todettiin, taitoksen sisäpinta puristuu kokoon vähemmän kuin ulkopinta venyy, jolloin neutraaliakseli siirtyy taitoksen sisäpintaa kohti ja uloimmissa kerroksissa tapahtuu venymän vuoksi ohentumista. Neutraalikerroksen siirtyessä sisäänpäin levy venyy särmäyksen aikana, jolloin oikaistu pituus on todellisuudessa lyhyempi kuin särmätyn levyosan laippojen yhteenlaskettu pituus. Suurissa taivutussäteissä ($r > 50 \times s$) neutraalikerros sijaitsee levyaihion keskellä, jolloin pituus taivutettuna vastaa oikaistua pituutta ja erillisiä laskelmia ei välttämättä tarvitse tehdä. Särmättävän levyaihion oikaistu pituus voidaan laskea muun muassa kaavalla 2, jossa a ja b ovat laippojen pituudet. Laippojen pituuksien määrytykset ovat nähtävissä myös kuvassa 17. Kaavassa 2 oleva v – arvo on levyaihioista vähennettävä osuus, johon vaikuttavat taivutussäde, levyaihion aineenvahvuus sekä kulma. Toisin sanoen v on muuttuva korjaava tekijä. (Matilainen ym. 2010, 250–251.) Vähennettävä arvo v tunnetaan suunnitteluohjelmistoissa myös Bend Deductionina (BD).

$$L = a + b - v \quad \text{TAI} \quad L = a + b - BD$$

Kaava 2. Särmättävän levyaihion oikaistun pituuden laskentakaava (Matilainen ym. 2010, 251).

Kuvassa 17 määritetään laippojen pituudet. Kuvasta on havaittavissa, että vain levyaihion suorat osuudet otetaan huomioon.



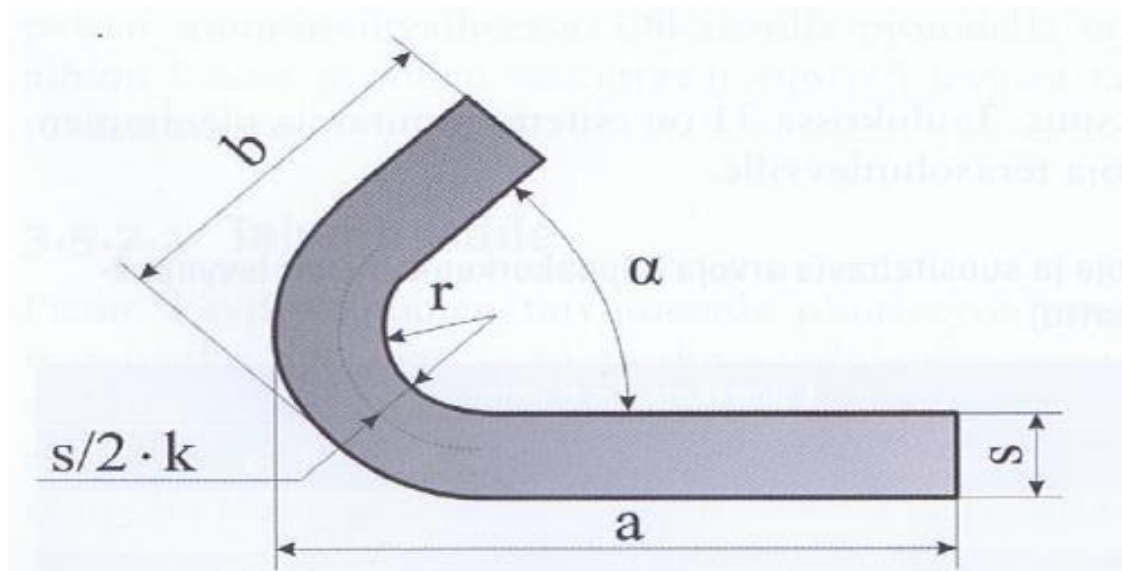
Kuva 17. Laippojen pituudet a ja b (SolidWorks web help 2018).

Oikaistun pituuden laskeminen voidaan suorittaa myös Bend Allowancen (BA) avulla. Kaavassa 3 a ja b ovat laippojen pituudet sekä BA on neutraaliakselin kaaren pituus.

$$L = a + b + BA$$

Kaava 3. Oikaistun pituuden laskeminen Bend Allowancen avulla (SolidWorks web help 2018).

Kuvassa 18 on esitetty tarkemmin parametrit, joilla levyaihion oikaaisu voidaan laskea (Matilainen ym. 2010, 250–251). Levyosien mallinnukseen käytettävät tietokoneohjelmat, kuten esimerkiksi SolidWorks, kykenevät laskemaan oikaistut pituudet, jos parametrit on määritetty oikein.



Kuva 18. Parametrit oikaistun pituuden laskemiseen. α = taivutuskulma, r = taivutussäde, s = materiaalin aineenvahvuus, a = alemman laipan pituus, b = ylemmän laipan pituus (Matilainen ym. 2010, 250).

v – tekijän arvot voidaan laskea myös valmiiksi taulukoihin, kun kyseessä ovat tietyt taivutuskulmat. Taulukkoon määritetään taivutussäteet sekä levynaihion aineenvahvuudet. (Matilainen ym. 2010, 251.) Taulukkoon voidaan määrittää myös erikseen särmättävät materiaalit, jolloin oikaistun pituuden mitta saadaan tarkemmaksi. Liitteessä 3 (7) esitetään JL Levytekniikka Oy:n taulukko oikaistaville pituuksille, joiden vapaataivutuksen (air bending) särmättävä kulma on 90° .

Ohutlevyjen särmäyksessä suuntaa antavana muistisääntönä voidaan pitää oikaistun pituuden lyhenemää (v / BD) noin kaksi kertaa aineenvahvuudesta, kun sisätaivutussäde (r_s) on aineenvahvuuden (s) mittainen. Liitteessä 3 (7) esitetyt oikaistut pituudet määritettiin 90° kulmille. Muille kulmille oikaistun pituuden v - arvo voidaan laskea esimerkiksi standardin DIN 6935 mukaisesti kaavoilla 4. Kaavoissa oleva k -kerroin määräytyy neutraaliakselin siirtymän (levyaihionsisäpinnasta katsottuna) sekä aineenvahvuuden suhteen (t/s). (Matilainen ym. 2010, 251.)

$$0^\circ < \alpha \leq 90^\circ$$

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

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

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

$$165^\circ < \alpha \leq 180^\circ$$

$$v = 0$$

Kaava 4. Standardin DIN 6935 mukaiset laskentakaavat v -arvon laskemiseksi särmätyn levyaihion oikaistussa pituudessa (Matilainen ym. 2010, 251).

Suunnittelijan on osattava laskea mahdollisimman tarkka oikaistu pituus materiaalista ja kulmasta riippumatta, jotta tarvittava valmistustarkkuus vastaa todellisuutta (Piironen 2013, 27). Liitteessä 3 (1-6) esitetään kuvitetut ja havainnollistavat esimerkkilaskelmat k -kertoimen, eli neutraaliakselin paikkaa kuvaavan suhdeluvun sekä Bend Allowancen (BA), eli neutraaliakselin kaaren pituuden ja Bend Deductionin (BD / v -arvo), eli oikaistun pituuden vähennettävän osuuden selvittämisestä.

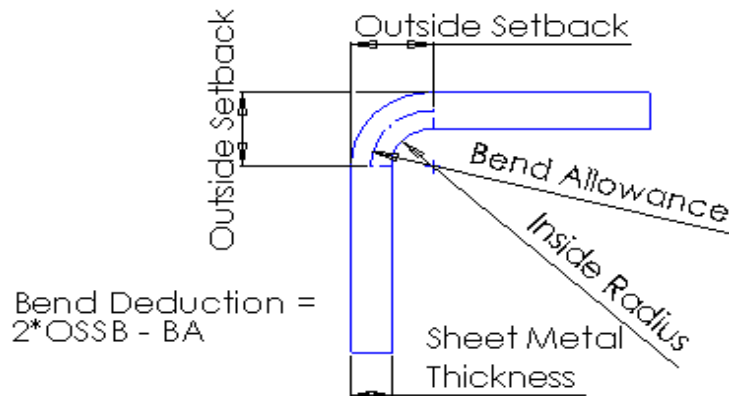
Esimerkkilaskelmissa tiedetään haluttu oikaistu pituus. Laskelmissa selvitetään laippojen pituudet ennen taivutussädettä, jonka jälkeen neutraaliakselin kaaren pituus (BA) on laskettavissa. Ennen k -kertoimen määrittämistä lasketaan neutraaliakselin kaaren säde ja neutraaliakselin etäisyys levyaihion sisäpinnasta. Vähennettävä arvo BD lasketaan selvittämällä ensin OSSB (outside setback) -mitta. Esimerkeissä selvitetään edellä mainitut arvot 90° , 60° ja 120° särmättäville kulmille.

Kun k -kerroin on tiedossa, voidaan Bend Allowance (BA) laskea myös kaavalla 5, jossa r = sisäsäde, k = k -kerroin (t/s), s = materiaalin aineenvahvuus ja α = särmättävä kulma asteina (Piironen 2013, 27).

$$BA = \frac{\pi \times (r + k \times s) \times \alpha}{180^\circ}$$

Kaava 5. Neutraaliakselin kaaren pituuden laskeminen (BA) (Piironen 2013, 27).

Kuvassa 19 esitetään tarkemmin BD:n laskemiseen tarvittavat parametrit.



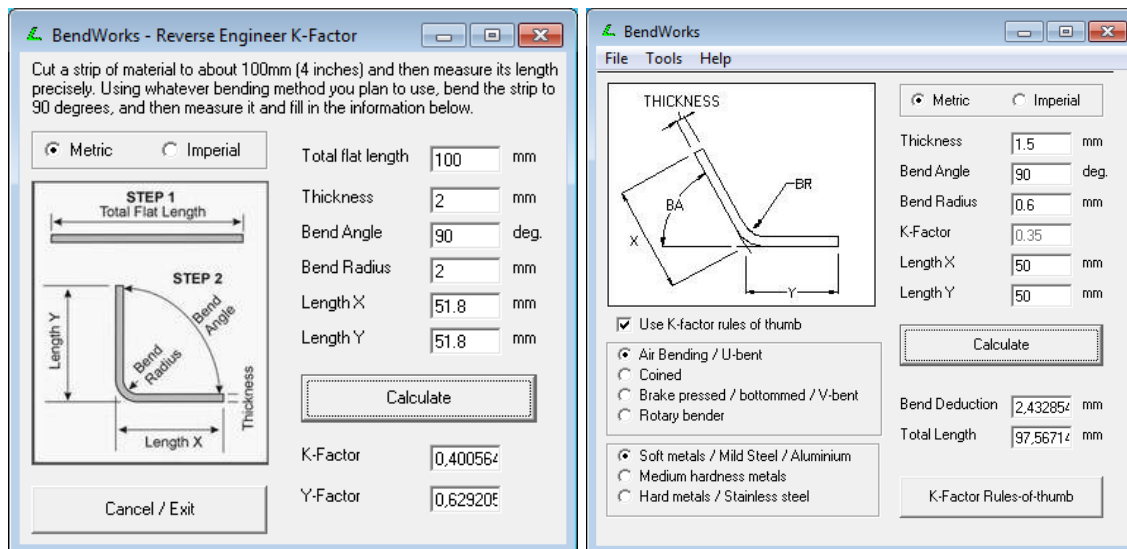
Kuva 19. Tarvittavat parametrit Bend Deductionin laskemiseen (SolidWorks web help 2018).

Usein taulukot ja kaavat antavat vain suuntaa antavan likimääräisen tuloksen. Tarkan oikaistun pituuden ja k-kertoimen määrittämiseksi tehdään särmäyskokeita, jotta voidaan määrittää mahdollisimman todelliset arvot. (Matilainen ym. 2010, 252.) Tarkkojen arvojen pohjalta on mahdollista tehdä eri materiaaleille esimerkiksi taulukon 17 mukaisia taitutusparametritaulukoita muun muassa SolidWorks 3D CAD – suunnitteluohjelmistoa varten.

Taulukko 17. Esimerkki taulukosta, jota käytetään SolidWorks 3D -ohjelmistossa oikaistun pituuden laskemiseen (JL Levytekniikka Oy 2018).

Thickness:	1,00	Mat-ker	0,95	K-kerroin	1,00	
Angle	Radius					
	0,1	0,6	3,0	5,0	10,0	100,0
1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	1,8
45	0,3	0,8	2,7	4,3	8,2	78,9
90	0,5	1,6	5,5	8,6	16,5	157,8
135	0,8	2,4	8,2	13,0	24,7	236,7
180	1,0	3,2	11,0	17,3	33,0	315,6
200	1,1	3,6	12,2	19,2	36,6	350,6

Nykyään on saatavilla myös erilaisia ohjelmia, joilla voidaan nopeasti laskea suuntaa antava k-kerroin (kuvassa 20 vasemmalla) sekä BD – arvo (kuvassa 20 oikealla). Valittavissa on myös taivutusmenetelmä sekä materiaalit karkeasti luokiteltuna.

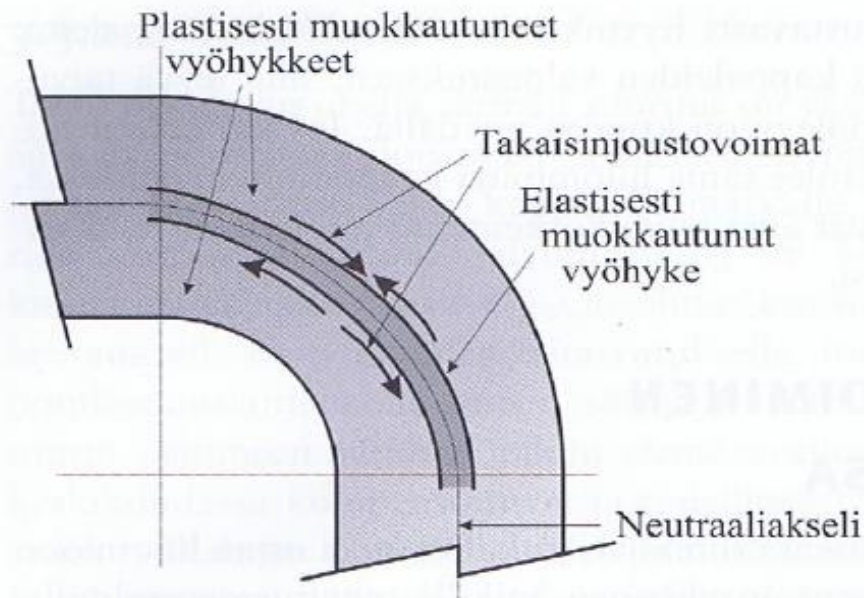


Kuva 20. Ilmainen BendWorks -ohjelmisto, jolla pystytään nopeasti laskemaan ja arvioimaan k-kerroin sekä BD – arvo (PLM Group Suomi Oy 2018).

5.7 Levymateriaalin takaisinjousto (Springback) särmäyksessä

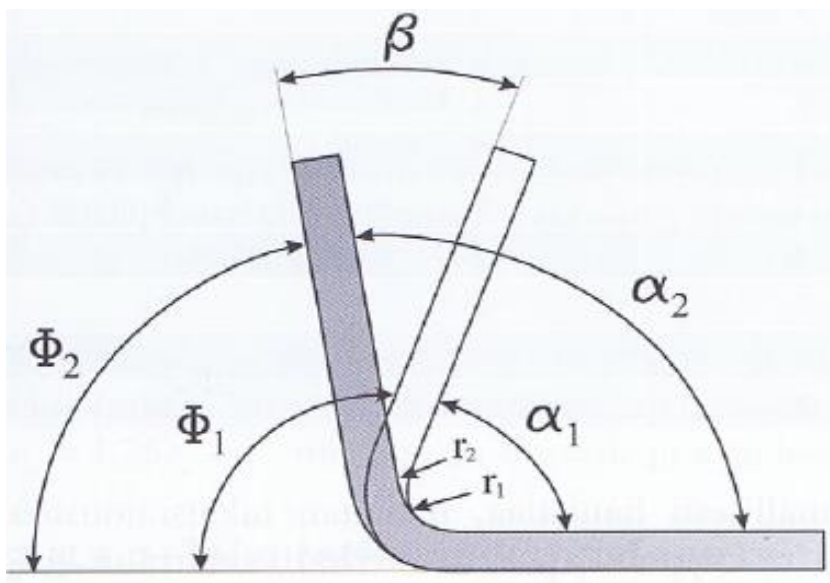
Takaisinjousto on ilmiö, joka ilmenee jollain tavalla kaikissa levyosien muokkauksissa, kuten muun muassa särmäyksessä. Takaisinjousto on vaikeasti hallittava ilmiö ja suunnittelussa tuleekin huomioida oikaistun pituuden, levyaihion koon, taivutussäteen sekä kappaleen koon lisäksi erityisesti takaisinjousto. (Matilainen ym. 2010, 245.) Särmäyksessä levyosan keskellä sijaitsevan neutraaliakselin kohdalle muodostuu plastisesti muokkautuneiden puristus- ja vetojännitysvyöhykkeiden väliin ohut vyöhyke, jossa tapahtuu vain elastista muodonmuutosta. Vyöhykkeessä, jossa elastista muodonmuutosta tapahtuu, aiheutuu reaktio, jossa ulkoisen voiman loputtua sisäistä voimatasapainoa ei saavutetakaan samalla hetkellä, kun levyaihion ulkopinnoilla saavutetaan jännityksetön tila. Tuolloin sisäiset jännitykset elastisessa vyöhykkeessä pyrkivät palauttamaan levyaihion takaisin siihen muotoon, jollainen se oli ennen särmäystä.

Plastisesti muodostuneet vyöhykkeet levyosan pintojen läheisyydessä pyrkivät kuitenkin vastustamaan elastisen vyöhykkeen sisäisiä jännityksiä. Sisäinen voimatasapaino saavutetaan, kun on tapahtunut jonkin suuruista muodon palautumista, eli takaisinjoustoaa. (Ihalainen ym. 2007, 237.) Muodonmuutosvyöhykkeet havainnollistetaan kuvassa 21.



Kuva 21. Takaisinjouston syntyyn vaikuttavat muodonmuutosvyöhykkeet särmättävän levyosan poikkileikkauksessa (Matilainen ym. 2010, 246).

Takaisinjoustoan vaikuttavat monet tekijät ja muuttajat, kuten esimerkiksi särmättävän levyaihion geometria, materiaali, materiaalin valssaussuunta, särmäyskone ja särmäysmenetelmä. Takaisinjousto esiintyy erityisesti vapaataivutuksessa. Takaisinjousto on mahdollista vähentää esilämmittämällä särmättävää levyaihiota, mutta käytännössä suoritetaan ylitaivutus, jotta saavutetaan haluttu kulma, kuten alaluvussa 5.2 todettiin. Poikkeuksena ovat pohjaaniskutaivutukset, joissa takaisinjousto on minimaalista ja se jätetään yleensä huomioimatta. (Matilainen ym. 2018, 246–247.) Kuvassa 22 esitetään takaisinjoustoan liittyviä suureita, joiden avulla takaisinjousto voidaan laskennallisesti arvioida eri materiaaleille.



Kuva 22. Särmäyksen takaisinjoustoan liittyviä suureita: α_1 kuvastaa särmättävää kulmaa, α_2 kertoo kulman särmäyksen jälkeen, β on takaisinjoustokulma, ϕ_1 on kaarikulma särmäyksessä, ja ϕ_2 on kaarikulma särmäyksen jälkeen (Matilainen ym. 2010, 247).

Takaisinjouston suuruutta pystytään kuvaamaan kaavan 6 takaisinjoustosuhteella k , jossa α_1 on taivutuskulma ennen takaisinjoustoja ja α_2 on taivutuskulma takaisinjoustoan jälkeen. Koska taikaisinjoustoan kokonaisvaltainen hallittavuus on erittäin hankalaa, pyritään koetaivutuksilla selvittämään kuvan 22 takaisinjoustokulma α_2 , jonka jälkeen voidaan tehdä samansuuruinen ylitaivutus. Koetaivutuksissa ongelmaksi voi muodostua eri materiaalien myötölujuus ja aineenvahvuusvaihtelut, joiden vuoksi tarkkoihin laskentatarvointiin on haastavaa päästä. Usein materiaalien standardit sallivat suhteellisen isoja poikkeamia, jolloin takaisinjoustoan ennustaminen on haastavaa. Koetaivutukset aiheuttavat lisäksi lisätyötä särmäyksessä, jolloin kustannukset pien- ja yksittäissarjoissa kasvavat helposti liian suuriksi. (Matilainen ym. 2010, 246–248.)

$$k = \frac{\alpha_2}{\alpha_1}$$

Kaava 6. Takaisinjoustoan suuruutta kuvaava takaisinjoustosuhte k , jolla takaisinjoustoja voidaan arvioida (Matilainen ym. 2010, 247).

Taulukossa 18 esitetään jonkin verran valmiita arvioita takaisinjoustopöydille eri taivutussäteillä, materiaaleilla ja aineenvahvuuksilla.

Taulukko 18. Takaisinjoustopöydä eri materiaaleille 90 ° särmäyksessä (Matilainen ym. 2010, 248).

Aineenvahvuus (s) [mm]	Taivutussäde r_s [mm]	Takaisinjoustopöytä β [°]		
		Pehmeä teräs Pehmeä messinki Alumiini	Keskikova teräs Kova messinki	Kova teräs
$\leq 0,8$	$< s$	4	5	7
	$s - 5s$	5	6	9
	$> 5s$	6	8	12
0,8 - 2,0	$< s$	2	2	4
	$s - 5s$	3	3	5
	$> 5s$	4	5	7
$> 2,0$	$< s$	0	0	2
	$s - 5s$	1	1	3
	$> 5s$	2	3	5

Takaisinjoustopöydä voidaan hallita esimerkiksi myös nykyaikaisilla ja teknisesti kehittyneillä Amadan särmäyspuristimilla, jotka ovat varustettu kuvassa 23 olevalla dynaamisella kulmankorjauksella (Bending Indicator Sensor BI-S). Koneen alapalkin molemmille puolille asennetaan mittausmoduulit jotka mittaavat ja korjaavat automaattisesti särmättävän levyosan kulmaa takaisinjoustopöytä huomioiden. Puristusvoimaa säädetään automaattisesti kulmankorjausvaiheen aikana. Kulmankorjausta voidaan tehdä myös laserohjatusti. (Ama-Prom Finland Oy 2018a.)



Kuva 23. Dynaaminen kulmankorjaus (Bending Indicator Sensor BI-S) (Ama-Prom Finland Oy 2018a).

5.8 Särmäyksessä tarvittava puristusvoima ja vastimen V – uran leveyden valinnan kriteerit

Särmättäessä levyosia, on tärkeää pystyä arvioimaan tarvittava vapaataivutuksen puristusvoima hyvän lopputuloksen saamiseksi. Puristusvoiman laskemiseen on olemassa useita erilaisia kaavoja, joista yksi on esitetty ylempänä kaavassa 7. Jotta voima (F) voidaan laskea, on särmättävän levyaihion murtolujuus (R_m), aineenvahvuus (s), särmättävä pituus (b), V – uran leveys (V) sekä vakioarvo (C) on tiedettävä tai laskettava erikseen kaavalla 7 (alempi). Vakioarvo (C) on usein alueella 1,2–1,5, mutta käyttämällä arvoa 1,5 voidaan vapaataivutukseen tarvittava puristusvoima laskea riittävällä tarkkuudella. Vakioarvo on määritelty aineenvahvuuden ja V – uran leveyden suhdelukuna. (Karppinen ym. 1986, 26.) Tarkemmin vakioarvo saadaan laskettua esimerkiksi kaavalla 7 (alempi) jossa (s) on aineenvahvuus ja (V) on vastimen V – uran leveys (JL Levytekniikka Oy 2018).

$$F = C \times \frac{R_m \times b \times s^2}{V}$$

$$C = 1,1 + (2,5 \times \frac{s}{V})$$

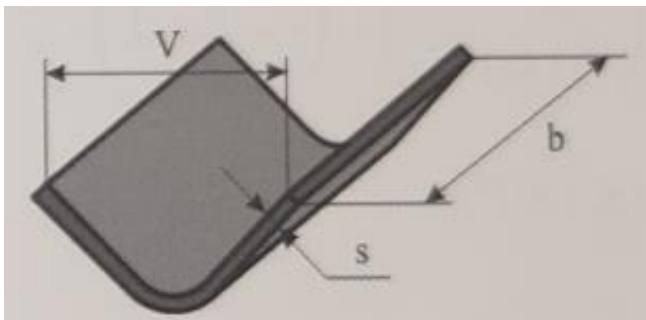
Kaava 7. Ylempänä särmäyksessä tarvittavan puristusvoiman laskemiseen tarvittava laskentakaava (Matilainen ym. 2010, 252). Alempana laskentakaava vakioarvo C:n laskemiseen (JL Levytekniikka Oy 2018).

Särmäysvoima on hyvin paljon riippuvainen painimen kärjen säteestä, kun särmätään levyosaa suurelle säteelle. Tarvittava puristusvoima vaihtelee tavallisesta pienisäteisestä särmäyksestä kaksinkertaiseen tai jopa kuusinkertaiseen määrään. (Karppinen ym. 1986, 26.) Särmäyspuristimien suuri valmistaja Amada on kokemusperäisillä tiedoilla tehnyt liitteen 3 (8) mukaisen taulukon, jolla voidaan teräkselle ja ruostumattomalle teräkselle arvioida tarvittava puristusvoima sekä suositeltava V – ura eri taivutussäteille ja ulkosärmille.

Kuvassa 24 esitetään esimerkkilaskelma, jossa murtolujuudella (R_m) 355 N/mm² olevaa rakenneterästä särmätään. Levymateriaalin aineenvahvuus (s) on 4,0 mm. Levyaihion pituus (b) on 500 mm. Vastimen V – uran (V) mitaksi on valikoitunut 25 mm ja vakioarvoksi (C) 1,3. Laskelmista havaitaan, että tarvittava puristusvoima on 147,680 kN:a.

Esimerkkilaskelmassa olevan rakenneteräksen S355 tarvittava puristusvoima on 15 % suurempi kuin lujan muovattavan RAEX 355 MC OPTIM -teräksen. RAEX 650 MC OPTIM – teräksen särmäämiseen tarvittava puristusvoima on noin 1,5 – kertainen verrattuna S355 rakenneteräkseen, vaikka RAEX 650 MC OPTIM – teräksen myötölujuus on yli 1,8 – kertainen. Suunniteltaessa levyosien särmäämistä, parhaimpaan lopputulokseen päästään kokemukseräisellä ja teoreettisella tiedolla, johon liittyy myös tieto särmäystyökalujen kunnosta. (Matilainen ym. 2010, 252.)

Taivutukseen tarvittava voima (F). Kaava ja esimerkkilaskelma.		
<i>Levyn_murtolujuus</i>	<i>Levyateriaalin_aineenvahvuus</i>	<i>Vakiokerroin_1.2–1.5</i>
$R_m := 355 \frac{N}{mm^2}$	$s := 4 \text{ mm}$	$C := 1.3$
<i>Taivutettava_pituus</i>	<i>Särmäyspuristimen_vastimen_V-aukon_leveys</i>	
$b := 500 \text{ mm}$	$V := 25 \text{ mm}$	
<i>Tarvittava_puristusvoima</i>		
$F := C \cdot \frac{R_m \cdot b \cdot s^2}{V} = 147680 \text{ N} \quad \text{Eli } 147.680 \text{ kN}$		



Kuva 24. Taivutusvoiman laskennalle havainnollistava kuva (Matilainen ym. 2010, 246). Esimerkkilaskelma on tehty MathCad ohjelmistolla.

Oikea V – uran leveys voidaan valita huomioimalla särmättävän levyosan aineenvahvuus, myötölujuus ja sisäpuolinen taivutussäde. Käytännössä huomioidaan usein vain materiaalin aineenvahvuus. Jos on mahdollista valita mahdollisimman suuri V – ura, on tarvittava puristusvoima pienempi, kuten kaavalla 7 voidaan todeta.

Liian suuri V-ura voi kuitenkin aiheuttaa tukipintojen hankautumisen vuoksi levyn pinnalle naarmuja ja jälkiä. Särmättäessä ohutlevyjä pienellä taivutussäteellä, käytetään usein V – uran valinnassa 6 -kertaista aineenvahvuutta (s), vaikka suosituksena on 8 -kertainen aineenvahvuus (s), sekä lujuutta vaativissa kohteissa se on 10–12 -kertainen aineenvahvuus (s). Nimellispuristusvoima ilmoitetaan aina suosituksen mukaan. Taulukossa 19 esitetään V – uran leveyden valinnassa käytettäviä suositusarvoja. (Karppinen ym. 1986,25–26.)

Taulukko 19. V – uran leveyden valinnassa käytettäviä suosituksia (Matilainen ym. 2010, 243).

V -uran leveys	Rajoitukset
8 x s ₀	Aineenvahvuus s ₀ < 12 mm Murtolujuus R _m < 400 Mpa
10 x s ₀	Aineenvahvuus s ₀ > 12 mm
10–12 x s ₀	Murtolujuus R _m > 400 Mpa

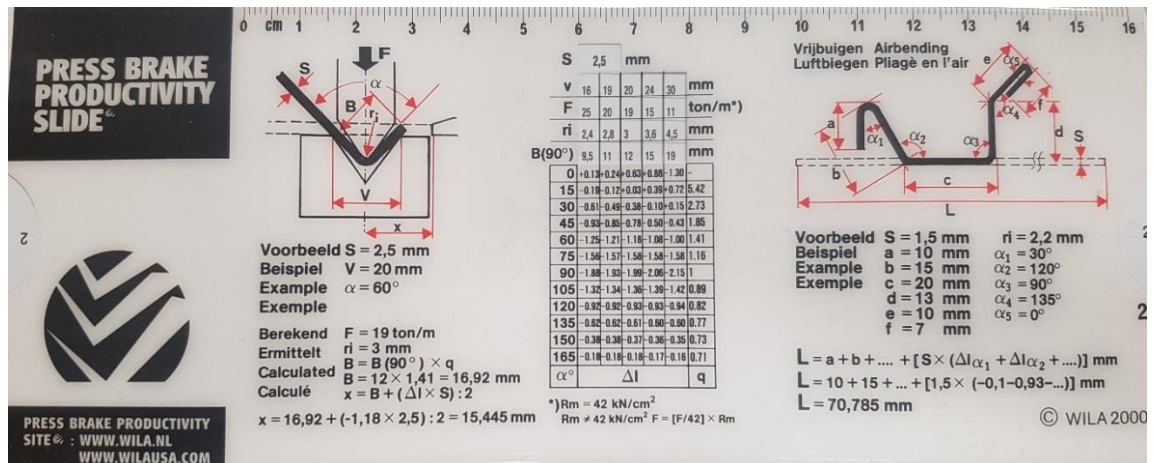
Mitä pehmeämpää särmättävä materiaali on, sitä pienemmäksi voidaan V – ura valita. Jos painimen kärkisäde on aineenvahvuuden suuruinen tai vähän pienempi, sisäsäteeksi tulee noin 15 % V – uran leveydestä. (Karppinen ym. 1986, 26.)

Väljyysluvulla (w) voidaan kuvata taivutusgeometrian suhdetta särmättävän levyaihion aineenvahvuuteen. Väljyysluku kuvastaa millainen tila jää painimen ja vastimen väliin särmäyksen aikana. Väljyysluku voidaan tarvittaessa laskea kaavalla 8, jossa V on V – uran leveys, r_p on painimen säde, ja s₀ on materiaalin aineenvahvuus. Väljyysluvun arvon ollessa lähellä nollaa taivutusgeometria on liian ahdas verrattuna materiaalin aineenvahvuuteen. Yleisesti rakenneterästä särmättäessä arvo 1 kuvastaa tavanomaista taivutusgeometriaa. (Matilainen ym. 2010, 243.)

$$w = \frac{V}{2 \times (r_p + s_0)} - 1$$

Kaava 8. Väljyysluvun (w) laskemiseen käytettävä laskukaava (Matilainen ym. 2010, 243).

Jos särmättävän materiaalin aineenvahvuus tiedetään, voidaan taivutusvoimaa, V-uran valintaa sekä särmäyksen sisäsädettä arvioida myös kuvan 25 mukaisella laskentataulukolla. Taulukon arvot ovat suuntaa antavia, mutta usein riittäviä, jotta tarvittavaa puristusvoimaa voidaan arvioida.

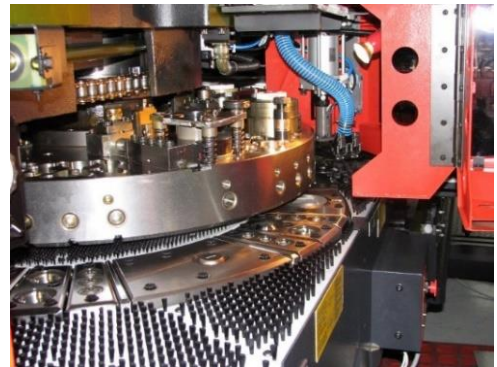


Kuva 25. Särmäysvoiman ja V-uran valinta suuntaa antavalla laskentataulukolla (JL Levyteknikka Oy 2018).

5.9 Levytyökeskus ja laserleikkauskone särmättävien levyaihioiden leikkaajina/lävistäjinä

Särmäykseen tulevat levyaihiot leikataan usein teknisesti kehittyneillä ja moderneilla levytyökeskuksilla tai laserleikkauskoneilla, jotta päästään sellaisiin tarkkuusvaatimuksiin, joita särmäyksessä nykyään vaaditaan. Kuvassa 26 on esitelty meistotekniikkaan perustuva Amadan servokäyttöinen levytyökeskus EMZ 3510 NT. Levytyökeskuksessa on 45 paikkainen Z – työkalurevolveri, johon mahtuu 4 automaattista index – asemaa. Index-asemilla voidaan ohjelmallisesti pyörittää työkalua 360° , jopa $0,01^\circ$ -akselilla. Amadan EMZ 3510 NT – konetta kutsutaan myös energiatehokkaaksi, elektromeekaaniseksi levytyökeskukseksi. Fanuc AMNC-F – numeerisesti ohjatun koneen ohjelmointi ja leikattavien levyaihioiden nestaus (leikattavien levyosien optimoitu ryhmittely levyaihioille) voidaan suorittaa etänä esimerkiksi Amadan Dr Abe Blank – ohjelmistolla tai PUNCH 5 – ohjelmistolla, joista tosin puuttuu nestautoiminto. Erittäin nopea levyaihioiden lävistys tapahtuu kahdella sähköisellä servomootorilla, jotka on kytketty epäkeskoakseliin päihin. (Ama-Prom Finland Oy 2018a.)

Koneen suorituskyky on parhaimmillaan nopeissa lävistystöissä, kun tarpeena on tehdä lyhyitä valmistussarjoja, joihin liittyy esimerkiksi särmäystä. 300 kN:nin puristusvoimalla on mahdollista saavuttaa erinomainen leikkuupinta ja tarkkuus. Koneella on mahdollista tehdä korkealuokkaisia muotoiluja, kuten kuppeja ja kauluksia, aina 12,7 mm asti. Leikkuupöydät koostuvat sadoista pienistä harjoista, joiden ansiosta muun muassa alumiinit sekä ruostumattomat teräkset, voidaan työstää ilman naarmuja ja jälkiä. (Ama-Prom Finland Oy 2018a.)



Kuva 26. Kuvassa vasemmalla servokäyttöinen levytyökeskus EMZ 3510 NT ja oikealla koneen 45 paikkainen työkalurevolveri, jossa on mustaa harjapöytää nähtävissä (JL Levytekniikka Oy 2018).

Nykyään on hyvin paljon käytössä myös teknisesti pitkälle kehittyneitä kuitulaserkoneita, jotka ovat tulleet esimerkiksi perinteisesti tunnetun hiilidioksidilaserkoneen (CO₂ – laser) rinnalle. Särmäykseen tulevia levyaihioita voidaan leikata esimerkiksi kuvan 27 Amadan valmistamalla LCG 3015 AJ – kuitulaserilla. Kuitulasertekniikalla voidaan leikata nopeasti haastavankin muotoisia ja laadukkaita levyaihioita mittatarkasti särmäystä varten. Koneella voidaan leikata myös jalometalleja, kuten kuparia ja kupariseoksia. Käytettävistä suojakaasusta riippuu, tarvitseeko leikkuusärmä lainkaan jatkokäsittelyä. CO₂ – laseriin verrattuna kuitulaserin käyttö ja huoltokustannukset ovat huomattavasti pienemmät. Kuitulaser on monissa eri materiaaleissa myös nopeampi kuin CO₂ – laser. (Ama-Prom Finland Oy 2018a.)

Nykyään myös suuremmissa aineenvahvuuksissa nopeuserot ja leikkuusärmän laatu ovat hyvin lähellä CO₂-laseria, elleivät ole jo jopa parempia. Energiatehokkaassa LCG 3015 AJ – koneessa on automaattinen suuttimen vaihtaja, jossa on mahdollista säilyttää 8 suutinta eri materiaaleille. Kone myös puhdistaa suuttimet ohjelmoidusti. Amadan nykyaikaisten kuitulaserien CNC – ohjaus hoidetaan uuden sukupolven AMNC 3i – numeerisella ohjauksella. Ohjelmointi ja nestaus voidaan tehdä etänä esimerkiksi Amadan Solution Pack VPSS3i Blank – ohjelmistolla. (Ama-Prom Finland Oy 2018a.)



Kuva 27. Amadan valmistama, teknisesti kehittynyt ja tehokas 6kW LCG 3015 AJ -kuitulaser (Ama-Prom Finland Oy 2018a).

6 SÄRMÄYKSEN HUOMIOIMINEN SUUNNITTELUSSA

Ohutlevyosien valmistuksessa esiintyy melkein poikkeuksetta neljä erilaista piirrettä, jotka ovat vakiotyövaihejärjestys, leikkauksen hallitseva asema keskeneräisen tuotannon (KET) ja töiden aloituksen säätäjänä, tilantarve särmäyksen jälkeen ja ohutlevyosien käsittelytarkkuus. Ohutlevyosien valmistusvirtaus on yhdensuuntainen. Tuotannonohjauksessa on, lävistyksen merkityksen lisäksi, huomioitava tarkasti levyosien vaatima tilantarve särmäyksen jälkeen, jotta kokonaisläpimenoajat saadaan minimoitua ja tuotteeseen sidottu pääoma saadaan pienennettyä. (Holopainen 11/1984, 2.)

Valmistettavien tuotteiden ulkonäöllä on usein suuri merkitys ja monet ideat malleihin tulevat muotoilijoilta. Suunnittelun lähtökohtana on tuolloin tuotteen ulkonäöllinen houkuttelevuus markkinoilla. Usein saatetaan pohtia vain, miten särmättävä levyosa toimii halutussa kokonaisuudessa eikä valmistettavuutta välttämättä mietitä kovin tarkasti. Suunniteltaessa särmättäviä levyosia korostuu, ehkä monia muita menetelmiä useammin, valmistustekninen asiantuntemus. Suunnittelussa syntyy helposti virheitä, jos huomioidaan vain kahta edellä mainittua ajattelutapaa. Kustannustehokkaan valmistuksen kannalta suunnittelijan olisi pyrittävä hahmottamaan valmistusmenetelmät ja materiaalivalinnat jo suunnittelun luonnosvaiheessa. Asiantuntemuksen pohjalta voidaan mitoittaa muun muassa särmättävien tuotteiden muodot ja koot, dimensiot, laippakorkeudet, muiden muotojen sijainnit taivutuslinjasta ja taivutuksien sijainnit soveltuviksi särmäyspuristimille. (Matilainen ym. 2010, 255–256).

Ohutlevysuunnittelussa olisi tärkeää huomioida esimerkiksi materiaalit, niiden aineenvahvuudet ja ominaisuudet, vaadittu laatu (toleranssit), geometria, taivutuspituus, taivutuskulma, taivutussäde, lovet ja reiät, laippojen korkeudet, liitoskohdat, sisäpuoliset taivutukset, erikoismuodot ja levyosan sivuttaiset muodot. (Matilainen ym. 2010, 255–256). Jotta suunnittelija kykenee huomioimaan valmistettavuutta kokonaisuudessaan, voidaan hyödyntää DFM – tuotekehitysmenetelmää.

6.1 Valmistettavuuden ja kokoonpantavuuden (DFMA) huomioiminen suunnittelussa

Valmistettavuus, eli DFM (Design for Manufacturability) – tuotekehitysmenetelmä sisältää kaikki valmistettavaan tuotteeseen liittyvät järjestelyt ja menetelmät, jotka yksinkertaistavat valmistamista ja alentavat kokonaisuudessaan valmistuskuluja. DFA (Design for Assembly) – menetelmä keskittyy valmistettavan tuotteen yksinkertaiseen kokoonpantavuuteen. (Lempiäinen & Savolainen 2003, 13.) Lyhenne DFMA (Design for Manufacturability and Assembly) tarkoittaa lyhykäisyydessään tuotesuunnittelua, jossa valmistettava tuote suunnitellaan niin, että kokoonpano on mahdollisimman virheetön ja yksinkertainen. DFMA -menetelmässä kokoonpano on keskeinen tekijä ja toimii tuotteen integroivana tekijänä. (Hietikko 2015, 16–17.) Suunniteltaessa särmättäviä levyosia, keskitytään lähinnä tuotteen valmistettavuuteen, vaikkakin kokoonpantavuus on myös huomioitava. Tämän vuoksi kokoonpantavuus jää tässä opinnäytetyössä vähäiselle huomiolle. (Lempiäinen & Savolainen 2003, 14–41.)

Usein tuotteita suunnitellaan hyvin lyhyellä aikataululla ja ”paineella”, jonka vuoksi valmistettavuuteen ei pystytä kiinnittämään riittävästi huomiota. Ongelmana on usein myös yrityksen johdon sitoutumattomuus DFM – menetelmään, jolloin siitä ei saada täyttä hyötyä suunnittelun avuksi. DFM:n voidaan sanoa olevan ajattelutapa, jossa huomion keskipisteenä ovat suunnittelun ja valmistusseuraamusten vuorovaikutukset. DFM on lisäksi joukko erityisiä tuotekehitysprosessin työkaluja, jotka jaetaan seitsemään eri osaan ja suunnitelman läpikäynti neljään eri tuotetasoon. DFM:n käyttöönotto aloitetaan johdon ja suunnittelun perehdyttämällä menetelmän periaatteisiin, joissa kuvatus lainen ajattelutapa on kaiken lähtökohta. (Lempiäinen & Savolainen 2003, 14–41.)

Valmistettavuuden seitsemään eri askeleeseen kuuluvat DFM – diagnoosi, DFM – tavoitteiden asettaminen, päätoimintojen määrittely, kehitysparametrien- ja suunnitteluideoiden selvennys, konseptisuunnittelu, erittely ja valinta sekä viimeisenä siirtyminen tuotesuunnitteluun. Diagnoosissa tutkitaan valmistettavan tuotteen valmistusympäristö ja portfolio. Myös tuotteen nykyinen valmistettavuus tutkitaan, jotta muun muassa mahdolliset ongelmat, läpimenoajat, toimitusajat, henkilöstön tuottavuus, riskit, tuotannon joustavuus sekä muuttuvat- ja kiinteät kustannukset saadaan selvitettyä. Diagnoosissa selvitetään myös kilpailijoiden valmistamien tuotteiden valmistettavuutta, yleensä vertailu tehdään 3-4 kilpailijan tuotteisiin. Saatuja tietoja hyödynnetään DFA – menetelmässä. (Lempiäinen & Savolainen 2003, 14–41.)

Tavoitteet pyritään asettamaan korkealle, jotta saavutetaan kilpailukyky nyt ja tulevaisuudessa. Tavoitteissa määritetään tärkeimmät laatuun vaikuttavat tekijät, selvitetään läpimenoajat, määrät, riskit ja joustavuus sekä toimitusajat tulevalle tuotannolle. Lisäksi määritetään kiinteiden- ja muuttuvien kustannuksien aiheuttajat. Mahdollisten investointien tekeminen ja niihin liittyvät kustannukset, takaisinmaksuajat ja tuotantoseisokit selvitetään. Myös prioriteettijärjestyksellä on merkitystä, jonka vuoksi se huomioidaan tavoitteiden asetuksessa. (Lempiäinen & Savolainen 2003, 14–41.)

Seuraavaksi määritetään valmistettavan tuotteen kaikki päätoiminnot, optioiden toiminnot ja tutkitaan eri toimintojen väliset rajapinnat. Päätoiminnoille listataan tuotteen valmistettavuustekijät sekä kriittiset- ja tekniset vaatimukset. Kriittiset- ja tekniset vaatimukset sekä valmistettavuustekijät listataan myös tuotteen yritys-, tuoteperhe-, rakenne- ja komponenttitasoilla. Erilaisia tehokkaita DFM – ideoita kerätään ja selvitetään tuotteen yritys-, tuoteperhe-, rakenne- ja komponenttitasoilla. (Lempiäinen & Savolainen 2003, 14–41.)

Konseptisuunnittelu perustuu aikaisemmin syntyneisiin DFM – ideoihin. Konseptisuunnittelussa luodaan vaihtoehtoisia tuotekonsepteja, joita vertaamalla saadaan määriteltyä optimaalinen tuotekonsepti. Ilman vaihtoehtoja, tuotteen valmistus ei välttämättä ole kustannustehokasta, josta seuraa, että kilpailukyky tuotteen osalta on heikolla tasolla. Mallituotteelle pyritään luomaan monia erilaisia ratkaisuja. Seikat, joita huomioidaan ratkaisujen määrittelyssä, ovat valmistuskustannukset, laatu, joustavuus, riskienhallinta, valmistusaika, ohjattavuus, ympäristövaikutukset ja elinkaarikulut. (Lempiäinen & Savolainen 2003, 14–41.)

Erittely ja valinta -askeleessa vertaillaan vaihtoehtoja ja tehdään valinta esimerkiksi matriisin avulla. Matriisiin voidaan eriyttää arviointiparametrit ja konseptisuunnitelmat omille osioilleen. Kaikki suoritustekijät on mahdollista pilkkoa tarkempiin osa-alueisiin, jotta suorituskykyä on mahdollista arvioida paremmin. DFM:n pääasiallinen tarkoitus on parantaa tuotteen valmistettavuutta, säilyttäen kuitenkin jo saavutettu laatutaso. Usein parhain suunnittelukonsepti löydetään suorituskykyvertailulla. (Lempiäinen & Savolainen 2003, 14–41.)

Viimeisessä askeleessa siirrytään tuotesuunnitteluun, jos valittu DFM – konsepti on johdon mielestä riittävän vakuuttava. Tuotesuunnittelussa kehitysprojekti muuttuu suunnitelman muuttamiseksi myytäväksi tuotteeksi. Riippuen saatavilla olevista resursseista, askeleet 1-6 on mahdollista toteuttaa milloin vain, jotta käyttövalmiita DFM – konsepteja on mahdollista siirtää oikealla ajoituksella tuotesuunnitteluun. (Lempiäinen & Savolainen 2003, 14–41.) Nykyisin keskustellaan paljon myös valmistettavan tuotteen elinkaarihallinnasta, jossa huomioidaan kaikki idean ja käytön poiston väliltä (Hietikko 2015, 19).

Valmistettavuus voidaan nähdä tuotekehitysprosessina, jonka jälkeen tehdään varsinainen suunnittelu. Suunnittelun jälkeen valmistetaan usein protosarja, jossa valmistettavuus optimoidaan tasaisen ja hallitun laadun saavuttamiseksi, jotta valmistus olisi alusta alkaen kannattavaa valmistussarjojen koosta riippumatta.

6.2 Nykyaikaiset työstöohjelmistot suunnittelijan apuna

Suunnittelijan on huomioitava ohutlevytuotteen suunnittelussa leikattavan materiaalin maksimaalisen hyötykäytön lisäksi myös raaka-aineiden hinnat, jotka nykyisillä markkinoilla muuttuvat hyvin usein. Leikkauksessa voidaan käyttää esimerkiksi Amadan Solution Pack Blanking – ohjelmistoa, jonka avulla leikattavan levymateriaalin hyötykäyttö pystytään maksimoimaan lisäämällä aihioon pienimmätkin osat.

Särmäyksen ohjelmointiin voidaan käyttää Solution Pack Bend – ohjelmistoa, johon pystytään tuomaan 2D – tiedostoja DXF- ja DWG – muodossa tai 3D – malleja useiden eri ohjelmistovalmistajien tiedostomuodoissa. Särmäysohjelmia voidaan tehdä tarvittaessa työjonoon, tarvittavat työkalut ja taivutusjärjestykset voidaan hakea automaattisesti ja särmäysohjelma on simuloitavissa ennen särmäyksen aloittamista, jotta pystytään selvittämään mahdolliset törmäykset ja muut ongelmat. Solution Pack Bend – ohjelmistossa on työkalukirjasto, johon on mahdollista syöttää yrityksessä käytössä olevat työkalutiedot, joita käytetään ensisijaisesti. Oikeilla työkaluvalinnoilla vältetään tilanteelta, jossa työkalupuute havaitaan juuri ennen särmäyksen aloitusta.

Ohjelmisto sisältää myös kattavan materiaalikirjaston, jonka tiedoilla ohjelma pystyy laskemaan Bend Allowance – arvon tarkasti ennen särmättävän aihion levitystä. Ohjelmistossa on mahdollista myös muokata levyaihoita ennen särmäystä. Kaikki tiedot säilytetään keskitetysti palvelimella. (Ama-Prom Finland Oy 2018a).

Kuvassa 28 havainnollistetaan Amadan uuden sukupolven ohjelmistoja, joissa on nähtävissä teknisen kehityksen suunta. Esimerkiksi särmäyksessä tehdään ensin särmäysohjelma Bend – ohjelmistolla, jonka jälkeen tehdään leikkausohjelma Blank – ohjelmistolla. Perinteisesti työvaiheet ovat olleet toisin päin. Uudella menetelmällä vältetään mitavirheitä särmäyksessä. Jos käytössä on esimerkiksi SolidWorks – ohjelmisto, jossa Bend Allowance – arvot on määritetty tarkasti taivutuskokeilla, ongelmia ei pitäisi särmäyksessä syntyä.



Kuva 28. Amadan työstöohjelmistot hitsaukseen-, särmäykseen- ja leikkaukseen (Ama-Prom Finland Oy 2018a).

6.3 Särmättävien laippojen korkeudet sekä lovien- ja reikien sijainti levyosan taivutuslinjasta

Särmäyksen onnistumiseen vaikuttavat monet eri tekijät, kuten särmättävät materiaalit, oikaistu pituus ja taivutussäde joista materiaaleja käsiteltiin tarkemmin luvussa 4 ja oikaistua pituutta ja taivutussädettä alaluvussa 5.4. Myös levyosan koolla ja muodolla on tärkeä merkitys, jotta päästään haluttuun lopputulokseen. Suunnittelussa tulee näin ollen huomioida myös levyosan laippojen korkeudet. Suunniteltaessa särmättäviä levyosia, särmättävän osan mitat huomioidaan tuotteen toiminnallisten rajoitteiden lisäksi myös koneen rajoitteet huomioiden. (Matilainen ym. 2010, 245–249.)

Särmäyksessä yleisimmät koneen aiheuttamat rajoitteet aiheutuvat levyosan laipan kiinnittämisestä koneen yläpalkkiin tai teräpitimeen. Mahdollisia ratkaisuja kyseiseen ongelmaan käsitellään tarkemmin alaluvussa 7.3.1. Suunnittelussa on myös pystyttävä laskemaan tai hahmottamaan laipan minimipituudet, jotta levyosa on ylipäättään särmättävissä. Laipan minimikorkeus särmäykseen voidaan laskea likimääräisesti kaavalla 9.

$$b = r_s + 2 \times s$$

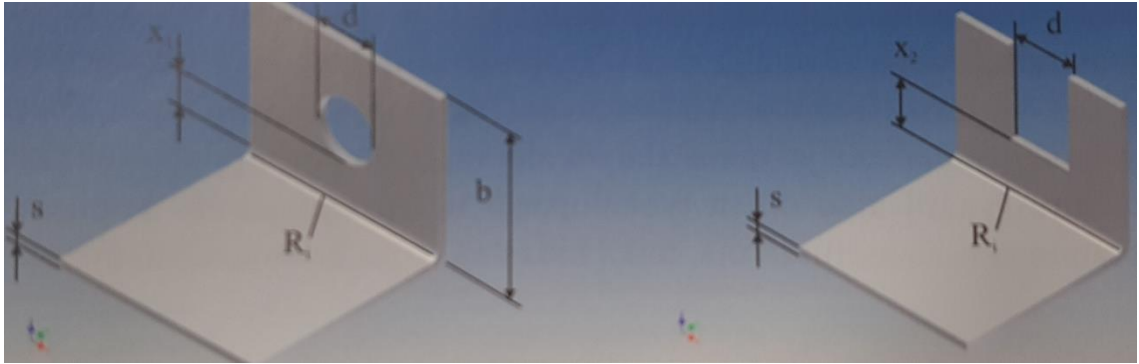
Kaava 9. Minimilaipan korkeuden laskemiseen käytettävä kaava, jossa b on minimilaippakorkeus, r_s on sisäsäde ja s on levyaihion aineenvahvuus (Matilainen ym. 2010, 249).

Teräsohutlevyjen minimilaippakorkeuksia esitetään myös taulukossa 20, jossa on nähtävissä myös suositeltavat laippakorkeudet (Matilainen ym. 2010, 249).

Taulukko 20. Minimi- ja suositusarvoja teräsohutlevyjen laippakorkeuksille eri aineenvahvuuksilla, kun $r_s = s$ (Matilainen ym. 2010, 249).

Levyn paksuus s (mm)	Laippakorkeus b (mm)	
	Minimi	Suositus
0,50	1,50	2,80
0,75	2,30	4,70
1,00	3,00	5,60
1,25	3,80	6,80
1,50	4,50	9,40
2,00	6,00	10,60
2,50	7,50	14,00
3,00	9,00	17,00

Särmättävissä levyosissa on usein erilaisia lovia ja reikiä, joita havainnollistetaan kuvassa 29. Kuvassa vasemmalla olevan pyöreän muodon minimietäisyyttä kuvataan muuttujalla x_1 ja oikealla lovien minimietäisyyttä muuttujalla x_2 . Lähtökohtaisesti tällaisia muotoja ei voida sijoittaa taivutuslinjojen välittömään läheisyyteen, jos muotojen mitat halutaan pitää tarkkoina. (Matilainen ym. 2010, 257.) Alaluvussa 5.6 todettiin materiaalin venyvän taivutussäteen ulkoreunalla ja vastaavasti sisäreunalla puristuvan. Tämän vuoksi liian lähellä taivutuslinjaa olevat muodot eivät ole enää mittatarkkoja.



Kuva 29. Levyosat, jotka sisältävät reikiä ja lovia (Matilainen ym. 2010, 258).

Reikien minimietäisyydet taivutuslinjasta voidaan laskea kaavalla 10, jossa x_1 on minimitaivutusetäisyys, d on reiän halkaisija, R_i on taivutuksen sisäsäde, b on särmättävän laipan pituus ja s on levyn aineenvahvuus (Matilainen ym. 2010, 258.)

$$x_1 = \sqrt{d \times s} + 0,8R_i \times \sqrt{\frac{b}{d}}$$

Kaava 10. Reikien minimietäisyyksien laskeminen taivutuslinjasta (Matilainen ym. 2010, 258).

Lovien minimietäisyydet taivutuslinjasta voidaan laskea kaavalla 11, jossa x_2 on minimitaivutusetäisyys, d on loven leveys, R_i on taivutuksen sisäsäde, b on särmättävän laipan pituus ja s on levyn aineenvahvuus (Matilainen ym. 2010, 258).

$$x_2 = 1,1\sqrt{d \times s} + 0,8R_i \times \sqrt{\frac{b}{d}}$$

Kaava 11. Lovien minimietäisyyksien laskeminen taivutuslinjasta (Matilainen ym. 2010, 258).

Yleisenä sääntönä voidaan pitää, että lovet ja reiät sijoitetaan mahdollisimman kauas taivutuslinjasta kuin mitä lyhin mahdollinen särmättävän sivun pituus on. Lyhin mahdollinen sivun pituus b voidaan määrittää kaavalla 12, jossa W on vastimen V -uran leveys. Huomioimalla sivun minimipituus b voidaan varmistua reikien ja lovien jäävän V -uran ulkopuolelle. (Matilainen ym. 2010, 258.)

$$b = \frac{\sqrt{2}}{2} \times W$$

Kaava 12. Lyhimmän mahdollisen sivun pituuden b laskeminen 90° -kulman V -uralle (Matilainen ym. 2010, 258).

Alaluvussa 7.3.3 esitellään menetelmää, jolla on mahdollista särmätä levyosia, joissa reiät ja muodot eivät menetä muotoaan, vaikka niiden sijainti on lähellä taivutuslinjaa. Menetelmällä on mahdollista särmätä myös levyosia, joiden sivun pituudet ovat kaavojen antamia arvoja pienemmät.

6.4 Suunnittelusääntöjä ohutlevyosien särmäykseen

Onnistuneeseen ja kustannustehokkaaseen särmäystulokseen vaikuttaa hyvin moni tekijä, kuten aikaisemmin todettiin. Usein kaikkien tekijöiden huomioiminen samanaikaisesti on lähes mahdotonta. Yleisimmät suunnitteluvirheet, joita suunnittelijoille tapahtuu, ovat liian lyhyet laippakorkeudet, reiät ja lovet ovat liian lähellä taivutuslinjaa tai särmättävän levyosan laippa törmää särmäyspuristimen yläpalkkiin. (Matilainen ym. 2010, 264.)

Kuten alaluvussa 5.2 todettiin, simuloinnilla voidaan välttää edellä mainitut virheet ja todeta särmäysohjelman ongelmaton toimivuus ennen varsinaista särmäystä. Simulointia havainnollistetaan lisäksi alaluvussa 7.2.

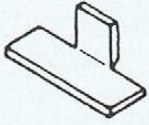
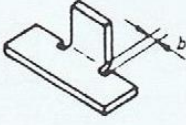
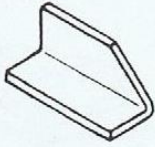
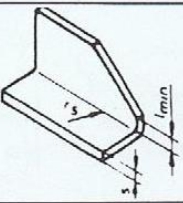
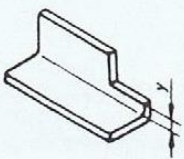
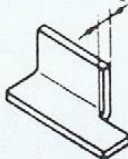
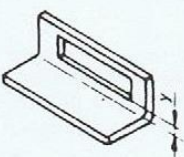
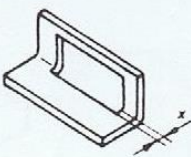
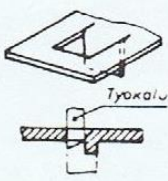
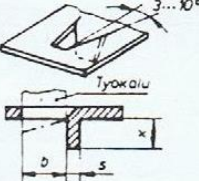


Ohutlevyosien suunnittelussa pyritään yhtenäistämään materiaalien aineenvahvuudet ja sisäsaiteet kustannustehokkaan valmistuksen saavuttamiseksi. Usein särmättävät levyosat tarvitsevat useita paikoituksia vasteisiin, jolloin leikkauksesta jääneet mikrokiinnitykset ja jäysteet voivat olla ongelmana onnistuneen paikoituksen saavuttamisessa.

Suunnittelussa pyritään hyödyntämään särmäystä suorittavien henkilöiden käytännön asiantuntemusta, esimerkiksi palaverien muodossa, joissa valmistettavuutta käsitellään suunnittelun ja käytännön näkökulmista. Asetuksien läpimenoaikaa voidaan nopeuttaa valmistuspiirustuksissa olevilla konekohtaisilla ohjelma- ja työkalutiedoilla, joissa riittävien toiminnallisten mittojen lisäksi taivutusjärjestys on huomioituna.

Särmättäessä pinnoitettua levyaihiota, suunnittelijan on tärkeää lisätä piirustukseen tarvittavat laadulliset tiedot sekä tieto siitä, millä puolella pinnoitteen on oltava särmäyksen jälkeen. Työohjeissa olisi tärkeää olla myös tieto mahdollisen suojamuovin käytöstä, jolla estetään pinnoitteen vaurioituminen särmäyksen aikana. Särmättäessä pinnoitettuja levyjä, sisäsäteen tulisi olla vähintään neljä kertaa aineenvahvuus. Usein tarvittavat tiedot ovat saatavilla myös raaka-aineen toimittajalta. (Matilainen ym. 2010, 253.)

Kustannustehokkaassa särmäyksessä työkaluasetukset pyritään tekemään niin, että särmättävä levyosa voidaan tehdä yhdellä asetuksella valmiiksi. Usein särmäyspuristimen yläpalkkia hyödynnetään mahdollisimman tehokkaasti, jotta kaikki särmättävät taivutuslinjat ovat tehtävissä työkaluryhmittäin. (Matilainen ym. 2010, 262.)

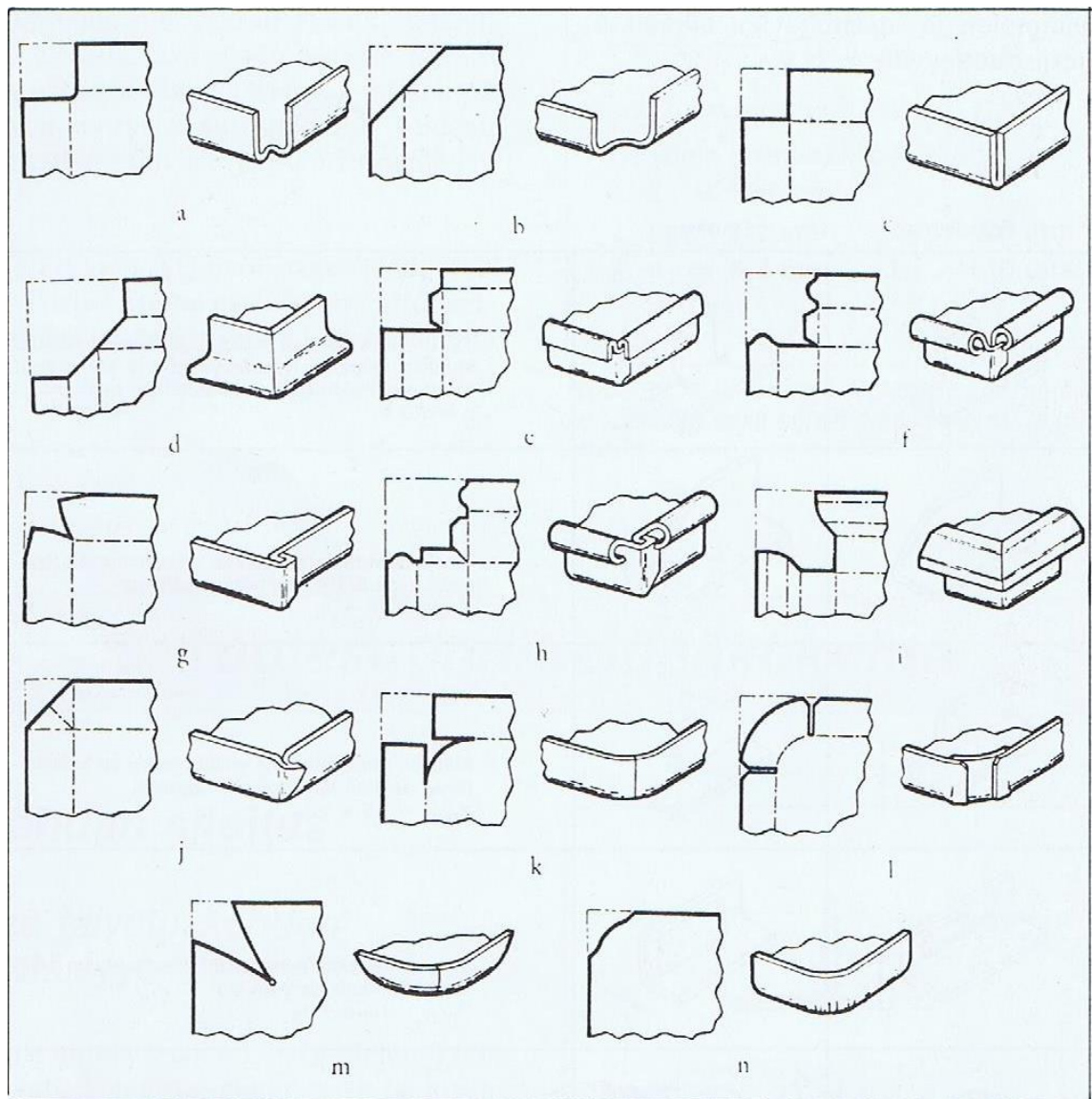
Usein työkaluasetuksissa ovat ongelmana erikorkuiset särmäystyökalut, jolloin erimuotoisten työkalujen asennus yhteen asetukseen on hyvin ongelmallista. Alaluvussa 7.3.9 käsitellään ratkaisua ongelman poistamiseksi. Kuvassa 30 esitetään esimerkkejä epäedullisista ja edullisista muotoiluvaihtoehdoista, joita suunnittelijan on tärkeää huomioida suunniteltaessa särmättäviä levyosia, joissa taivutuslinjan muovautumisen vuoksi reunat muokkautuvat (Karppinen ym. 1986, 44).

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

Kuva 30. Erilaisia ohutlevyvalmistuksen suunnittelusääntöjä, joissa s on aineenvahvuus ja r_s on taivutuksen sisäsäde (Karppinen ym. 1986, 43).

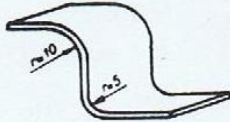
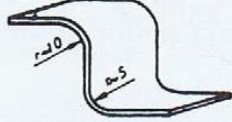





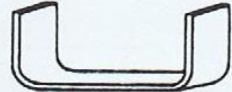
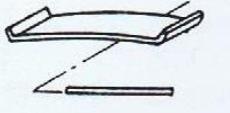
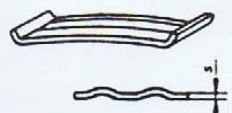

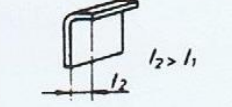
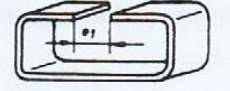

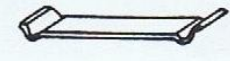
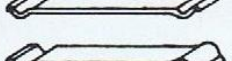
Särmättävien levyosien nurkkiin tehdään helpotuksia, jotta nurkkakohtien särmäykset on mahdollista suorittaa eri suuntiin. Helpotukset voivat olla esimerkiksi kyöneleen-, neliön- tai pyöreän muotoisia. Pyöreät muodot estävät kulmien repeytymistä, jolloin rakenne on kestävämpi. (Matilainen ym. 2010, 259.)

Kuvassa 31 esitetään taivutusperiaatteet erilaisissa nurkissa, joiden särmäys suoritetaan levyosan katkoviivojen kohdalta. Avonaiset nurkat ovat helpoiten tehtävissä. Ne osoitetaan kuvan kohdissa a ja b. Kohdan c suljettu nurkka vaatii terävät leikkaustyökalut. Kohdassa d on valmistettu sisäänpäin särmätty nurkka, joka on rakenteellisesti vahvempi kuin esimerkiksi kohdan c nurkka. Kohtien e-i nurkat ovat rakenteellisesti jäykkiä, mutta vaativat useita särmäysvaiheita, jonka vuoksi niiden valmistaminen ei välttämättä ole kustannustehokasta. Kohdassa j, nurkka on särmätty tiukasti kiinni ja käännetty sivulle. Nurkka on tiivis, joten erillistä tiivistystä, kuten hitsausta ei tarvitse suorittaa. Kohdissa k-n esitetään pyöristettyjen nurkkien särmäystä. Pyöristetyt nurkat vaativat usein erikoistyökaluja, jos reunan on oltava tasainen ja siisti. (Karppinen ym. 1986, 44).



Kuva 31. Levyosien nurkkien taivutusperiaatteet kohdissa a-n (Karppinen ym. 1986, 44).

Kuvassa 32 esitetään särmättävien levyosien suunnittelussa usein esiintyviä virheitä. Virheiden välttämiseksi esitellään edullisempia ja paremmin soveltuvia vaihtoehtoja. (Karppinen ym. 1986, 45.)

	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 (minimilaiippakorkeus).		
Kotelomaisissa rakenteissa on väli e pyrittävä saamaan riittävän suureksi, jotta vältyttäisiin erikoistyökalujen käytöltä.		
Molempien reunojen profiilit on pyrittävä suunnittelemaan samanlaisiksi, jotta työ voitaisiin suorittaa samoilla työkaluilla.		

Kuva 32. Särmäyksen suunnittelusääntöjä (Karppinen ym. 1986, 45).

Kustannusajattelu suunnittelussa on valmistettavuuden näkökulmasta tärkeää, kuten alaluvussa 6.1 todettiin. Ohutlevyjä voidaan särmätä myös niin sanotulla kampataivutuksella, jossa kammassa on nimensä mukaisesti useita särmättäviä levyosia kiinni mikrokiinnityksillä. Usein kampataivutuksessa särmätään yksinkertaiset ja pienet levyosat, jolloin särmäystyövaihe nopeutuu huomattavasti. (Matilainen ym. 2010, 263.) Kampataivutus lisää levymateriaalin kulutusta ja kohonneet raaka-ainekustannukset on huomioitava tuotteen valmistuskustannuksissa.

Suunnittelija voi huomioida särmäämistä myös erilaisilla niin sanotuilla apukanteilla, jolloin haastavankin muotoiset levyosat voidaan särmätä ilman nykyaikaista särmäyspuristinta, jossa liikuteltavat akselit ovat erikseen ohjelmoitavissa. (Matilainen ym. 2010, 258.) Myös apukanttien käyttö lisää materiaalikustannuksia, joten niiden tarpeellisuutta on harkittava aina tapauskohtaisesti. Jos tuotteen toiminnallisuus sallii, voidaan levyaihioon tehdä särmäystä varten erilaisia aukkoja vasteiden paikoitusta varten. Menetelmä on kustannustehokkain eikä lisää raaka-ainekustannuksia, jotka apukanttien osalta on huomioitava tarjouslaskennassa.

6.5 Toleranssien ja tarkkuuden huomioiminen suunnittelussa

Toleransseilla on erittäin suuri merkitys valmistuskustannuksiin. Suunnittelussa on tärkeää huomioida särmättävien levyosien toleranssien merkitys kustannustasolla, särmäystarkkuuteen vaikuttavat tekijät huomioiden. Suurimmat tekijät tarkkuuteen ovat raaka-aineiden ominaisuudet, aineenvahvuuksien toleranssit, särmäystyökalujen kunto, takaisinjousto ja kitka, lisäksi paikoitusmenetelmät aiheuttavat särmäyksessä helposti mittavirheitä. Ohutlevyjien särmäyksessä voidaan yleisesti vaatia vähintään $\pm 0,5$ millimetrin tarkkuutta. Vaadittaessa tarkempia toleransseja asiasta olisi hyvä keskustella tuotteen valmistajan kanssa. Mittatarkkuuteen vaikuttavat särmän suoruuus, taivutuskulman tarkkuus, poikkeavat takaisinjoustot, jotka johtuvat särmäyspuristimen joustosta, oikeanlaisten työkalujen käyttö ja kunto sekä vapaataivutuksen painimen kärkisäteen suhde vastimen uraan (R/s -suhde). (Matilainen ym. 2010, 253.)

Särmäyksessä käytetään suunnittelijan määrittelemien toleranssien lisäksi yleistoleransseja, joita käsittelee pituus- ja kulmamittojen osalta standardi SFS-EN 22768-1 ja SFS-EN 22768-2 geometrinen yleistoleranssien osalta. Särmäyksessä yleisin yleistoleranssi on standardi pituus- ja kulmamittojen osalta. Yleistoleranssien tarkoituksena on, että valmistaja tietää oman valmistustarkkuutensa, jota pystytään ylläpitämään ilman erityistoimenpiteitä. Yleistoleranssien ansiosta suunnittelijan ei tarvitse erikseen toleroida sellaisia elementtejä, joiden valmistaminen yleistoleransseja noudattamalla on riittävän tarkkaa. Usein valmistajan on selvitettävä toleranssiluokka, johon on järkevillä kustannuksilla mahdollista päästä. Yleistoleransseja käyttämällä saavutetaan suunnitteluun kustannustehokkuutta, piirustukset ovat helppolukuisempia ja niistä erotetaan selkeämmin toiminnalliset ja ei-toiminnalliset elementit. Haittapuolena voi olla toiminnallisten elementtien jääminen yleistoleranssien varaan tai että yleistoleranssit ovat joissakin tapauksissa liian vaativia. (Pere 2012, 20–110.)

Yleistoleranssit jaetaan neljään toleranssiluokkaan, joista f on hieno (fine), m on keskikarkea (medium), c on karkea (coarse) ja v on erittäin karkea (very coarse). Taulukossa 21-23 esitetään sallitut poikkeamat pituuksille, kulmille ja viistetyille kulmille. (Pere 2012, 20–111.)

Taulukko 21. Standardin SFS-EN 22768-1 sallitut poikkeamat pituusmitoissa, lukuun ottamatta viistettyjä kulmia. Lukuarvot ovat millimetrejä. (Pere 2012, 20–111).

Nimellismitta-alue	Sallitut poikkeamat			
	Toleranssiluokka			
	Hieno (f)	Keskikarkea (m)	Karkea (c)	Erittäin karkea (v)
> 0,5 mm ... ≤ 3,0 mm	± 0,05	± 0,1	± 0,2	-
> 3,0 mm ... ≤ 6,0 mm	± 0,05	± 0,1	± 0,3	± 0,5
> 6,0 mm ... ≤ 30,0 mm	± 0,1	± 0,2	± 0,5	± 1
> 30,0 mm ... ≤ 120,0 mm	± 0,15	± 0,3	± 0,8	± 1,5
> 120,0 mm ... ≤ 400,0 mm	± 0,2	± 0,5	± 1,2	± 2,5
> 400,0 mm ... ≤ 1000,0 mm	± 0,3	± 0,8	± 2	± 4
> 1000,0 mm ... ≤ 2000,0 mm	± 0,5	± 1,2	± 3	± 6
> 2000,0 mm ... ≤ 4000,0 mm	-	± 2	± 4	± 8

Taulukko 22. Standardin SFS-EN 22768-1 sallitut poikkeamat kulmamitoissa. Lukuarvot ovat millimetrejä. (Pere 2012, 20–111).

Nimellismitta-alue	Sallitut poikkeamat			
	Toleranssiluokka			
	Hieno (f)	Keskikarkea (m)	Karkea (c)	Erittäin karkea (v)
≤ 10,0 mm		± 1°	± 1°30'	± 3°
> 10,0 mm ... ≤ 50,0 mm		± 0°30'	± 1°	± 2°
> 50,0 mm ... ≤ 120,0 mm		± 0°20'	± 0°30'	± 1°
> 120,0 mm ... ≤ 400,0 mm		± 0°10'	± 0°15'	± 0°30'
> 400,0 mm		± 0°5'	± 0°10'	± 0°20'

Taulukko 23. Standardin SFS-EN 22768-1 sallitut poikkeamat viistetyissä kulmissa. Lukuarvot ovat millimetrejä. (Pere 2012, 20–112).

Nimellismitta-alue	Sallitut poikkeamat			
	Toleranssiluokka			
	Hieno (f)	Keskikarkea (m)	Karkea (c)	Erittäin karkea (v)
> 0,5 mm ... ≤ 3,0 mm		± 0,2		± 0,4
> 3,0 mm ... ≤ 6,0 mm		± 0,5		± 1
> 6,0 mm		± 1		± 2

Geometriset yleistoleranssit jaetaan kolmeen eri toleranssiluokkaan, joista H on hieno, K on keskikarkea ja L on karkea. Geometrinen yleistoleranssi on määritelty peruselementistä riippumattomille geometrisille toleransseille, jotka ovat suoruus, ympyrämuotoisuus ja tasomaisuus sekä peruselementistä riippuville toleransseille, jotka ovat yhdensuuntaisuus, symmetrisyys, heitto ja kohtisuoruus. (Pere 2012, 20–112.)

Valmistettavan tuotteen kustannuksista määräytyy suunnittelussa noin 70–80 %: a. Tuotantotehokas suunnittelu edellyttää suunnittelijan asiantuntemusta särmäyksestä valmistusmenetelmänä sekä kykyä hyödyntää henkilöstön ammattitaitoa ja DFM -menetelmää, jotta levyosan valmistettavuus olisi kustannustehokasta ja kilpailukykyistä. Yksinkertaisuudessaan suunnittelijan tehtävänä on suunnitella tuote siten, että valmistamiseen käytetty aika ja resurssit ovat mahdollisimman minimaaliset raaka-aineesta valmiiseen tuotteeseen. (Piironen 2013, 60.)

Suunnittelussa päästään usein haluttuun lopputulokseen hyödyntämällä mahdollisimman paljon jo saatavilla olevaa tietoa. Useissa valmistavissa tehtaissa on käytössä toiminnanohjausjärjestelmä (ERP), johon kirjattuja materiaali- ja komponenttitietoja voidaan linkittää käytettäväksi esimerkiksi SolidWorks -ohjelmaan. Tällöin tarvittavat tiedot ovat helposti suunnittelijan apuna ja tukena, eikä materiaalien etsimiseen kulu ylimääräistä työaikaa.

7 MENETELMIÄ SÄRMÄYKSEN TEHOSTAMISEEN

Nykyään monet yritykset särmäävät pieniä tai keskisuuria sarjoja. Tämän vuoksi särmäyspuristimien ohjelmointiin ja työkalujen asetusaikoihin kuluu usein huomattava määrä tuottamatonta työaika. Käytännössä kone on ohjelmoinnin ja työkaluvaihdon aikana pysähdyksissä. Särmäyksen tuottavuutta pystytään lisäämään monilla eri menetelmillä, joista yksi on robottijärjestelmä, joka voidaan esimerkiksi integroida toimimaan särmäyspuristimen kanssa yhteistyössä.

7.1 Robottiikan hyödyntäminen, robottijärjestelmä

Harkittaessa robottijärjestelmää joko jo olemassa olevaan koneeseen tai erityistä robotisärmäysratkaisua, olisi suunnittelun ja toteutuksen perustuttava lähtökohtaisesti rationaaliin, eli järjelliseen tarpeeseen. Nykyään särmäykseen on tarjolla useiden eri valmistajien robottijärjestelmiä, joihin kannattaa perehtyä ennen hankintapäätöstä. (Kuivanen ym. 1999, 93). Soveltuvin särmäyspuristin robotin yhteistyökumppaniksi on kahdeksan akselinen ylätoiminen puristin, jossa on automaattinen ja tarkka alapalkin bombeeraus jotta levyosan tarkka asemointi robotin ohjaamana voidaan tehdä ongelmitta puristimen koko leveydeltä. (Mäki-Mantila 2001, 13). Robottijärjestelmän hankinta jakautuu usein neljään eri osaan (Kuivanen ym. 1999, 93).

Esisuunnitelmavaiheessa tehdään tarpeiden kartoitukset, joihin sisältyvät varsinaisen robotin lisäksi esimerkiksi tarvittavat oheislaitteet, kytkennät ja tilantarve. Myös särmättävien kappaleiden siirrot valmistuksen aikana on huomioitava. Esisuunnitelmavaihe on tärkeä lähtöaskel, koska hankittavalle laitteistolle luodaan yleiset suuntaviivat. (Kuivanen ym. 1999, 92–93.)

Hankintavaiheessa päätetään lopullinen layout ja tehdään ostopäätös. Hankintavaiheessa keskitytään lisäksi erityisesti suunnitteluun, joka pitää sisällään muun muassa järjestelmän toiminnot, valmistuspiirustukset, simulaatiot sekä erilaiset yksityiskohdat järjestelmässä. (Kuivanen ym. 1999, 93–102.) Nykyään robottijärjestelmästä tehdään 3D-malli sekä suoritetaan graafinen simulointi ennen käyttöönottovaihetta. Simuloinnin ansiosta voidaan välttyä useilta erilaisilta virheiltiltä, jotka havaittaisiin vasta käyttöönottovaiheessa. (Kuivanen ym. 1999, 96–98.)

Simulointi antaa hyvät lähtökohdat tarkastella muun muassa robotin liikeratoja, siihen liittyviä mahdollisia törmäyksiä, paikoitusta ennen särmäystä sekä oheislaitteita, kuten robotin tarvitsemia tarttuvia (end effector) ja mittalaitteita. Simuloinnin avulla myös robotin ulottuvuus saadaan testattua, jolloin panostus ja purku voidaan suorittaa ennalta suunnitellusti. Mainitsemisen arvoinen tietokoneohjelma robottijärjestelmän simulointiin ja ohjelmointiin on ABB RobotStudio®.

Käyttöönottovaiheessa tehdään tarvittavat asennukset, kytkennät ja ohjelmoinnit robotille ja testataan järjestelmän toimivuus. Viimeisessä vaiheessa hyödynnetään hankittua robottijärjestelmää sekä pidetään huolta vaadituista huoltotoiminnoista. (Kuivanen ym. 1999, 93–106.) Käytön aikaiseen jatkuvaan valvontaan kuuluu muun muassa häiriö- ja poikkeamaraportointi, häiriöiden analysointi ja kehitystoimenpiteet, esimerkiksi LEAN - jatkuvan toiminnan parantamisen ideologialla.

Myös koulutukseen on hyvä varata resursseja, jotta mahdollisiin häiriöihin voidaan analysoinnin jälkeen löytää mahdolliset syyt ilman järjestelmätoimittajan apua, jolloin järjestelmän tuotantoa lamauttava häiriöaika on mahdollisimman lyhyt. Hyvällä koulutuksella saavutetaan ohjelmoinnin perustaidot, joiden avulla on mahdollista pystyä kehittämään ohjelmoimaan haastaviakin särmättäviä levyosia robotin tekemänä.

Vaikka edellä mainitun robottijärjestelmän ohjelmointi suoritettaisiin etäohjatusti, joudutaan särmäystyökälyt edelleen asentamaan ihmistyövoimaa käyttäen, jolloin särmäyskone ja robottijärjestelmä ovat pysähdyksissä. Tavanomaista on, että särmäyksessä tällaisia järjestelmiä käytetään suurien tai keskisuurien valmistussarjojen avuksi, jolloin pysähtymisajat ilman käyttöhäiriöitä ovat vähäisiä. Särmäyksessä käytettävät robotit ovat usein kuuden vapausakselin omaavia kiertyvänivelisiä teollisuusrobotteja, jotka tarvitsevat suoja-aitoja ihmisten turvallisuuden vuoksi. (JL Levytekniikka Oy. 2018.)

Nykyään on hyvä huomioida myös yhteistyörobotit (collaborative robot), jotka kykenevät palvelemaan myös särmäyspuristinta. Yhteistyörobotin etuina ovat esimerkiksi vähäinen tilantarve, nopea ja helppo ohjelmointi ja siirrettävyys palvelemaan muita koneita. Yhteistyörobotit eivät tarvitse suoja-aitoja, vaan kykenevät toimimaan turvallisesti ihmisten kanssa yhteistyössä. Yhteistyörobotti on edelleen useille yrityksille vieras vaihtoehto teollisuusrobotin rinnalle, mutta kiihtyvä kilpailu kyseisellä markkina-alueella on lisännyt kysyntää yhteistyöroboteille muun muassa parantuneen paikoitustarkkuuden, monikäyttöisyyden ja pienempien investointikustannuksien vuoksi. (Kuivanen ym. 1999, 110.)

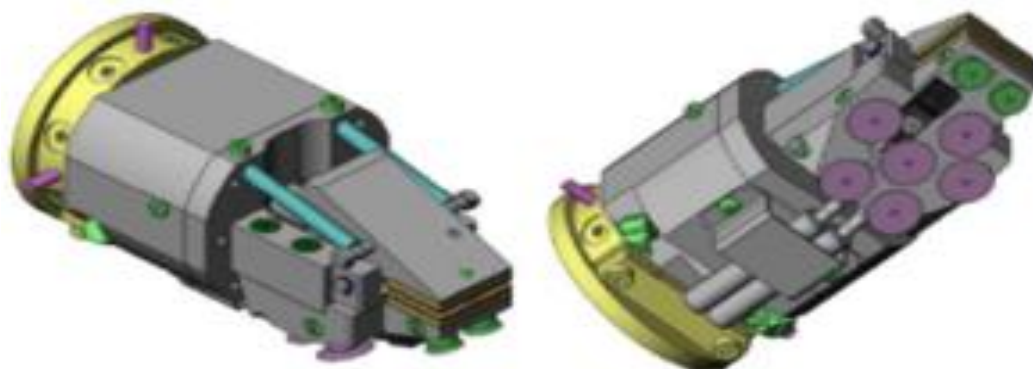
Perinteisen teollisuusrobottijärjestelmän investoinnin kustannusrakenne koostuu 50 %:a mekaniikasta ja laitteistoista, 30 %:a suunnittelusta, ohjelmoinnista ja asennuksesta, 5 %:a koulutuksesta, 5 %:a projektinjohtamisesta ja 10 %:a käyttöönotosta. Käyttökustannukset koostuvat välillisistä- ja välittömistä palkkakustannuksista, huolto- ja kunnossapitokustannuksista, koulutuskustannuksista ja energia-, tarvike- ja ainekustannuksista. (Kuivanen ym. 1999, 110.)

Yleisesti voidaan sanoa, että robottijärjestelmä tuo säästöjä materiaalien käsittelyssä, palkkakustannuksissa ja särmäysvirheiden minimoituessa. Myös särmäyskoneen käyttöaste kasvaa, jolloin särmättävien tuotteiden läpimenoaika paranee. Parhaaseen lopputulokseen päästään yhdistämällä robottijärjestelmän toimittajan asiantuntemus, käyttäjien koulutus ja sovelluskohtainen tietämys. (Kuivanen ym. 1999, 110.) Robottijärjestelmän kannattavuus on usein myös positiivinen, jos särmättävällä tuotteella on suuri särmäysvolyymi, levyosa on raskas tai suuri ja vaatii kaksi henkilöä särmäämään ja valmistettava tuote voidaan tehdä yhdellä työkaluasetuksella. (Mäki-Mantila 2001,14).

7.2 Robottiikan hyödyntäminen, robottisärmäyssolu

Nykyään tarjolla on myös valmiita robottisärmäyssoluja, joista esimerkkinä esitetään Amadan valmistama EG 6013 AR, josta jäljempänä käytetään nimeä robottisolu. Robottisolu on suunniteltu erityisesti pienempien levyosien ja valmistussarjojen tarkkaan ja nopeaan valmistukseen. Robottisolu käsittää puristusvoimaltaan 600 kN:nin särmäyspuristimen, jonka särmäysnopeus on 25 mm/s. Särmättäviä levyosia käsittelee Yaskawan UP20 – teollisuusrobotti, joka särmäyksen lisäksi vaihtaa ohjelmoidusti myös särmäys työkalut automaattisen työkaluvaihtajan (ATC) avustamana. Työkalun vaihtoasemassa on yhteensä 10 riviä erimittaisia työkaluja, joita voidaan hyödyntää haastavienkin osien särmäyksessä. (Ama-Prom Finland Oy 2018a.)

Robotilla on valittavissa 3 erilaista tarttujaa, joista yksi on varattu särmäystyökalujen vaihtamiseen. Kaksi muuta tarttujaa on tarkoitettu särmättävien levyosien käsittelyyn. Tarttijat ovat 2 – sormisia, joihin on myös integroitu vakuunitarttijat (multi gripper). Tarttijat voivat käsitellä pienimmillään 40 x 80 mm (kuva 33) ja suurimmillaan 300 x 300 mm – levyosia. Robotin nostokyky on 10 kg, sisältäen tarttujan massan. Robotti vaihtaa särmäyksessä tarvittavat tarttijat automaattisesti. (Ama-Prom Finland Oy 2018a.)



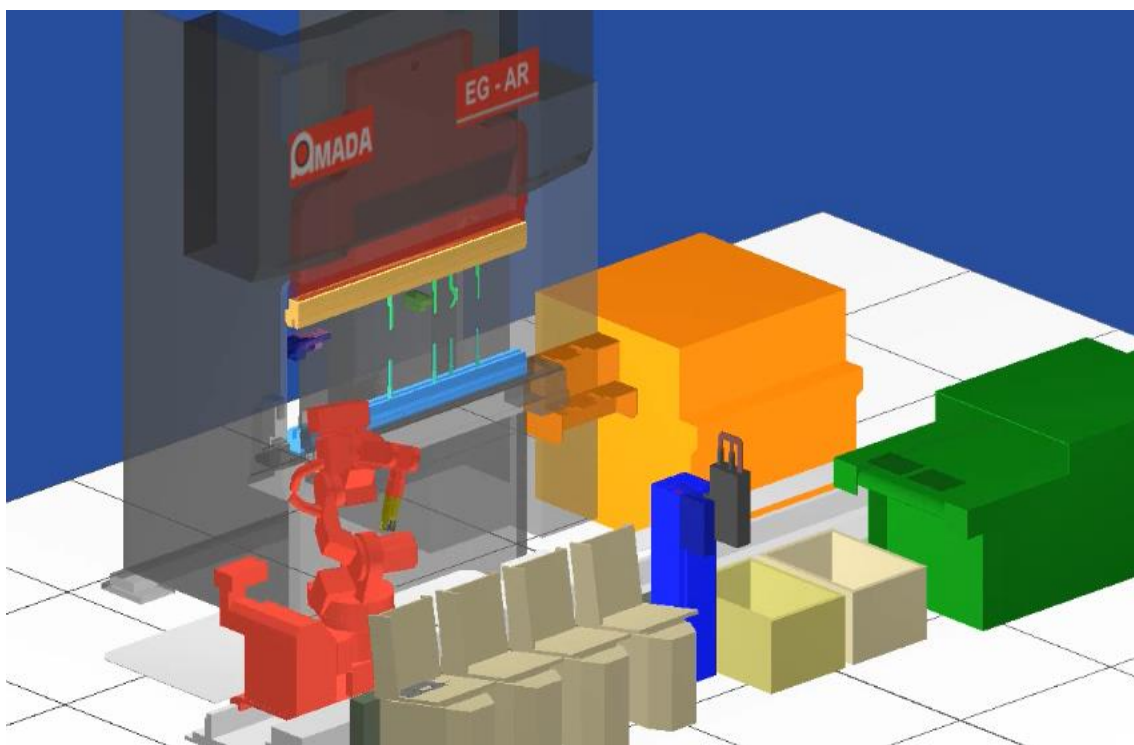
Kuva 33. Robotin tarttuja, jolla käsitellään pieniä levyaihioita, kooltaan maksimissaan 40 x 80 mm: ä. Tarttujassa vakuumitartunta sekä pihtiote. (Ama-Prom Finland Oy 2018a.)

Robottisolussa on myös lastausasemia, joiden neljään eri asemaan voidaan asettaa erilaisia särmättäviä levyaihioita joko pysty- tai vaaka-asentoon, joita robotti ohjelmoidusti hakee särmättäväksi. Asemaan sisältyy myös levyaihion aineenvahvuuden mittauspiste, johon on sisällytetty levyaihion paikoitus. Levyaihion paikoituksella varmistetaan tarkka asemointi särmäysprosessissa. Pienissä kappaleissa vaaditaan erityisen tarkkaa asemointia vasteisiin ennen särmäystä. Robottisolussa on syvyyden asemointiin kaksi takavastetta ja sivusuuntaisia tukia yksi, jolloin voidaan eliminoida robotin aiheuttamat tai levyaihiossa olevat virheet levyosan asemoinnissa. (Ama-Prom Finland Oy 2018a.)

Tarvittaessa robotti voi myös tuoda särmättävää levyaihiota uudelleenpaikoitukseen. Uudelleenpaikoituksen tarkoitus on saada esimerkiksi jo särmätystä särmästä mittatarkka ote, jolloin voidaan särmätä esimerkiksi aihion toinen puoli mahdollisimman tehokkaasti. Särmäysprosessin aikana takaisinjousto voidaan huomioida esimerkiksi automaattisella kulmankorjaus laitteella (BI-S tai BI-L). Laitteet ovat optioita, mutta automaattiseen särmäykseen optiota kannattaa harkita käyttöönotettavaksi. (Ama-Prom Finland Oy 2018a.)

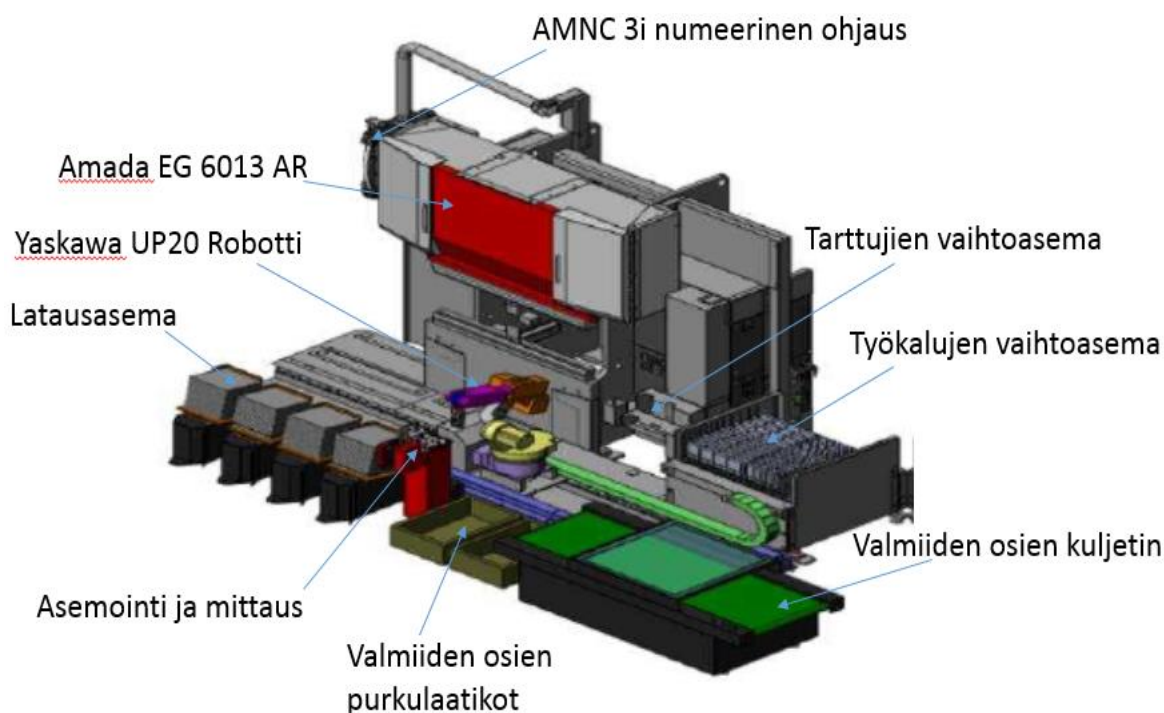
Särmäyksen jälkeen kappaleet voidaan ohjelmoidusti siirtää kuljettimelle tai laatikoihin, joista ne ovat siirrettävissä seuraavaan jalostuspisteeseen. Kuljetin sisältyy Amadan robottisärmäyssoluun. Ohjelmointi suoritetaan pääsääntöisesti offline – ohjelmointina esimerkiksi AP 100 tai 3D virtuaaliympäristössä toimivalla AR-CAM – ohjelmistolla, vaikka paikallinen ohjelmointi manuaalisesti on mahdollista. Etäohjelmoinnin etuna on muun muassa ohjelmien teko työjonoon, jolloin sarjakoosta riippuen, voidaan neljään eri asemaan panostaa särmättävät aihiot valmiiksi. Robottisolu on pysähdyksissä vain automaattisen työkaluvaihdon ajan. (Ama-Prom Finland Oy 2018a.)

AR-CAM -ohjelmistolla voidaan tarpeen vaatiessa virtuaalisesti seurata särmäysohjelman eri vaiheita ja robotin liikkeitä aina levyaihioon tarttumisesta, valmiin kappaleen sijoittamisesta kuljettimelle tai laatikkoon ennen todellisen työn aloittamista. Simuloinnilla vältetään mahdolliset törmäykset ja ongelmat särmäysprosessin aikana. Kuvassa 34 havainnollistetaan simulointia ennen varsinaisen valmistuksen aloitusta. (Ama-Prom Finland Oy 2018a.)



Kuva 34. Amada EG 6013 AR -robotisärmäyssolun särmäysohjelman simulointi ennen valmistuksen aloitusta (Ama-Prom Finland Oy 2018a).

Robottisärmäyssi esitellään kokonaisuudessaan kuvassa 35, jossa havainnollistetaan koneeseen kuuluvia laitteita tai komponentteja.

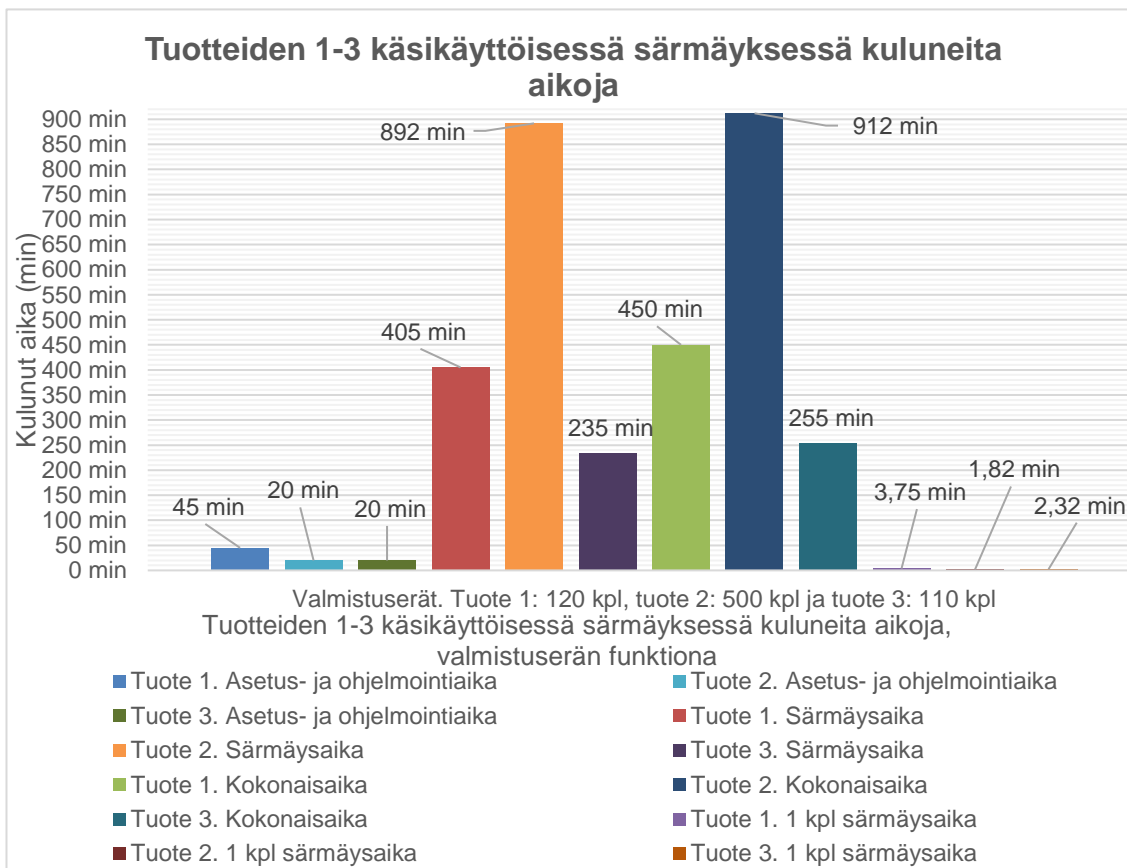


Kuva 35. Robottisärmäyssi Amada EG6013-AR, jossa kuvattu soluun kuuluvia laitteita (Ama-Prom Finland Oy 2018a).

Robottisärmäyssiin hankinnan kannattavuutta ja tehokkuutta selvitettiin laskelmilla, joissa verrattiin käsikäyttöisessä särmäyksessä tehtyjen kolmen eri tuotteen särmäysaikoja robottisolun käyttämään aikaan. Tuotteista kaksi oli hieman haastavampia särmättäviä ja toisessa haastavammassa tuotteessa työkalujen asetusajat olivat myös pidempiä. Kaksi tuotteista oli niin sanottuja piensarjoja ja kolmas voidaan luokitella keskisuuriseksi sarjaksi. Kaikissa kolmessa tuotteessa oli useita eri särmäyksiä. (JL Levytekniikka Oy 2018.)

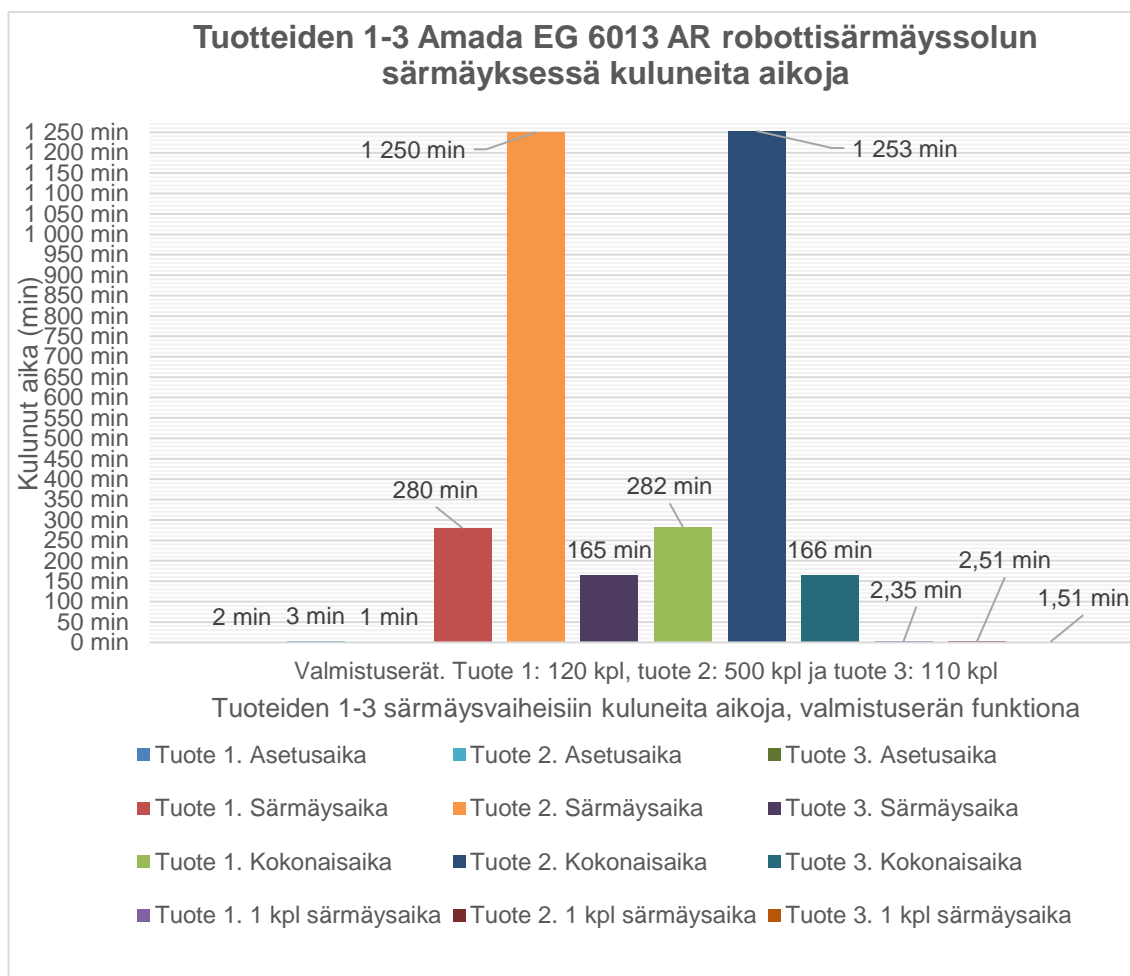
Kuviossa 1 esitetään käsikäyttöisessä särmäyksessä kuluneita valmistusaikoja kolmesta eri särmättävästä tuotteesta, jotka on nimetty tuote 1, tuote 2 ja tuote 3. Valmistuserät ovat tuotteen 1 osalta 120 kpl, tuotteen 2 osalta 500 kpl ja tuotteen 3 osalta 110 kpl.

Kuviossa 1 esitetään ensin tuotteiden työkaluasetus- ja ohjelmointiaika, toisena valmistuserän särmäysaika, kolmantena valmistukseen kulunut kokonaisaika sekä viimeisenä yhteen tuotteeseen kulunut särmäysaika. (JL Levytekniikka Oy 2018.)



Kuvio 1. Kolmen eri tuotteen käsikäyttöisessä särmäyksessä kuluneita valmistusaikoja (JL Levytekniikka Oy 2018).

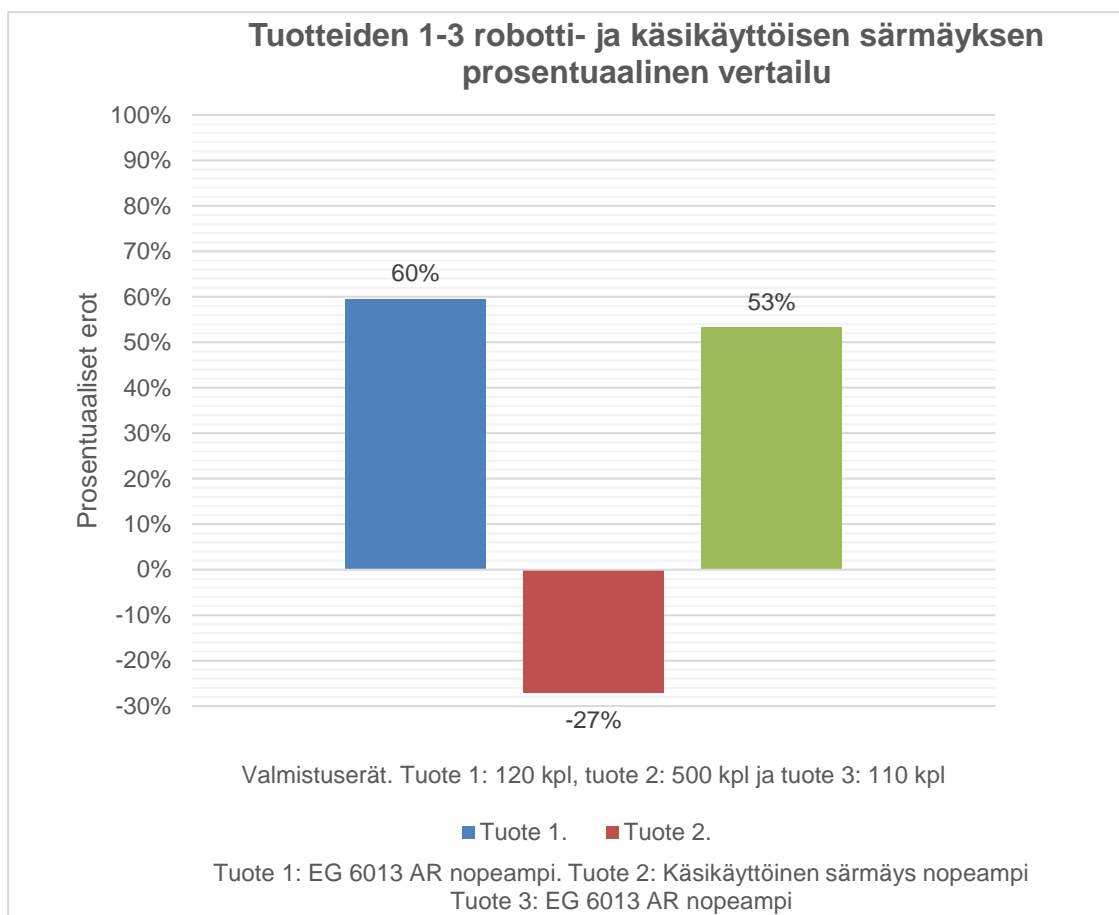
Kuviossa 2 esitetään edellä selostettujen tuotteiden valmistusajat robottisärmäysolun tekemänä. Kuviossa 2 esitetään ensin tuotteiden työkaluasetuksiin kuluneet ajat. Huomioitavaa on, että ohjelmointiaikoja ei ole valmistuksessa huomioitu, koska ohjelmointi suoritettiin offline – ohjelmointina, jolla minimoidaan robottisolun tuottamaton seisonta-aika. Etäohjelmoituna ohjelmointiajat tuotteille olivat 18-, 12- ja 11 minuuttia. Huomioitavaa on, että ohjelmointiajat eivät ole samassa järjestyksessä tuotteiden kanssa. Toisena esitetään tuotteiden särmäämiseen kulunut aika, kolmantena valmistuksen kokonaisaika ja neljäntenä yhden tuotteen särmäykseen kulunut valmistusaika. Laskennassa ei myöskään huomioitu robottisolun latausaseman panostukseen kuluneita työaikoja, koska niiden todettiin olevan tämän kokoisissa valmistussarjoissa hyvin minimaaliset. (JL Levytekniikka Oy 2018.)



Kuvio 2. Kolmen eri tuotteen EG 6013 AR -robottisärmäyksessä kuluneita valmistusaikoja (JL Levytekniikka Oy 2018).

Kaikista kolmesta eri tuotteesta tehtiin kuvion 3 mukainen prosentuaalinen valmistusaikojen vertailu, jossa tulokset ovat havaittavissa tuotekohtaisesti. Robottisärmäysselun voidaan todeta olevan piensarjojen valmistuksessa selkeästi nopeampi. Sarjakoon ollessa 500 kpl havaitaan tuloksista, että käsikäyttöinen särmäys on lähes 30 %:a nopeampaa. Laskelmien pohjaksi valittiin tarkoituksella kolme hyvin erilaista särmättävää ohutlevyosaa, joiden muodot olivat erilaiset ja joissa oli useita erilaisia taivutuksia. Vaikka särmättävän levyosan muoto vaikuttaakin suuresti työkalujen valintaan, ohjelmointiin ja särmäysaikoihin, voidaan laskelmien pohjalta tehdä päätelmiä robottisärmäysselun tehokkuudesta piensarjojen valmistuksessa. EG 6013 AR – robottisärmäysselu onkin tarkoitettu juuri pienempien valmistussarjojen tehokkaaseen särmäykseen kuten AmaProm Finland Oy ilmoittaaakin. (JL Levytekniikka Oy 2018.)

Suuremmille valmistussarjoille ja levyosille voi tehokkuuden kannalta olla Amadan HG 1003 Ars – robottisärmäyssoilu parempi vaihtoehto. HG 1003 Ars – robottisolussa työkalut vaihtaa erillinen robotti ja koneen puristusvoima on 1000 kN:a (Ama-Prom Finland Oy 2018a).



Kuvio 3. Tuotteiden 1-3 valmistusaikojen prosentuaalinen vertailu robotti- ja käsikäyttöisessä särmäyksessä (JL Levytekniikka Oy 2018).

7.3 Käsikäyttöisen särmäyksen tehostaminen

Käsikäyttöistä särmäystä voidaan tehostaa useilla eri menetelmillä, kuten esimerkiksi työvälineillä, hyvällä suunnittelulla ja ohjeistuksella, offline – ohjelmoinnilla, särmäysohjelmien järjestelmällisellä tallennuksella, työkalujen selkeällä järjestyksellä, koulutuksella ja jatkuvalla toiminnan kehittämisellä, jossa särmäyskoneita käyttävät henkilöt ovat keskeisesti mukana.

7.3.1 Särmäysteräpimitet

Työvälinetekniikoiden kehittyessä pyritään erilaisilla työvälineillä tehostamaan särmäystä sekä minimoimaan asennukseen kuluva tuottamatonta työaika. Esimerkiksi särmäyspuristimen työkalujen kiinnitykseen on tullut vuosien aikana paljon erilaisia ratkaisuja, joilla särmäystyökalujen kiinnitys on nopeaa ja vaivatonta.

Muun muassa Wilson Tool International (jäljempänä Wilson) sekä Amada valmistavat erilaisia särmäysteräpimiä. Kuvassa 36 oikealla puolella esitetään Wilsonin valmistamia teräpimiä, joista keskellä on yleisesti käytössä oleva nitrattu ja hyvin kulutusta kestävä yläteräpidin (Express Clamp). Teräpimitellä voidaan nopeasti kiinnittää ylätyökalut pitimen molemmille puolille ilman erillisiä asennustyökaluja. Kahva on irrotettava, jolloin kaikki liikenevä tila jää särmättävälle levyosalle. Kiinnitettävää terästä on ennen lukitusta nostettava pidintä päin, jotta saavutetaan riittävän tarkka paikoitus pitimiin. Wilsonilla on tarjota myös paineilma- ja hydraulisesti ohjattuja ylä- ja alateräpimiä, joiden kiinnitys tapahtuu haluttaessa kauko-ohjatusti. Kyseisillä menetelmillä särmäystyökalut pystytään asentamaan hyvin nopeasti. (Wilson Tool International Ltd 2018f).

Amada tarjoaa myös samankaltaisia järjestelmiä, joilla teräkiinnitykset suoritetaan tehokkaasti. Esimerkki Amadan yläterän pikakiinnityksestä on kuvassa 36 vasemmalla, jolla yläterät ovat kiinnitettävissä pitimen molemmille puolille ilman terien nostamista. Teräpidin A GRIP-M-DUAL on suunniteltu paikoittamaan yläterät tarkasti ilman erillistä terän kannattelua. Amada tarjoaa myös edullisempia S GRIP – teräpimiä, joissa kiinnitettävää terästä on nostettava pidintä päin ennen lukitusta. (Ama-Prom Finland Oy 2018a).

Molempien valmistajien pitimissä terät ovat asennettavissa pitimen edestä ilman terien liu'uttamista, joka kuluttaa ja pahimmassa tapauksessa vaurioittaa pitimien pintoja, aiheuttaen särmäyksessä mittaheittoja. Pitimet ovat myös asennettavissa toisiinsa kiinni, jolloin kapeiden yläterien asennus saadaan luotettavasti kiinnitettyä. Erilaisia pikakiinnityksiä hyödyntäen, terien kiinnityksiin kuluva työaika vähenee jopa noin 50 %: a (JL Levytekniikka Oy 2018). Joitakin teräpitimiä on myös mahdollista asentaa päällekkäin, jonka ansiosta voidaan särmätä levyosia, joiden laippojen korkeudet ovat tavanomaista korkeammat. Teräpitimien päällekkäin asentaminen edellyttää koneelta usein suurempaa iskunpituutta ja ohjelmoitsijalta syvyysmuodon tarkkaa hallintaa.



Kuva 36. Kuvassa vasemmalla Amadan valmistama A GRIP-M-DUAL -teräpidin yläterän pikakiinnitykseen (Ama-Prom Finland Oy 2018b, 58). Kuvassa oikealla Wilson Tool Internationalin valmistamia särmäysteräpitimiä (Wilson Tool International Ltd 2018b).

7.3.2 Vasteet ja kulmamittalaitteet

Usein särmättävät levyosat ovat muodoltaan sellaisia, joihin tarvitaan sivuvasteita, jotta levyosan paikoitus takavasteeseen saadaan tehtyä mahdollisimman tarkasti. Kuvassa 37 vasemmalla esitetään kulmasivuvaste, jossa tukikulma voidaan säätää levyosan muodon mukaan. Sivuvasteita on saatavilla myös 90 ° -kulmalla. Sivuvasteet kiinnitetään vastimeen kiinni ja ne ovat asennettavissa oikea- tai vasenkätisenä. Takavasteeseen on myös mahdollista kiinnittää erityyppisiä vasteita kuten paikoitussensorilla varustettuja vasteita, vasteisiin asennettavia ohjaus pinnejä ja muoto vasteita jotta paikoitus ei tuota ongelmia haastavissakaan levyosissa. (Ama-Pro Finland Oy 2018a). Oikeanlaisia sivu- ja takavasteita hyödyntäen levyosan paikoitus aika nopeutuu huomattavasti, jolloin särmäyksen kokonaisaika pienenee ja on kustannustehokkaampaa.

Kuvassa 37 oikealla on nähtävissä digitaalinen kulmamittauslaite DIGIPRO®. Amadan teknisesti kehittyneissä särmäyspuristimissa, DIGIPRO® -kulmamittauslaite sisältyy koneen varusteisiin. Mittauslaitteella mitataan särmätyn levyosan kulma, jonka jälkeen mitaustulokset lähetetään langattomasti särmäyspuristimen ohjaukselle. Kone muuttaa automaattisesti mitaustuloksien mukaan tarvittavaa puristusvoimaa, jolloin koneen käyttäjän ei tarvitse manuaalisesti korjata kulma-arvoja. Mittausmenetelmä nopeuttaa huomattavasti kulmavirheiden korjaamiseen menevää työaikaa. Amada tarjoaa myös magneettisia kulmamittauslaitteita, joissa särmättävää levyosan kulmaa voidaan seurata reaaliaikaisesti digitaalisesta näytöstä. Mahdolliset kulmankorjaukset on kuitenkin tehtävä manuaalisesti koneen ohjelmaan. (Ama-Pro Finland Oy 2018a). Myös Wilsonilta on saatavilla säädettäviä sivuvasteita sekä digitaalisia kulmamittauslaitteita.



Kuva 37. Kuvassa vasemmalla on asteikolla varustettu kulmasivuvaste (Ama-Pro Finland Oy 2018b, 62). Oikealla on digitaalinen kulmamittauslaite DIGIPRO® (Ama-Pro Finland Oy 2018a).

7.3.3 Mukautuva erikoisvastin

Särmäyksessä on usein ongelmana taivutuslinjan lähellä olevat aukot tai reiät, jotka muuttavat muotoaan tai siirtyvät särmäyksen aikana. Alaluvussa 6.2 todettiin yleisesti että suunnittelussa pyritään huomioimaan aukkojen tai reikien paikoitus niin että särmäys on tehtävissä ilman suurempia muodonmuutoksia. Jos se ei ole mahdollista, joudutaan tekemään useampi työkaluasetus, jotta päästään haluttuun lopputulokseen. (Matilainen ym. 2010, 257).

Nykyään on saatavilla erityisiä vastimia, joilla pystytään estämään reikien tai aukkojen muodonmuutokset taivutuslinjojen läheisyydessä. Alaluvussa 5.2 todettiin V – urassa tehtävää vapaataivutusta kutsuttavan myös kolmipistetaivutukseksi, jossa levyosan tuenta on vastimessa vain kahdesta pisteestä kiinni. Riittävän tuennan puuttuessa, särmäyksessä tapahtuu myös plastista muodonmuutosta taivutuslinjojen läheisyydessä oleville aukoilta ja rei'ille koska levyosan ulkoreuna venyy ja sisäreuna puristuu, kuten alaluvussa 5.4 todettiin.

Erikoisvastimessa olevat kaksi kiskoa myötäilevät ja tukevat tasaisen puristusvoiman ansiosta tiukasti levyosaa särmäyksen aikana koko matkalta, jolloin reiät ja aukot eivät pääse muuttamaan muotoaan tai sijaintiaan. Tällaisella erikoisvastimella voidaan myös särmätä lyhyitä ulkosärmiä jatkuvan tuennan ansiosta, koska särmä ei pääse luiskahtamaan uraan kuten tavanomaisessa V – urassa. (Ama- Prom Finland Oy 2018a.)

Erikoisvastimella voidaan lisäksi särmätä eri materiaaleja lähes naarmuttomasti ilman levymateriaalin erillistä suojausta ja naarmuttomasti materiaaleille, joissa on suojakalvo. Särmäykset voidaan tarvittaessa tehdä myös pienillä taivutussäteillä. (Ama- Prom Finland Oy 2018a.) Erikoistyökalun monipuolinen käyttöalue vähentää työkalujen määrää ja asetusaikoja, jonka vuoksi erikoisvastin on varteenotettava vaihtoehto tehostettaessa särmäystä muun muassa sellaisissa levyosissa, joissa reikiä ja aukkoja on taivutuslinjan läheisyydessä. Kuvassa 38 havainnollistetaan erikokoisia erikoisvastimia, joiden koko muuttuu aineenvahvuuden muuttuessa. Vasemmalla puolella esitetään Wilsonin valmistamia V – series Black – vastimia ja oikealla Amadan valmistamia WingBend – vastimia.

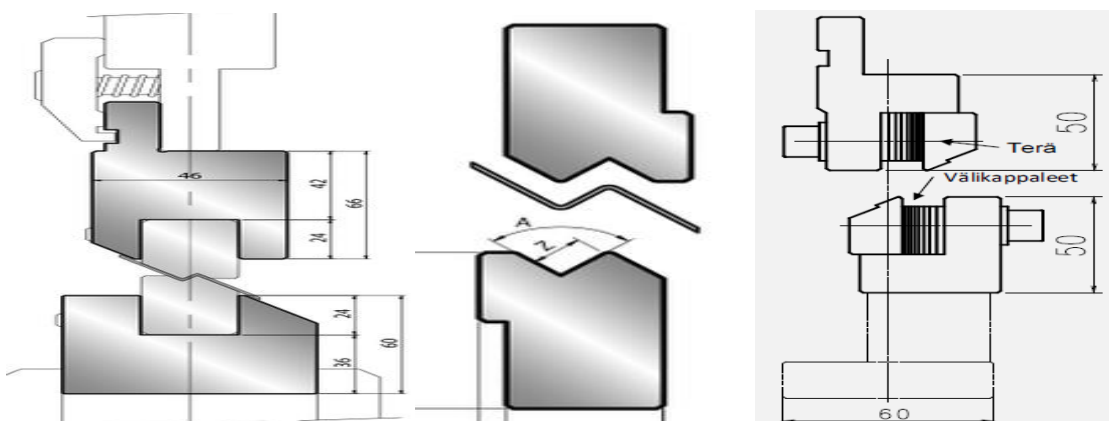


Kuva 38. Kuvassa vasemmalla Wilson V -series Black -erikoisvastimia (Wilson Tool International Ltd 2018c) ja kuvassa oikealla Amada WingBend -erikoisvastimia (Ama-Prom Finland Oy 2018b, 65).

7.3.4 Offset – taivutukset (Z – työkalut)

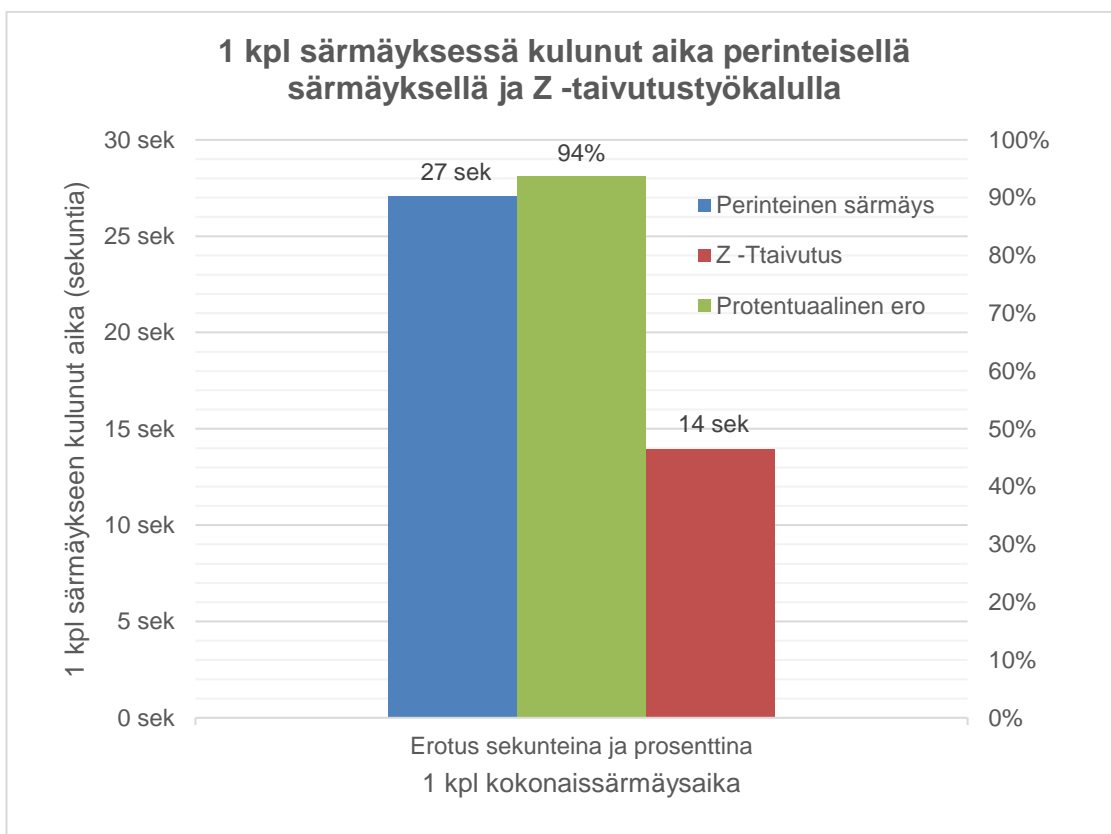
Särmäyksessä joudutaan usein tekemään myös niin sanottuja offset – taivutuksia, joissa levyn särmää nostetaan ennalta määritetyn mitan verran, jonka jälkeen levyosan suora osuus on samansuuntainen levyosan molemmissa päissä. Levyosan muoto on taivutuksen jälkeen Z – muotoinen ja usein tällaisia taivutuksia kutsutaan myös Z – taivutuksiksi. Offset – taivutuksia tehdään yleisesti perinteisillä särmäystyökaluilla levyosaa kääntäen, mutta tarjolla on myös erikoistyökaluja, joilla haluttu offset - taivutus on tehtävissä kertaiskulla. Kuvassa 39 vasemmalla ja keskellä esitetään Wilsonin valmistama Z – taivutustyökalu, jolla voidaan särmätä kertaiskulla haluttuja offset -mittoja levyosaan. Myös kulmat ovat määritettävissä. Wilsonin tarjoamat Z – työkalut määräytyvät materiaalin aineenvahvuuden mukaisesti, jonka vuoksi työkaluja voidaan tarvita useampia. (Wilson Tool International Ltd 2018f).

Kuvassa 39 oikealla esitetään Amadan valmistama Z – taivutustyökalu, jolla voidaan tehdä myös haluttuja offset - taivutuksia. Amadan Z – työkalussa on välikappaleita, joilla voidaan säätää materiaalin aineenvahvuuden mukaan halutut offset – taivutukset, jolloin muita työkaluja ei tarvita. Välikappaleet ovat kohdistettavissa erityisellä kohdistusjigillä, jotta riittävä paikoitus saavutetaan. (Ama-Prom Finland Oy 2018a.) Huomioitavaa on, että usein Z – taivutustyökalut ovat suunniteltu vain ohutlevyosien särmämiseen. Z – työkalujen käyttö särmäyksessä on huomattavasti tehokkaampaa kuin perinteisten työkalujen käyttö, jonka vuoksi saavutetaan työaikasäästöä niin työkalujen asetuksessa kuin varsinaisessa särmäyksessä. Riippuen valmistettavista sarjoista investointikustannukset voivat olla joskus este tällaisten työkalujen hankinnalle.



Kuva 39. Vasemmalla ja keskellä Wilsonin valmistama Z – taivutustyökalu (Wilson Tool International Ltd 2018f). Oikealla Amadan valmistama säädettävä Super Multi II Z – taivutustyökalu (Ama-Prom Finland Oy 2018b, 61).

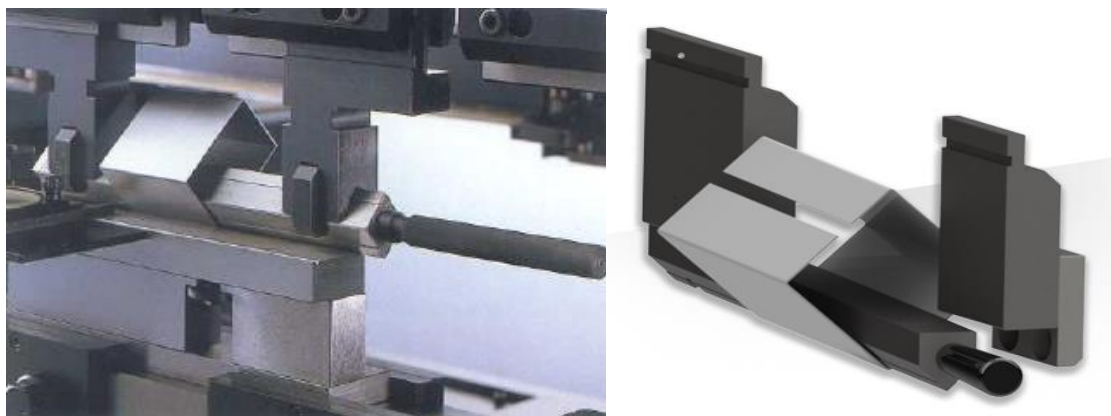
Z – taivutustyökalun hyötyjä selvitettiin tekemällä eräs tuotesarja perinteisillä särmäys-työkaluilla, jossa haluttu offset saatiin tehtyä ohjelmoinnilla ja levyaihiota kääntämällä. Tuotteen valmistusajan määrittämisen jälkeen sama tuotesarja valmistettiin Z – työkalua hyödyntäen. Kuviossa 4 todetaan Z – työkalun olevan selkeästi kustannustehokkaampi ratkaisu kyseisen tuotteen valmistamiseen. Prosentuaalisesti erotus on peräti 94 %: a, jolla on huomattavaa vaikutusta tuotteen valmistuskustannuksiin. (JL Levytekniikka Oy 2018.)



Kuvio 4. Z – taivutustyökalun hyöty verrattuna perinteiseen särmäykseen (JL Levytekniikka Oy 2018).

7.3.5 Suljetun profiilin särmäykseen tarkoitettu erikoistyökalu

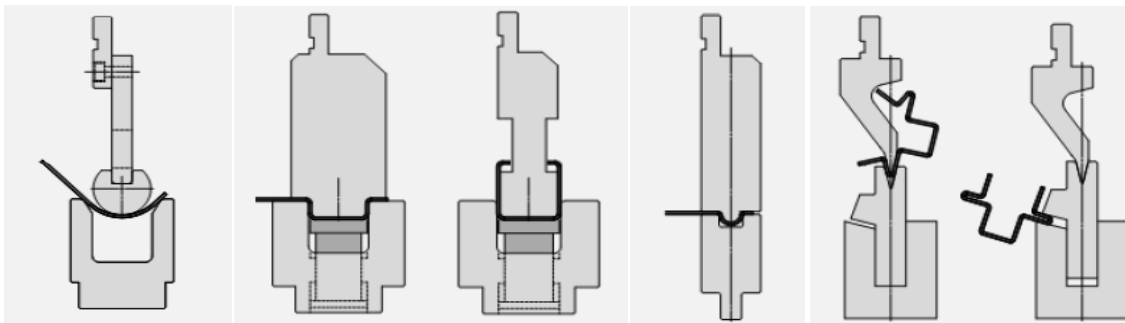
Erilaisia pienehköjä profiilimuotoja on mahdollista särmätä myös kuvassa 40 esitetyllä menetelmällä. Perinteisillä työkaluilla profiilien särmäminen on usein haastavaa ja aikaa vievää, koska teräpitimet voivat estää halutun muodon saavuttamisen. Kuvassa 40 vasemmalla on Amadan valmistama työkalu suljetun profiilin särmäämiseen ja oikealla Wilsonin valmistama työkalu. Työkalut ovat idealtaan samanlaisia, joissa taivutuksen tekevä terä on irtonainen ja profiilin sisällä, jolloin särmättävä profiili ei törmää teriin. Usein särmättävän profiilin viimeinen taivutus suoritetaan kyseisellä menetelmällä. Tällaisia erikoistyökaluja käytetään lähinnä silloin, kun valmistus on perinteisillä menetelmillä haastavaa tai lähes mahdotonta.



Kuva 40. Vasemmalla Amadan erikoistyökalu suljetun profiilin särmäykseen (Ama-Prom Finland Oy 2018b, 63) ja oikealla Wilsonin erikoistyökalu (Wilson Tool International Ltd 2018i).

7.3.6 Erikoistyökaluja haastavampien levyosien särmäykseen

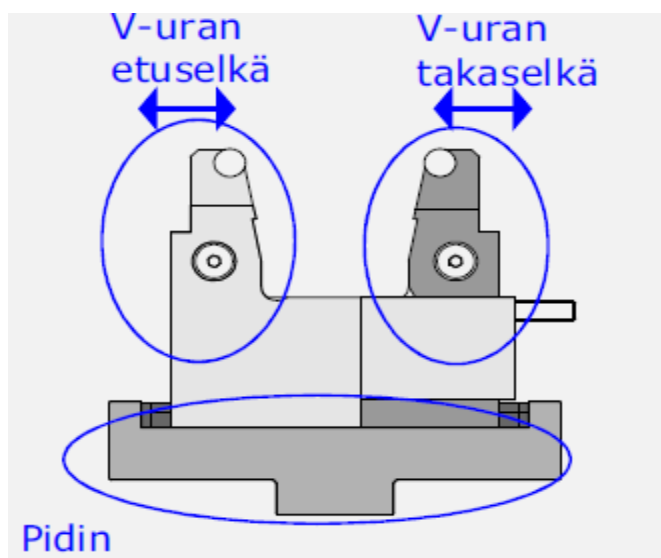
Amadalla ja Wilsonilla on tarjota myös useita muita erikoistyökaluja särmäykseen, joilla pystytään tekemään haastavia taivutuksia yhdellä työkaluasetuksella. Erikoistyökaluja hyödyntämällä saavutetaan huomattavia työaikasäästöjä särmäystyövaiheen nopeutuksessa ja työkaluasetuksien minimoituessa. Säästöt korostuvat varsinkin pienempiä valmistussarjoja tehtäessä. Kuvassa 41 esitetään muutamia erikoistyökaluja, joista ensimmäisenä vasemmalla on R – taivutustyökalu, toisena on hattutaivutustyökalu, kolmantena U – taivutustyökalu, neljäntenä särmäyslinjan suuntainen jäykistetyökalu ja viimeisenä erityinen litistystyökalu. Jäykistetyökaluja on mahdollista saada myös poikittais-suuntaisen jäykisteen valmistamiseen.



Kuva 41. Amadan valmistamia erikoistyökaluja, joista vasemmalta alkaen R – työkalu, hattutaivutustyökalu, U – työkalu, jäykistetyökalu ja erityinen litistystyökalu (Ama-Prom Finland Oy 2018b, 66–67).

7.3.7 Säädettävät 1 V matriisit

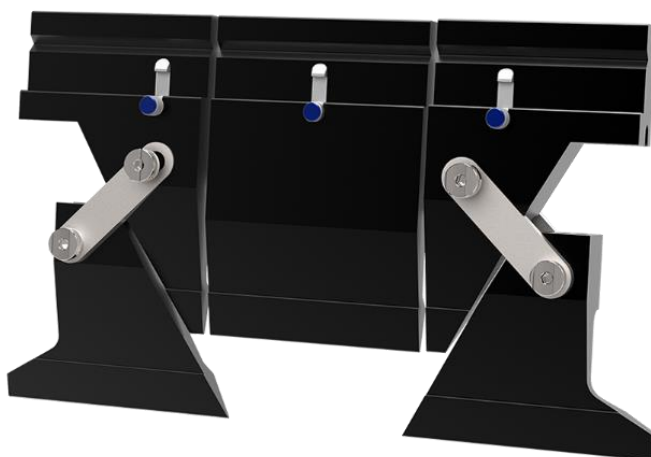
Amadalla on tarjota kaksi erilaista säädettävää 1V matriisia (V-uraa), joista mallia VLMBN voidaan käyttää 3-15 mm – aineenvahvuusalueella. V – ura on säädettävissä 10 mm:n välein alueella V25-V125. Malli VLMDN voidaan säätää 10 mm:n välein, alueella V70-V190. V – ura on käytettävissä aineenvahvuusalueella 3-20 mm:ä. (Ama-Prom Finland Oy 2018b, 64). Säädettävyyden ansiosta työkalun käyttö tuo selkeää työaikäsäästöä erinäisten paksumpien materiaalien särmäyksissä, joissa materiaalin aineenvahvuus vaihtuu usein. Tällaisissa tapauksissa erillistä työkalujen vaihtoa ei tarvita, vaan aineenvahvuuden vaihtuessa tehdään vain tarvittavat säätö- ja ohjelmointimuutokset. Kuvassa 42 havainnollistetaan mallin VLMDN säädettävää 1V matriisia.



Kuva 42. Amadan valmistama säädettävä 1V matriisi. Malli VLMDN. (Ama-Prom Finland Oy 2018b, 64).

7.3.8 Laatikoiden särmäämiseen tarkoitettu erikoistyökalu

Särmäyksessä valmistetaan usein myös erilaisia laatikoita, joiden reunojen taivutukset estävät kustannustehokkaan särmäyksen perinteisillä työkaluilla. Joissakin tapauksissa teriä joudutaan siirtämään, jotta särmätty laatikko voidaan poistaa terien välistä. Wilson tarjoaa laatikoiden särmäämiseen erikoistyökalua, jolla voidaan särmätä tällaisia laatikoita ilman terien irrotusta tai siirtämistä. Kuvassa 43 havainnollistetaan Wilsonin valmistamaa Swing Ear – työkalua, jossa terän päädyt liikkuvat. Särmäyksen jälkeen päädyterät laskeutuvat alas, jolloin särmätty laatikko on helposti poistettavissa. (Wilson Tool International Ltd 2018g) Erikoistyökalun käyttö vaatii erityistä tarkkaavaisuutta, mutta valmistettaessa säännöllisesti erilaisia laatikoita, saavutetaan tällaisissa särmäystyövaiheissa huomattavaa kustannussäästöä.



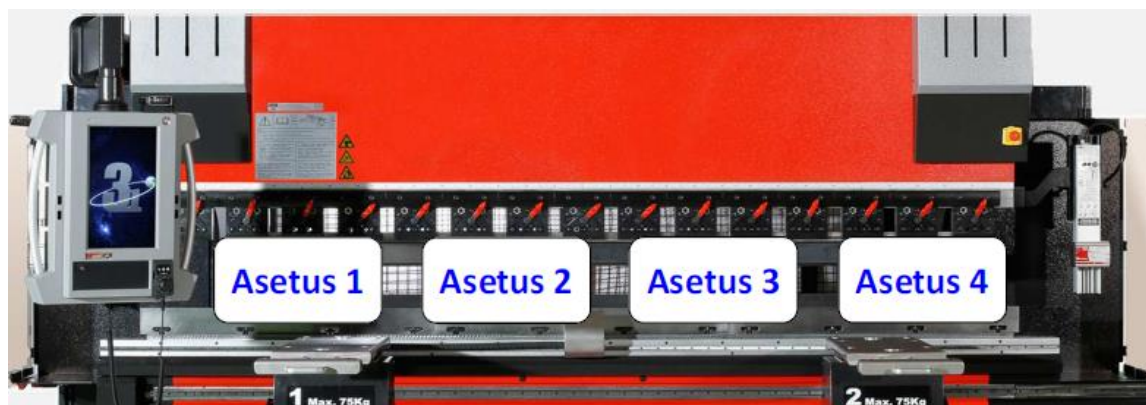
Kuva 43. Wilsonin valmistama Swing Ear – erikoistyökalu laatikoiden särmäämiseen (Wilson Tool International Ltd 2018g).

7.3.9 AFH (Amada Fixing Height) – työkalut särmäyksessä

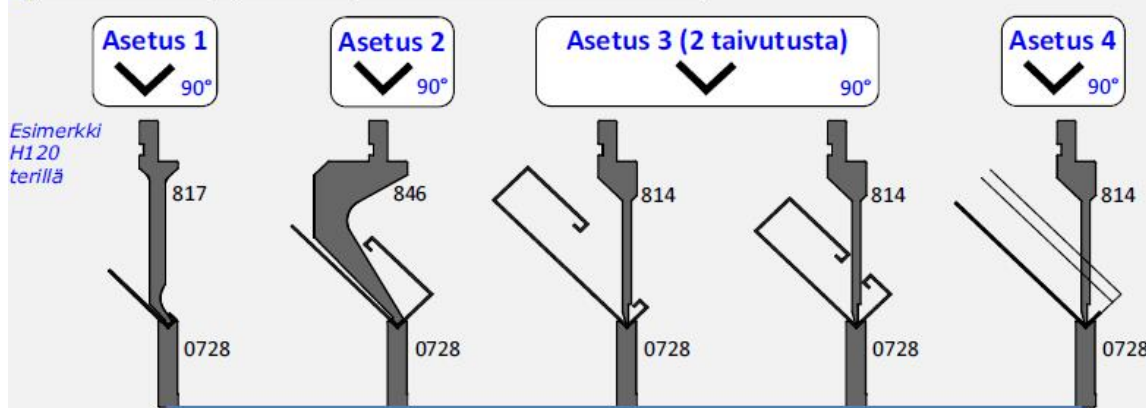
Erikoistyökalujen lisäksi nykyään on mahdollista tehostaa särmäystä AFH (Amada Fixed Height) – särmäystyökaluilla. AFH – työkalut ovat nimensä mukaisesti samankorkuisia ja niitä voidaan asentaa muodosta riippumatta samaan työkaluasetukseen. Yläteriä on saatavilla neljällä eri korkeudella, H70 mm, H90 mm, H120 mm ja H160 mm. Moniasetuksessa alaterät valitaan yläterän valinnan mukaan. AFH – työkalut on suunniteltu erityisesti Amadan teknisesti kehittyneille HG ja HFE – sarjan särmäyspuristimille. (Ama-Prom Finland Oy 2018b, 4-5).

Perinteiset särmäystyökalut ovat muodostaan riippuen korkeudeltaan erimittaisia, jolloin niitä ei voida käyttää yhtäaikaaisesti samassa työkaluasetuksessa. Usein särmättävään levyosaan tarvitaan muodoltaan erilaisia työkaluja, jotta päästään haluttuun lopputulokseen. Erimittaisten työkalujen käyttö vaatii useita työkaluasetuksia, jolloin valmistuskustannukset kasvavat ja särmäyspuristimen kustannustehokas hyötykäyttö alenee. (Ama-Prom Finland Oy 2018b, 4-5).

AFH – työkalujen ansiosta haastavatkin särmäykset voidaan tehdä erimuotoisilla työkaluilla peräti yhdellä moniasetuksella. Kuvassa 40 havainnollistetaan AFH – työkalujen käyttöä moniasetuksena, jolloin särmättävä levyosa saadaan kustannustehokkaasti valmistettua. Perinteisillä työkaluilla kuvassa 44 oleva levyosa jouduttaisiin särmäämään tekemällä useampia eri työkaluasetuksia, jolloin valmistus ei ole kustannustehokasta verrattuna AFH – työkalujen käyttöön ja käytöstä saatavaan moniasetushyötyyn nähden. (Ama-Prom Finland Oy 2018b, 4-5).



Asetukset kappaleelle jossa vain 90° taivutuksia:



Kuva 44. Esimerkki kustannustehokkaasta moniasetuksesta AFH – työkaluilla HG - ja HFE – sarjan särmäyspuristimissa (Ama-Prom Finland Oy 2018b, 5).

7.3.10 Särmäystyökalujen säilytys ja huolto

Särmäysterien järjestelmällisellä järjestyksellä on suuri merkitys särmäyspuristimen työkalujen vaihtoaikaan. Esimerkiksi Wilsonilla ja Amadalla on tarjota särmäystyökaluille erikokoisia säilytysjärjestelmiä, jotka voidaan sijoittaa ahtaisiin väleihin lähelle särmäyspuristinta, jolloin työkalujen hakemiseen kulunut aika voidaan minimoida. Hyvän järjestyksen ansiosta särmäysterät voidaan myös tehokkaammin luetteloida, jolloin myös suunnittelijalla on tarvittavat terätiedot helposti käytettävissä. Suunnittelija kykenee terätietojen avulla tekemään suunnittelua usein ilman, että uusia teräinvestointeja tarvitsee tehdä. Tarvittavissa terähankinnoissa ostajalla on luetteloinnin ansiosta välitön tieto, jolloin hankinnat voidaan tehdä ajoissa.

Kuvassa 45 vasemmalla nähdään Wilsonin säilytysjärjestelmä, jossa on viisi pystysuoraa laatikkoa. Laatikoihin on helppo järjestää työkaluja siten, että ne on nopea paikantaa ja ottaa käyttöön. Säilytysjärjestelmä myös estää työkalujen liikkumisen, jolloin työkalut eivät pääse törmäilemään toisiinsa, eivätkä näin aiheuttamaan mittaheittoja aiheuttavia vaurioita. (Wilson Tool International Ltd 2018d).

Säilytysjärjestelmiä voidaan luoda särmäyskonekohtaisesti tai keskitetysti särmäyslinjan kaikille koneille. Tarjolla on myös työkaluvaunuja, joilla voidaan esimerkiksi työkohtaisesti toimittaa työkalut särmäyskoneen välittömään läheisyyteen. Vaunussa on mahdollista säilyttää myös tarvittavat työkalut ja mittalaitteet. (Wilson Tool International Ltd 2018d).

Laadukkaat särmäystyökalut ovat usein kohtuullisen arvokkaita, jonka vuoksi asianmukaisella työkaluhuollolla on suuri merkitys saavutettaviin mittatarkkuuksiin särmäyksessä. Sinkin tarttuminen työkaluihin on hyvin yleistä, varsinkin, kun särmätään kuumasinkittyjä levyosia. Usein kuumasinkityt levyosat ovat muutoinkin pinnaltaan epätasaisia ja työkaluihin kertynyt sinkki aiheuttaa yleisesti kulmaheittoja särmättäviin levyosiin, jonka vuoksi mittakorjauksia joudutaan tekemään usein. Sinkin pois saaminen työkaluista on hankalaa ja työlästä. Muun muassa Wilsonilla on tarjota särmäystyökalujen huoltoon ultraäänipesukone, jolla sinkki ja muut epäpuhtaudet ovat helposti ja nopeasti poistettavissa. Kuvassa 45 oikealla esitetään Wilsonin tarjoama ultraäänipesukone. Työkalut asetetaan koriin, jonka jälkeen ne lasketaan pesualtaaseen. Pesuaika on säädettävissä. Koneita on myös erikokoisia, jolloin pitkätkin särmäysterät ovat nopeasti ja tehokkaasti pestävissä lähes uudenveroisiksi. Säännöllisellä huollolla särmäysterien elinikää saadaan huomattavasti pidennettyä. (Wilson Tool International Ltd 2018h).



Kuva 45. Kuvassa vasemmalla Wilsonin valmistama särmäystyökalujen säilytysjärjestelmä (Wilson Tool International Ltd. 2018d). Oikealla ultraäänipesuri särmäystyökalujen huoltoon (Wilson Tool International Ltd 2018h).

7.3.11 Uudet särmäyspuristimet

Särmäystä voidaan tehostaa myös investoimalla uusiin koneisiin, joilla pystytään saavuttamaan teknisen kehityksen ansiosta nopeampaa ja tehokkaampaa valmistusta. Esimerkiksi Amadan uudet teknisesti kehittyneet särmäyspuristimet sisältävät paljon erilaisia ominaisuuksia, joita monissa vanhemmissa koneissa on jouduttu tekemään erikseen osana asennus- tai ohjelmointivaihetta. Tekninen kehityssuunta näyttäisi suuntautuvan lisääntyvään robotiikkaan särmäyksissä, joiden ohjelmointi suoritetaan etänä, esimerkiksi Amadan Solution Pack Bend -ohjelmistoa hyväksi käyttäen.

Robotiikkaa ja uuden sukupolven ohjaustekniikkaa (AMNC 3i) hyödyntäviä särmäyspuristimia ovat esimerkiksi Amadan HG 1303 Rm Bending Robot System, jossa robotti suorittaa särmäämisen, mutta tarvittavat työkalut asennetaan manuaalisesti. HG -sarjan särmäyspuristimista löytyy myös HG 1003 ARs Bending Robot System, jossa on kaksi erillistä robottia. Toinen roboteista asentaa ohjelmoidusti tarvittavat työkalut ja toinen suorittaa vaaditut särmäykset levyosille. Amadalla on tarjota myös särmäyspuristin, jossa robotti asentaa tarvittavat työkalut ja särmääminen suoritetaan käsikäyttöisesti. Koneen malli on nimeltään HG ATC. Amada on kehittänyt erityisesti pienemmille valmistussarjoille EG 6013 AR Bending Robot System – särmäyspuristimen, jonka tarkemmat spesifikaatiot esitettiin alaluvussa 7.2. (Ama-Prom Finland Oy 2018a.)

Amadalla on myös HFE -sarjan koneita, kuten HFE 3i, HFE T2 ja HFE M2, joista HFE 3i on uusimman sukupolven särmäyspuristin. Tarjolla olevissa uusissa HG- ja HFE 3i – särmäyspuristimissa voidaan ohjelmointia suorittaa haluttaessa myös edelleen paikallisesti hyväksi käyttäen esimerkiksi saatavilla olevia 3D – malleja, joiden avulla ohjelmointi voidaan suorittaa automaattisesti tai manuaalisesti. Uusi AMNC 3i – ohjaus tekee ohjelmoinnista nopeaa ja jopa työkalujen asennus ja särmäyksen eri vaiheet ovat graafisesti informoituna, jonka ansiosta työntekijän vaihtuminen kesken valmistussarjan sujuu nopeasti. Muita mainittavia uusia ominaisuuksia ovat muun muassa nopeat kulmakorjaukset, moniasetukset AFH – teriä hyödyntäen, akseleiden kattavat säätömahdollisuudet, graafinen ja selkeä ohjaus, ja erilaiset optiot kuten taivutusavustimet suuremmille särmäyttäville kappaleille. (Ama-Prom Finland Oy 2018a.)

Ohjelmoinnin nopeutta selvitettiin HFE 3i – koneessa suorittamalla ohjelmointi paikallisesti erääseen särmättävään levyosaan, jossa oli yhteensä neljä erillistä taivutusta. 3D -mallin pohjalta suoritettu ohjelmointi kesti vain noin 20 sekuntia, johon sisältyi särmäys-terien asennusinformaatio sekä särmättävän levyosan taivutusjärjestys. Myös särmäys-terien asennus hoitui asennusinformaation ansiosta huomattavasti nopeammin. Etänä tai paikallisesti tehdyt särmäysohjelmat voidaan tallettaa joko särmäyskoneen muistiin tai esimerkiksi yrityksen palvelimelle, josta ne ovat käytettävissä nopeasti uudelleen. (JL Levytekniikka Oy 2018)

7.4 LEAN – työkalut ja särmäyksessä tarvittavan ammattitaidon ylläpitäminen

Särmäystä on mahdollista tehostaa myös erilaisilla LEAN – työkaluilla, kuten esimerkiksi 5S, SMED, ANDON, FMEA, ja DMAIC – työkaluilla/järjestelmillä. LEAN – toimintamallilla sovelletaan laatujohtamisen periaatteita tuottamiseen, jonka tarkoituksena on keskittyä kokonaisuuden optimoimiseen, jotta voidaan kohdistaa voimavarat niihin toimintoihin, jotka ovat asiakkaalle ja valmistavalle yritykselle arvoa tuottavaa. Leanin keskeisin tavoite on siis lyhentää läpimenoaika (Lead Time). Arvoa tuottavan ajan ja läpimenoajan suhdetta kutsutaan virtaustehokkuudeksi. (Quality Knowhow Karjalainen Oy 2018a.) Yrityksen kilpailukykyä ja toiminnan jatkuvuutta voidaan varmistaa kasvattamalla arvoa suhteessa toiminnan kustannuksiin. Toimintaan luodaan täsmällisyyttä, tarkoituksenmukaisuutta ja järkevyyttä. (Kouri 6/2009, 6-7.)

LEAN 5S on käytännön kehitystyökalu, jonka avulla huolehditaan järjestyksen ja siisteyden kehittämistä ja niiden ylläpidosta. Kehitystyökalun tarkoituksena on muun muassa parantaa työvälineiden valvontaa ja seurantaa, parantaa työturvallisuutta, ylläpitää työpisteen järjestystä, jotta työvälineitä ei tarvitse etsiä ja lisäksi työvälineiden organisoimista myötä, helpottaa työn tekemistä siistissä työympäristössä. Nimensä mukaisesti 5S sisältää viisi eri kohtaa, jotka tarkoittavat lajittelua (Seiri), järjestystä (Seiton), puhdistamista ja huoltamista (Seiso), vakiinnuttamista (Seiketsu) ja ylläpitämistä (Shitsuke). Lajittelulla ja järjestelyllä materiaalit, työkalut ja muut tarvittavat tavarat sijoitetaan tarkoituksenmukaisesti merkityille paikoille ja työpisteiltä poistetaan kaikki ylimääräiset ja tarpeettomat työkalut ja materiaalit. Puhdistuksella ja huoltamisella tarkoitetaan koneiden ja laitteiden asianmukaista kunnossapitoa. Vakiinnuttamisen tarkoituksena on hoitaa siivous ja järjestely rutiininomaisesti osana työntekoa. Ylläpidolla hoidetaan jatkuvasti lajittelua, järjestystä ja puhdistusta sekä huoltoa. (Kouri 6/2009, 26–27.)

SMED (Single Minute Exchange of Die) – työkalulla tarkoitetaan vakiomenetelmän kehitystä, jotta esimerkiksi särmäystyökalujen vaihtoaika olisi mahdollisimman lyhyt ja vakioitu. Huomio kiinnitetään erityisesti koneen pysähdysaikaan, työkalunvaihtomenetelmään ja ennakkointiin. Esimerkiksi koneen vielä käydessä ennakoidaan seuraavaan työhön tarvittavat materiaalit ja työkalut valmiiksi, jotta pysähdysaika on mahdollisimman minimaalinen. Pyrkimyksenä on, että pysähdysaika on aina alle 10 minuuttia. (Cimteam Oy 2018.)

Joissakin tapauksissa myös ANDON – järjestelmä voi olla hyödyllinen tehostettaessa särmäystä. Järjestelmä ilmoittaa tuotantoon ja valmistukseen liittyvistä ongelmista tai häiriöistä tarvittaville henkilöille, jotta ongelmanratkaisuprosessi voidaan aloittaa välittömästi. Järjestelmän tarkoituksena on lyhentää läpimenoaikaa ja näin ollen virtaustehokkuutta. (Arrow Engineering Oy 2018). Systemaattisella ongelmanratkaisulla pyritään havaitsemaan ongelmien ja häiriöiden juurisyyt ja eliminoida niiden toistuminen. Selvittäminen lähtee ongelman ymmärtämisestä, jonka jälkeen selvitetään juurisyyt viisi kertaa miksi – tekniikalla, jonka jälkeen tulokset tarkistetaan ja selvitetään, poistuiko ongelma. Uusi toimintatapa vakiinnutetaan käyttöön. (Kouri 6/2009, 30–31.)

ANDON – järjestelmän ilmoituksia voidaan minimoida FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) – vika- ja vaikutusanalyysillä. Analyysin tarkoituksena on analysoida systemaattisesti toimintavarmuutta esimerkiksi särmäyskoneessa. Pyrkimyksenä on tunnistaa vikaantumistavat ja määrittää niille ehkäisykeinoja tai vähintään lieventää vikamuodosta aiheutuvia seurauksia. FMEA voidaan myös laajentaa FMECA (Failure Mode, Effects, and Critically Analysis) – analyysiksi, jossa selvitetään myös vikojen ja niiden vaikutusten kriittisyyttä. FMECA on ennaltaehkäisemiseen tarkoitettu työkalu, jonka perimmäinen tarkoitus on luokitella ja osoittaa toiminnallisten vikojen ja vikaantumistapojen väliset syy-seuraamussuhteet. (Ramentor Oy 2018.)

Ongelmanratkaisuun on olemassa myös DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve and Control) – menetelmä. DMAIC – ongelmanratkaisumenetelmällä ratkaistaan ongelmia järjestelmällisesti ja kehitetään ratkaisu liiketoiminnan kehittämiseen. DMAIC on seulontatekniikka, jonka avulla juurisyyt saadaan loogisesti esille. Määrittelyvaiheessa tunnistetaan ja rajataan ongelma sekä asetetaan tavoite. Mittausvaiheessa ongelma vahvistetaan ja potentiaaliset ongelman aiheuttajat tunnistetaan sekä datan laatu varmistetaan. (Quality Knowhow Karjalainen Oy 2018b.)

Analysointivaiheessa tutkitaan kerättyä tietoa ja selvitetään prosessissa aiheutuneet ongelmat. Optimointi- ja parannusvaiheessa ongelma ratkaistaan ja niiden tekijöitä testataan kokeellisesti. Ohjaus- ja valontavaiheessa varmistetaan saavutettu tila luomalla järjestelmä, jolla varmistetaan tilan säilyminen parannusprojektin jälkeen. (Quality Know-how Karjalainen Oy 2018b.)

Henkilöstön mukaan ottaminen kaikkeen kehittämiseen ja tuottavuuden parantamiseen on muiden menetelmien ohella tärkeää. Henkilöstön tulisi ymmärtää yrityksen toiminnan suunta ja tavoitteet sekä toimintojen kustannusvaikutukset varsinkin suhteessa kilpailijoihin. Henkilöstön on tärkeää tuntea myyntikatteen muodostuminen ja ymmärtää omien toimintojen vaikutus sen kehittymiseen. Kannattavuuden varmistamisessa tuottavuuden jatkuva parantaminen (TJP) on tärkeää huomioida koko henkilöstön voimin ja on tärkeää, että esimies kannustaa ja palkitsee onnistumisista. Yhteistyössä tehtävät kehitysprojektit onnistuvat, kun esimies luottaa henkilöstöön ja jokainen antaa oman työpanoksensa yhteisiin kehittämistä vaativiin toimintoihin ja luottaa yhteisiin tavoitteisiin. (Larikka ym. 2/2007, 14–17.)

Yrityksen tuottavuuden kehittämisessä Jatkuva Parantaminen (JP) on koko henkilöstön yhteinen toimintatapa. Jatkuvan Parantamisen toiminnalla tarkoitetaan toimintaa, jossa jokainen henkilö, riippumatta työtehtävästä, kehittää oman toimintansa laatua jatkuvasti ja on oman työnsä paras asiantuntija ja kehittäjä. Omaa työtään kehittämällä työntekijät vaikuttavat siihen, että yrityksen kaikissa toiminnoissa tapahtuu kehitystä. Toiminnan valvonnassa ja suuntaamisessa esimiehen toiminnalla on keskeinen rooli, jotta JP – toiminnalla päästään haluttuihin tavoitteisiin. (Larikka ym. 2/2007, 197.) Toiminnan kehittäminen on myös yksi osa LEAN – toimintaa (Kouri. 6/2009, 32). Usein yrityksissä seurataan erilaisilla mittareilla laatua, hukkatoimintoja ja valmistuksen tehokkuutta (Kouri 6/2009, 28). Jatkuvalle Parantamiselle, jossa koko henkilöstö on mukana, saavutetaan merkittäviä tuloksia muun muassa kustannustehokkuudessa ja tuottavuudessa. Kohteina voivat olla esimerkiksi työtavat, tiedonkulku, koneet ja työvälineet sekä valmistusvaiheet, kuten särmääminen. (Larikka ym. 2/2007, 206.)

Johtamisella on keskeinen osuus toiminnan suunnan kehitykselle. Johtamisen tehtävänä on kehittää järjestelmiä henkilöstön johtamiseen, osoittaa suuntaa sekä kannustaa erinomaisiin suorituksiin. (Tuominen 2010, 20.) Henkilöstölle luodaan kehittymisen ja oppimisen edellytykset (Tuominen 2010, 50). Johdon on kannustettava ja tarjottava koulutusta, jotta henkilöstön kyvyt ja motivaatio tehdä työtä korostuvat. Koulutuksella saavutetaan tuottavuutta ja ammattitaitoa. Oppimisen palauteprosesseina toimivat erilaiset mittarit ja tavoitteet, joiden suunnittelussa henkilöstö on mukana (Tuominen 2010, 62).

Koulutuksesta saadulla ammattitaidolla parannetaan myös laadunvalvontaa esimerkiksi särmäyksessä, jossa erilaiset mittaamiset ja säätötoimet ovat tärkeässä osassa. Säätojen ja valvonnan nopeudella on merkitystä särmäysprosessissa, jossa haastavatkin levyosat on mitattava ennen seuraavien osien valmistusta. Laadunvalvonnassa mittalaitteiden käytön hallinnalla on keskeinen osuus. Särmäyksessä käytettävät mittauslaitteet ovat pääsääntöisesti kiinteitä mittauslaitteita, kuten suorakulmia ja osoittavia mittausvälineitä, kuten erikokoisia digitaalisia työntömittoja. Joissakin tapauksissa voidaan tarvita kaarimikrometriä ja nauhamittaa. Myös mittakelloa voidaan tarvita esimerkiksi yläteräpitiimien korkeuden säätöön. Osoittavat mittalaitteet pitää laadunhallinnan varmistamiseksi tarkistaa ja kalibroida säännöllisesti, esimerkiksi erilaisia mittapaloja ja tarkistussauvoja hyödyntäen. (Ihalainen ym. 2007, 441–446.) Mittatekniikoiden kehittyessä, kulmamittauksessa käytetään usein myös digitaalisia kulmamittalaitteita, kuten alaluvussa 7.3.2 todettiin.

Laadunkehittämistä voidaan mitata myös benchmarking – prosessilla, jossa henkilöstön kanssa yhteistyössä tunnistetaan parhaat menetelmät ja toimintatavat. Benchmarking on jatkuva ja järjestelmällinen prosessi, jota voidaan käyttää palvelujen, tuotteiden ja prosessien, kuten särmäyksen mittaamiseen ja analysoimiseen. (Tuominen 2010, 125.)

8 POHDINTA JA TULOKSET

Opinnäytetyön lopuksi pohditaan tehostamismenetelmiä, materiaaleja, suunnittelua, särmäystä valmistusmenetelmänä ja särmäyksen tehostamista suunnittelu huomioiden, jonka jälkeen tarkastellaan havaittuja tuloksia ja kehitysajatuksia.

8.1 Opinnäytetyön pohdinta ja työn eteneminen

Opinnäytetyön keskeisenä tarkoituksena oli selvittää mahdollisimman kattavasti särmäämistä ja sitä, millaisilla keinoilla särmäämistä voidaan kehittää tai tehostaa. Halutun ja kustannustehokkaan särmäystuloksen aikaansaamiseksi vaaditaan suunnittelijalta paljon asiantuntemusta huomioida käytössä olevat resurssit, sekä osaamista myös hyödyntää niitä.

Työssä pyrittiin huomioimaan mahdollisimman tarkasti ne toiminnot ja asiat, jotka vaikuttavat särmäämiseen valmistusmenetelmänä. Opinnäytetyön esiselvitystyön jälkeen havaittiin suunnittelun, käytettävien ohutlevymateriaalien, särmättävien levyaihioiden ja särmäyksen valmistusmenetelmänä olevan keskiössä, näihin keskitettiin suurta huomiota tässä työssä. Jotta suunnittelussa pystytään huomioimaan mahdollisimman kattavasti kaikki särmäyksessä tarvittavat asiat, selvitettiin työn alussa ensin yleisesti tietokoneavusteista suunnittelua. Pääsääntöisesti käsiteltiin suunnittelun suorittamiseen tarvittavaa yleistä tietoa ja mahdollisuuksia SolidWorks – ohjelman hyödyntämiseen koskien ohutlevyosan valmistettavuutta ja kustannusten arviointia.

Särmäystulokseen vaikuttaa oleellisesti suunnittelijan asiantuntemus, mutta myös särmäyksessä käytettävät materiaalit, joita selvitettiin raaka-ainekohtaisesti. Selvitystyössä todettiin, että särmäyksessä käytetään paljon erilaisia materiaaleja, joista tarkemmin keskityttiin vain yleisimpiin materiaaleihin, kuten pinnoitettuihin ja pinnoittamattomiin kylmä- ja kuumavalssattuihin ohutlevyteräksiin, ruostumattomiin teräksiin ja muokattaviin alumiiniseoksiin.

Laadukkaaseen ja kustannustehokkaaseen särmäystulokseen ei päästä ilman hyvää käsitystä siitä, millainen särmäys on valmistusmenetelmänä. Työn yhtenä tarkoituksena oli selvittää mahdollisimman tarkasti, millaisilla menetelmillä särmäystä voidaan suorittaa ja miten särmäyspuristin yleisperiaatteeltaan toimii. Särmättävien materiaalien osalta tutkittiin mahdollisimman havainnollistettuna takaisinjousto, taivutussädetä ja neutraaliakselia sekä sitä, miten ne liittyvät toisiinsa ja millaisilla toimilla takaisinjousto olisi huomioitava ennen valmistusta.

Työssä pohdittiin tarkemmin myös, miten särmättävän levyosan oikaistu pituus ja tarvittava puristusvoima voidaan laskea. Selvityksessä havaittiin, että mahdollisimman tarkkojen arvojen saamiseksi, olisi syytä suorittaa koetaivutuksia, joiden avulla suunnittelussa pystytään tekemään leikkuuta varten mahdollisimman tarkka levitysaihio. Nykyään on kuitenkin erilaisia tapoja selvittää oikaistun pituuden taivutusvähenemä, jonka vuoksi työssä esiteltiin liitteessä 3 (1-6) kaavoja ja esimerkkilaskelmia, miten vähenemä voidaan laskea. Usein taivutus vähenemät saadaan suunnittelijan mallinnusohjelmasta, mutta mallinnusohjelmassa ei välttämättä ole oletuksena riittävän tarkkoja arvoja todellisen levitysmittan tuottamiseen.

Ongelmana voi myös olla riittävän puristusvoiman määrittäminen, jonka vuoksi työssä esitettiin esimerkkilaskelma likimääräisen voiman määrittämiseen. Usein tarvittavaa puristusvoimaa tarkastellaan särmäyspuristimien valmistajien taulukoista, kuten Amadan tekemästä taulukosta vapaataivutukseen on nähtävissä liitteessä 3 (8). Taulukoista on nähtävissä myös V – uran valinta eri aineenvahvuuksille, joissa samaa V – uraa voidaan käyttää useille eri aineenvahvuuksille. Aineenvahvuuden kasvaessa on huomioitava puristusvoiman tarpeen kasvaminen, joka kuluttaa työkaluja ja jonka seurauksena särmäys ei välttämättä ole enää energiankulutuksen näkökulmasta taloudellista. Useissa lähdekirjoissa todetaan vain asetusajkojen minimoituminen, kun käytetään samaa V – uraa eri aineenvahvuuksille. Särmäystyökalujen asetuksessa V – uran vaihtaminen aineenvahvuuden mukaan ei pidennä huomattavasti asetusajkaa, jos voidaan käyttää samaa paininta.

Särmäystä ei voida myöskään suorittaa mittatarkasti ilman riittävän tarkkaa aihion leikkausta. Työssä tarkasteltiin yleisesti tapoja, joilla leikkausta nykypäivänä suoritetaan.

Opinnäytetyön lähtökohtana oli aluksi havainnollistaa ja antaa tietoa, millaisilla toimilla ja asioilla särmäystä voidaan ylipäätään suorittaa. Tärkeimmät osa-alueet työssä olivat kuitenkin särmäyksen huomioiminen suunnittelussa ja se, millaisilla menetelmillä särmäystä voidaan tehostaa.

Vaikka tietokoneavusteisessa suunnittelussa huomioitiin SolidWorks – ohjelmiston avulla tehtävä levyosan valmistettavuuden ja kustannusten hallinta, tarkoituksena oli pohtia tarkemmin, millaisilla toimilla suunnittelussa voidaan tarkemmin huomioida särmäystä. Ensisijaisesti työssä tarkasteltiin valmistettavuutta ja kokoonpantavuutta DFMA – menetelmän avulla, lisäksi esiteltiin nykyaikaisia työstöohjelmia, joiden avulla muun muassa särmäysohjelmia voidaan tehdä etäohjatusti ja suorittaa simulointi ennen varsinaisen särmäyksen suorittamista.

Esimerkiksi Amadan etäohjelmointiin suunnatut työstöohjelmat, joita työssä esiteltiin, ovat kehittyneet suuntaan, jossa särmättävän levyosan leikkausohjelma tehdään särmäysohjelman jälkeen. Kustannustehokkuuden näkökulmasta katsoen kehityksen suunta tuo todennäköisesti säästöä sellaisille yrityksille, joissa on Amadan kehittyneitä särmäyspuristimia ja joissa ohjelmistoja voidaan hyödyntää kuten on suunniteltu. Toinen näkökulma on se, että särmäyksessä vaadittava ammattitaito voi heikentyä, koska ohjelmointitaitoa ei enää välttämättä vaadita sellaisella tasolla kuin pitäisi. Särmäystä suorittavien henkilöiden ammattitaidon ylläpitäminen on tärkeää ja teknisen kehityksen vuoksi siihen olisi suunnattava enemmän huomiota.

Suunnittelun asiantuntemuksen lisäämiseksi pohdittiin suunnittelussa huomioitavia asioita särmättäessä ohutlevyosia. Myös erilaisia suunnittelusääntöjä käytiin läpi, jotta välttäisiin yleisesti tapahtuvilta virheiltä. Valmistettavuuden ja laadun hallinnan näkökulmasta huomioitiin toleranssit, jotta suunnittelutyö olisi mahdollisimman kustannustehokasta.

Vaikka robotiikan hyödyntäminen särmäyksessä on nykypäivänä suhteellisen yleistä, suoritetaan särmäystä pääsääntöisesti edelleen käsikäyttöisesti. Robotiikkaa pohdittiin erillisen robottisärmäyssolun ja särmäyspuristimeen integroitavan robottijärjestelmän näkökulmista.

Tarkasteltiin useita erilaisia menetelmiä, joilla särmäyksen tehokkuutta voidaan parantaa käsikäyttöisessä särmäyksessä. Kehitystä havaittiin tapahtuneen erityisesti särmäystyökalujen, mittalaitteiden ja erilaisten teräpitemien osalta. Työssä keskityttiin erilaisten teräpitemien ja mittalaitteiden lisäksi selvittämään erilaisia erikoistyökaluja. Yhden erikoistyökalun osalta selvitettiin kustannustehokkuutta särmättävässä levyosassa. Nykyään särmäykseen on saatavilla huomattava määrä erilaisia erikoistyökaluja ja työkalutoimittajat pystyvät toimittamaan jopa räätälöityjä työkaluja erilaisiin tarpeisiin. Pikakiinnitteisten yläteräpitemien osalta selvitettiin myös kustannustehokkuutta. Työssä tarkasteltiin, millaista työaikasäästöä syntyy, jos käytetään tavanomaisten yläteräpitemien sijasta, pikakiinnitteisiä yläteräpitemiä työkalujen asetuksessa.

Amada on kehittänyt AFH – sarjan särmäystyökaluja, joilla pystytään tekemään työkalujen muodosta riippumatta moniasetuksia yhteen särmäysohjelmaan. Työkalut ovat muodostaan riippumatta samankorkuisia, jonka ansiosta haastaviakin taivutuksia pystytään tekemään hyvinkin kustannustehokkaasti. AFH – työkalujen tulo markkinoille on suuri kehitysaskel särmäyksessä. Työkalujen avulla voidaan parantaa kilpailukykyä.

Laadukkaat särmäystyökalut, joita muun muassa Wilson ja Amada tarjoavat, vaativat huoltoa ja asianmukaisen säilytystilan. Koska asetusajat ovat särmäyksessä tuottamattomia työaikaa, työssä tarkasteltiin särmäystyökalujen säilytysjärjestelmiä ja menetelmiä, jolla työkaluja voidaan huoltaa ja kasvattaa niiden käyttöikä. Työssä haluttiin huomioida yhtenä särmäyksen tehostamismenetelmänä uudet särmäyspuristimet, joissa ominaisuudet, ohjelmoinnin helppous ja nopeus ovat parantuneet huomattavasti.

Opinnäytetyössä vertailtiin myös robottisärmäyssolun ja käsikäyttöisen särmäyksen kustannustehokkuutta valmistusajan funktiona kolmelle erilaiselle tuotteelle, joissa oli useita erilaisia taivutuksia. Vertailun vuoksi valmistettavat sarjat olivat erikokoisia, jotta voitiin nähdä robottisärmäyssolun tehokkuus muun muassa automaattisessa työkalunvaihdossa.

Yksi tärkeimmistä särmäyksen tehostamismenetelmistä on särmäyspuristimia käyttävien henkilöiden ammattitaito, motivaatio ja halukkuus kehittää omaa työtään. Työssä pohdittiin menetelmiä siihen, millaisilla toimilla ammattitaitoa voidaan ylläpitää, sekä miten saavutetaan motivaatiota ja halukkuutta oman työn kehittämiseen. Myös erilaisten LEAN – työkalujen käyttöä särmäyksessä pohdittiin, vaikkakin osa niistä voi vaikuttaa kaukaiselta tuomaan tehokkuutta särmäykseen.

8.2 Tulokset ja kehitysajatuksia

Opinnäytetyön edetessä haluttiin tuoda esiin kustannustehokkuutta, kehitysajatuksia ja mahdollisuuksia tehokkaampaan särmäykseen, joita pohdittiin tarkemmin aiheen syvennyksessä. Esimerkkilaskelmilla osoitettiin kaavojen ja laskelmien toimivuus ja samalla havainnollistettiin, miten esimerkkilaskelmia voidaan hyödyntää. Särmäyksen tekninen kehityssuunta on kasvavissa määrin etenemässä robotiikan hyödyntämiseen, jolloin robotti vaihtaa työkalut ja/tai suorittaa särmäyksen. Usein kuvitellaan robottia käytettävän lähtökohtaisesti vain suurissa tai raskaissa valmistussarjoissa, mutta robotiikan hyödyntäminen myös pienien- ja keskisuurien sarjojen käytössä on lisääntynyt erilaisten robotisärmäyssolujen yleistytessä. Tämän vuoksi päätettiin tehdä vertailevat tehokkuuslaskelmat käsikäyttöisen ja robotisärmäyssolun osalta.

Vertailulaskelmissa oleva Amadan särmäyssolu on suunniteltu pienien- ja keskisuurien sarjojen valmistamiseen, joissa levyosan koot ovat myös pienehköjä. Vertailujen tulokset olivat selkeät. Robottisolu kykenee suorittamaan pienemmät valmistuserät huomattavasti tehokkaammin kuin ihminen. Laskelmissa huomioitiin työkalujen asetus aika, mutta ohjelmointi huomioitiin vain käsikäyttöisen särmäyksen osalta, koska tuolloin särmäyskone on pysähdyksissä, mutta robottisolu ei välttämättä ole, vaan suorittaa aikaisempaa työtä, vaikka uuden työn ohjelmointi on jo käynnissä.

Vertailulaskelmien mukaan ihminen näyttäisi särmäävän suuremmat valmistuserät nopeammin, mutta siinäkin vain noin kolmasosan nopeammin. Pienemmissä erissä robottisolu suoritti särmäyksen keskimäärin lähes 57 % nopeammin kuin ihminen. Tämä on valmistuskustannukset huomioiden huima erotus. Nykyään särmäyksessä tehdään huomattavan paljon pieneriä. Laskelmien pohjalta voitaisiin hyvin aloittaa esiselvitys kannattavuudesta robottisolun tai robottisolujen hankintaan.

Tarjolla olevien valmiiden robottisärmäyssiin ja yhteistyörobottien vuoksi ei enää täysin keskitytä perinteisten teollisuusrobotin operoimiin robottijärjestelmiin, vaikka robottijärjestelmiä on saatavilla paljon jo olemassa oleviin särmäyspuristimiin. Yhteistyörobottien kehitys on ollut viime vuosina hyvin voimakasta, jonka vuoksi teollisuuden eri alat, kuten ohutlevykonepajat, ovat alkaneet kiinnostua monikäyttöisestä, nopeasti ohjelmoitavasta ja helposti siirrettävästä yhteistyörobotista, jonka investointi- ja käyttökustannukset ovat huomattavasti alhaisemmat verrattuna yleisesti tunnettuun teollisuusrobottiin, joka on hankalasti liikutettavissa erilaisiin sovelluksiin.

Käsi käyttöiseen särmäykseen on saatavilla nykyään huomattavasti kehittyneitä työkalutekniikkaa. Joidenkin työkalujen kalliit investointikustannukset voivat estää niiden käytön yleistymisen pienien valmistussarjojen vuoksi. Erään särmättävän levyosan kohdalta haluttiin selvittää Z -taivutustyökalun tehokkuus valmistusajan funktiona, jotta kyettiin toteamaan investoinnin hyöty verrattuna lyhentyneeseen valmistusaikaan. Esimerkkilaskelmissa olleen erikoistyökalun käyttö kyseisessä työssä nopeutti työn suorittamista peräti 94 %, jolloin investointi työkaluun voisi olla kannattavaa, jos kyseistä työtä tehdään varmuudella useita valmistussarjoja tai sitä voidaan hyödyntää muissa särmättävissä levyosissa.

Yläteräpitiimien, joissa työkalu saadaan asennettua pikakiinnityksellä, tehokkuudesta vastata niiden kohtuullisen suuriin investointikustannuksiin tehtiin selvitys. Selvityksessä havaittiin pikakiinnityksen olevan noin 50 % nopeampi kuin tavanomaisten yläteräpitiimien, jossa tarvittiin lisäksi erillistä työkalua terän kiinnittämiseen. Nykyään asetuksia joudutaan tekemään usein pienentyneiden valmistussarjojen vuoksi, jolloin asetusajojen tehokkuuteen on syytä kiinnittää huomiota. Vaikka erilaiset ylä- tai alaterien pikakiinnitykset ovat varsin arvokkaita, niiden avulla voidaan saada huomattavia säästöjä, jos asetuksia tehdään päivittäin useita.

Edellä käsiteltiin tuloksia teknisestä näkökulmasta, eikä huomioitu kokonaisuutta vaan vain tiettyä menetelmää. Työn perimmäisenä tarkoituksena oli esittää mahdollisuuksia työn/särmäyksen tehostamiseen kokonaisuutena. Parhaimmat tulokset saadaan valmistavan yrityksen koko henkilökunnan yhteistyöllä, jossa suunnittelijan kokemus ja asiantuntemus yhdistetään särmäävien henkilöiden ammattitaitoon ja asiantuntemukseen. Yhteistyön tuloksellisuus koskee myös investointeja, joissa saatavilla oleva tietotaito käytetään mahdollisimman tarkasti hyödyksi.

Vaikka tehostamiseen tai parantamiseen on tarjolla useita LEAN – työkaluja ja menetelmiä kuten työssä esitetty DFMA – menetelmä, vaatii tällaisten työkalujen- ja menetelmien käyttöönotto koko henkilöstön pitkäjänteistä sitoutumista ja motivaatiota noudattaa DFMA – ajattelutapaa tai LEAN – filosofiaa. Usein näitä sovelletaan käytäntöön, jolloin saadaan räätälöidysti halutut toiminnot tehokkaasti käyttöön erilaisissa toimintaympäristöissä. Sitoutuminen lähtee aina yrityksen johdosta, jonka jälkeen voidaan motivoida ja sitouttaa muu henkilöstö. Tuloksien esiin tuominen tämän työn puitteissa oli haastavaa, vaikka JL Levytekniikka Oy:ssä sovelletaankin muun muassa LEAN – filosofiaa eräiden työkalujen osalta.

Opinnäytetyön tarkastelujen jälkeen voidaan todeta, että särmäystä pystytään kehittämään ottamalla särmäystä suorittavat henkilöt mukaan ideointiin, kehittämiseen ja investointeihin. Särmäyksen tehokkuutta voidaan harkinnan varaisesti kasvattaa erilaisilla teknisesti kehittyneillä uusilla särmäyspuristimilla, robotiikalla, työkaluilla, teräpitiimillä, mittalaitteilla, työkalujen säilytyksellä ja säännöllisillä työkaluhuolloilla, joita motivoituneet ja sitoutuneet henkilöt esimerkiksi LEAN – filosofian ohjaamana kehittävät oman työnsä asiantuntijoina.

Suunnittelussa valmistettavuuden ja kustannustehokkuuden asiantuntemus on lähtökohta kannattavaan valmistukseen. Vaikka tuloksia voidaan saada erilaisia ohjelmistoja hyväksi käyttäen tai DFMA – menetelmää soveltaen, tuottavuus syntyy kokonaisuudesta, joka saadaan aikaiseksi vain yhteistyöllä. Muut toiminnot ovat vain työkaluja tuottavuuden kehittämiseen. Huomioitavaa on, että kaikki kehitystoimet lähtevät yrityksen johdosta, jolla on tahto sitoutua kehittämään erilaisia toimintoja ja menetelmiä.

Lopuksi esitetään erityiset kiitokset opinnäytetyön toimeksiantaja JL Levytekniikka Oy:lle, sekä Ama-Prom Finland Oy:lle ja Wilson International Tool Ltd:lle, joiden ansiosta näin kattavan opinnäytetyön tekeminen kyseisestä aiheesta oli mahdollista.

LÄHTEET

- Ama-Prom Finland Oy 2018. Viitattu 20.1.2018a. Yrityksen luottamuksellista tietoa
- Ama-Prom Finland Oy 2018b. AFH särmäysteräkuvasto 2018. Viitattu 17.4.2018. Saatavilla sähköisesti osoitteessa <https://www.ama-prom.fi/sites/default/files/dokumentit/AFH%20s%C3%A4rm%C3%A4yster%C3%A4kuvasto%202018.pdf>
- Arrow Engineering Oy 2018. Tehosta tuotannon läpimenoaikaa ANDON. Viitattu 20.4.2018. <https://www.arroweng.fi/ratkaisut/andon/>
- Cimteam Oy 2018. Nopeat vakioasetukset ja tuotevaihdot SMED. Viitattu 23.4.2018. <http://www.cimteam.fi/uutinen.php?id=71>
- Hietikko, E. 2015. Tietokoneavusteinen suunnittelu. SolidWorks 2016. Helsinki: Books on Demand.
- Holopainen, K. 1984. Tekninen tiedotus 11/84. Ohutlevytöiden tuotannonohjauksen kehittäminen. Helsinki: Metalliteollisuuden Kustannus.
- Ihalainen, E.; Aaltonen, K.; Aromäki, M. & Sihvonen, P. 2007. Valmistustekniikka 487. Helsinki: Otatieto.
- Javelin Tech 2018. Calculating Bend Allowance, Bend Deduction and K-Factor. Viitattu 26.3 <https://www.javelin-tech.com/blog/2017/06/calculating-bend-allowance/>
- JL Levytekniikka Oy 2018. Viitattu 14.1.2018. Yrityksen luottamuksellista tietoa
- Karppinen, A; Oksanen, A; Kangasmaa, P; Lepikkö, A; Palmroos, R; Rantanen, H. & Tenkanen, V. 1986. Tekninen tiedotus 23/86. Ohutlevyjien taivutus. Helsinki: Metalliteollisuuden Kustannus.
- Koivisto, K; Laitinen, E; Niinimäki, M; Tiainen, T; Tiilikka, P. & Tuomikoski, J. 2010. Konetekniikan materiaalioppi. Helsinki: Edita Prima.
- Kouri, I. 6/2009. LEAN taskukirja. Helsinki: Teknologiainfo Teknova.
- Kuivanen, R; Tuokko, R; Jokelainen, J. & Lahtonen, T. 1999. Robotiikka. Suomen Robotiikkayhdistys Ry. Vantaa: Talentum/MetalliTekniikka.
- Larikka, M; Heinilä, P; Selin, K. & Tuominen, J. 2/2007. Tuottavuuden jatkuva parantaminen. Uusi toimintamalli esimiehille. Uusia tuottavuusmenettelyjä tiimeille. Helsinki: Teknologiainfo Teknova.
- Lempiäinen, J. & Savolainen, J. 2003. Hyvin suunniteltu – puoliksi valmistettu. Suomen Robotiikkayhdistys Ry. Helsinki: Hakapaino.
- Matilainen, J; Parviainen, M; Havas, T; Hiitelä, E. & Hultin, S. 2010. Ohutlevy tuotteiden suunnittelijan käsikirja 6/2010. Helsinki: Teknologiainfo Teknova.
- Metsta 2018. Julkaisut. Esitteet. Terässtandardit. Viitattu 17.1.2018. Saatavilla sähköisesti osoitteessa <http://www.metsta.fi/julkaisut/esitteet/Terasstandardit.pdf>
- Mäki-Mantila, J; Kangasmaa, P; Varis, J; Helle, T. & Helineva, M. 2001. Tekninen tiedotus 11/2001. Ohutlevyjien taivutus ja muovaus. Helsinki: Metalliteollisuuden Kustannus.
- Pere, A. 2012. Koneenpiirustus 1 & 2. Espoo: Kirpe.

Piironen, T. 2013. Portal Savonia-ammattikorkeakoulu julkaisutoiminta. Hitnet suunnittelijanopas 2018. Teräsrakenteiden suunnitteluohjeita parempaan valmistettavuuteen. Viitattu 28.3.2018. Saatavilla sähköisesti osoitteessa <http://portal.savonia.fi/pdf/julkaisutoiminta/2013-hitnet-suunnittelijanopas.pdf>

PLM Group Suomi Oy 2018. K-kertoimen selvitys. Viitattu 28.3.2018. <https://plmgroup.fi/k-kertoimen-selvitys/>

Quality Knowhow Karjalainen Oy 2018a. LEAN. Viitattu 23.4.2018. <http://www.sixsigma.fi/fi/lean/>

Quality Knowhow Karjalainen Oy 2018b. LEAN Six Sigma DMAIC. Viitattu 23.4.2018. <http://www.sixsigma.fi/fi/six-sigma/dmaic/>

Ramentor oy 2018. FMEA Vika- ja vaikutusanalyysi. Viitattu 23.4.2018. <http://www.ramentor.com/etusivu/teoria/fmea/>

Ritakallio, I. 2004. Teleste. Viisi Vuosikymmentä Kuvassa Mukana. Turku: Finepress.

SSAB Ab 2018. Tuotteet. Brändit. SSAB brändit. SSAB domex structural steel. Products. SSAB domex 355. Viitattu 16.1.2018 <http://www.ssab.fi/tuotteet/brandit/ssab-domex-structural-steel/products/ssab-domex-355mc>

SolidWorks web help 2018. Bend Allowance and Bend Deduction calculation. Viitattu 25.3.201 http://help.solidworks.com/2018/english/SolidWorks/sldworks/c_bend_allowance_and_bend_deduction.htm?verRedirect=1

Tuominen, K. 2010. LEAN Tehoa ja laatua lean-kulttuurin luomiseen. Helsinki: A Bonnier Group Company.

Wilson tool International Ltd 2018a. Press brake fundamentals: The three types of bending. Viitattu 21.3.2018a. <http://marketing.wilsontool.com/acton/fs/blocks/showLandingPage/a/8311/p/p-0032/t/page/fm/0/r/-/s/?sid=hTx8szXTt>

Wilson tool International Ltd 2018b. Clampit <https://www.wilsontool.com/en-US/Ideas/Bending>

Wilson tool International Ltd 2018c. V series black <https://www.wilsontool.com/getattachment/95d1e75b-4a48-4829-bd2d-a44d83dc2fcb/V-Series-Black-Flyer>

Wilson tool International Ltd 2018d. Särämästyökalujen säilytys http://global.wilson-tool.com/UKEnglish/Product_accessories_uk_p_accs_uk_p_accs_thick_uk_p_accs_thick_storage_uk.aspx

Wilson tool International Ltd 2018e. Speciaali työkalut <https://www.wilsontool.com/en-US/Products/Bending/European-Precision/Special>

Wilson tool International Ltd 2018f. Yrityksen luottamuksellista tietoa

Wilson tool International Ltd 2018g. Swing tool <https://www.wilsontool.com/en-US/Products/Bending/European-Precision/Standard/Swing-Ear-Sections>

Wilson tool International Ltd 2018h. Ultrasonic http://global.wilsontool.com/UKEnglish/Product_accessories_uk_b_accs_uk_b_accs_wt_uk_b_accs_wt_ultrasonic_uk.aspx

Wilson tool International Ltd 2018i. Window box http://global.wilsontool.com/UKEnglish/Product_bending_uk_b_spcl_uk_b_spcl_euro_uk_b_spcl_euro_window_uk.aspx

Liite 1: Ruostumattomien terästen yleisimmät kemialliset koostumukset ja tärkeimmät mekaaniset ominaisuudet SFS-EN 10088-2 (Matilainen ym. 2010, 29-33).

	Teräs ²⁾		Tyypillinen kemiallinen koostumus (%)						R _m (MPa)	R _{p0,2} (MPa)	Kuvaus	
	1)	EN	ASTM	C	N	Cr	Ni	Mo	Muut	RT ³⁾		RT ³⁾
Ferrittiset ruostumattomat teräkset	1.4003	S40977	0,02	-	11,5	0,5	-	-	-	450	280	12Cr rakenneteräs
	1.4016	430	0,04	-	16,5	-	-	-	-	450	260	17Cr yleisteräs
	1.4509	S4340	0,02	-	18	-	-	-	Ti+Nb	430	230	18Cr yleisteräs
	1.4512	409	0,03	-	11	-	-	-	Ti	380	210	Pakoputki- ja katalysoittoteräs
	1.4521	444	9,02	-	18	-	2	-	Ti+Nb	420	300	Kuumavesivaraajateräs
Austenittis-ferrittiset teräkset	1.4162	S32101	0,03	0,22	21,5	1,5	0,3	-	5Mn	650	450	Niukkaseosteininen austeniittis-ferrittinen teräs
	1.4362	S32304	0,02	0,10	23	4,8	0,3	-	-	630	400	Niukkaseosteininen austeniittis-ferrittinen teräs
	1.4462	S32205	0,02	0,17	22	5,7	3,1	-	-	640	460	Keskiseosteininen austeniittis-ferrittinen teräs
	1.441	S32750	0,02	0,27	25	7	4	-	-	730	530	Runsasseosteininen austeniittis-ferrittinen teräs
Austenittiset CrNi- ja CrMn -teräkset	1.4318	301LN	0,02	0,14	17,5	6,5	-	-	-	650	350	Rakenneteräs
	1.4372	201	0,05	0,15	17	5	-	-	6,5Mn	750	350	Mn-seosteininen yleisteräs
	1.4301	304	0,04	-	18,1	8,3	-	-	-	520	210	Yleisteräs
	1.4307	304L	0,02	-	18,1	8,3	-	-	-	500	200	Matalahiilinen yleisteräs
	1.4311	304LN	0,02	0,14	18,5	10,5	-	-	-	550	280	Typpiseostettu ruostumaton
	1.4541	321	0,04	-	17,3	9,1	-	-	Ti	500	200	Ti-stabiloitu ruostumaton
	1.4306	304L	0,02	-	18,2	10,1	-	-	-	500	200	Matalahiilinen ruostumaton
Austenittiset CrNiMo-teräkset	1.4401	316	0,04	-	17,2	10,2	2,1	-	-	520	220	"Haponkestävä"
	1.4404	316L	0,02	-	17,2	10,1	2,1	-	-	520	220	Matalahiilinen "haponkestävä"
	1.4436	316	0,04	-	16,9	10,7	2,6	-	-	530	220	"Haponkestävä" 2,6Mo
	1.4432	316L	0,02	-	16,9	10,7	2,6	-	-	520	220	Matalahiilinen "haponkestävä" 2,6Mo
	1.4406	316LN	0,02	0,14	17,2	10,3	2,1	-	-	580	280	Typpiseostettu "haponkestävä"
	1.4571	316TI	0,04	-	16,8	10,9	2,1	-	Ti	520	220	Ti-stabiloitu "haponkestävä"
	1.4435	316L	0,02	-	17,3	12,6	2,6	-	-	520	220	Niukkahiilinen "haponkestävä"
	1.4439	317LMN	0,02	0,14	17,8	12,7	4,4	-	-	580	270	Kemianteoollisuuden erikoisteräs
Austenittiset runsasseosteiset teräkset	1.4539	N08904	0,01	-	20	25	4,3	-	1,5Cu	520	220	Kloridipitoiset liuokset
	1.4529	M08926	0,02	0,20	20	25	6,5	-	0,5Cu	650	300	Kloridipitoiset liuokset
	1.4547	S31254	0,01	0,20	20	18	6,1	-	Cu	650	300	Kloridipitoiset liuokset
	1.4565	S34565	0,02	0,45	24	17	4,5	-	5,5Mn	800	420	Urea

1) Jaottelu kiderakenteen (ferrittinen, austeniittis-ferrittinen, austeniittinen) tai seostuksen perusteella.

2) Teräslajit SFS EN 10088-2 / ASTM A240 / Outokumpu mukaan. Mekaaniset arvot SFS EN 10088-2 mukaan.

Lihavoidut EN-standardin mukaiset teräslajit sisältyvät SFS EN 1993-1-4-standardiin, mutta myös muita teräslajeja voidaan käyttää, kun mitoitus on perusteltu standardin kohdan 7 mukaisesti.

3) Huoneenlämpötilassa (poik.), minimiarvo.

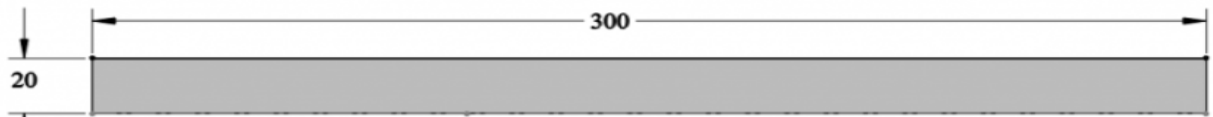
Liite 2: Mekaaniset ominaisuudet alumiiniseoksissa SFS-EN 485-2 (Matilainen ym. 2010, 65).

SEOS	TILA	Paksuus		Murtolujuus R _m MPa		Myötölujuus R _{p0,2} Mpa		Venymä %	Taivutussäde (opastava)		Kovuus (opastava)
		yli	enintään	min.	max.	min.	max.	A ₅₀ mm	180°	90°	HBW
AW 1050A	0/H111	0,5	1,5	65	95	20		22	0 t	0 t	20
		1,5	3	65	95	20		26	0 t	0 t	20
		3	6	65	95	20		29	0,5 t	0,5 t	20
	H14/H24	0,5	1,5	105	145	75		4	1,0 t	0,5 t	33
		1,5	3	105	145	75		5	1,0 t	1,0 t	33
		3	6	105	145	75		8	1,5 t	1,5 t	33
AW 2014	T651	≥0,4	1,5	440		390		6		5,0 t	133
		1,5	6	440		390		7		7,0 t	133
AW 3003	H16/H26	0,5	1,5	170	210	140		3	2,0 t	1,5 t	53
AW 3103	H16/H26	0,5	1,5	160	200	135		3	2,0 t	1,5 t	50
AW 3105	H16/H26	0,5	1,5	175	225	150		3			55
AW 5005 AW 5005A	H14/H24	0,5	1,5	145	185	120		2	2,0 t	1,0 t	48
		1,5	3	145	185	120		3	2,5 t	1,0 t	48
		3	6	145	185	120		4		2,0 t	48
	H24/H34	0,5	1,5	145	185	110		4	1,5 t	1,0 t	47
		1,5	3	145	185	110		5	2,0 t	1,0 t	47
		3	6	145	185	110		6		2,0 t	47
AW 5083	0/H111	0,5	1,5	275	350	125		12	1,0 t	1,0 t	75
		1,5	3	275	350	125		13	1,5 t	1,0 t	75
		3	6,3	275	350	125		15		1,5 t	75
		6,3	12,5	270	345	115		16		2,5 t	75
AW 5754	0/H111	0,5	1,5	190	240	80		14	0,5 t	0,5 t	52
		1,5	3	190	240	80		16	1,0 t	1,0 t	52
		3	6	190	240	80		18	1,0 t	1,0 t	52
		6	12,5	190	240	80		18		2,0 t	52
	H22/H32	0,5	1,5	220	270	130		8	1,5 t	1,0 t	63
		1,5	3	220	270	130		10	2,0 t	1,5 t	63
		3	6	220	270	130		11		1,5 t	63
		6	12,5	220	270	130		10		2,5 t	63
	H24/H34	0,5	1,5	240	280	160		6	2,5 t	1,5 t	70
		1,5	3	240	280	160		7	2,5 t	2,0 t	70
		3	6	240	280	160		8		2,5 t	70
	AW 6082	T4	≥0,4	1,5	205		110		12	3,0 t	1,5 t
1,5			3	205		110		14	3,0 t	2,0 t	58
3			6	205		110		15		3,0 t	58
T651		≥0,4	1,5	310		260		6		2,5 t	94
		1,5	3	310		260		7		3,5 t	94
		3	6	310		260		10		4,5 t	94
AW 7075	T651	≥0,4	0,8	525		460		6		4,5 t	157
		0,8	1,5	540		460		6		5,5 t	160
		1,5	3	540		470		7		6,5 t	161
		3	6	545		475		8		8,0 t	163

Liite 3 (1-6). Esimerkkilaskelmat K-kertoimen, Bend Allowancen sekä Bend Deductionin määrittämiseksi (Javelin Tech 2018). ja (SolidWorks web help 2018).

K-kertoimen (neutraaliakselin paikkaa kuvaava suhdeluku), Bend Allowancen (neutraaliakselin kaaren pituus) sekä Bend Deductionin (vähennettävä materiaali oikaistun pituuden saamiseksi, tunnetaan myös merkinä v) määrittäminen esimerkkilaskelmilla. Laskelmat tehty MathCad ohjelmistolla ja ne perustuvat funktioihin.

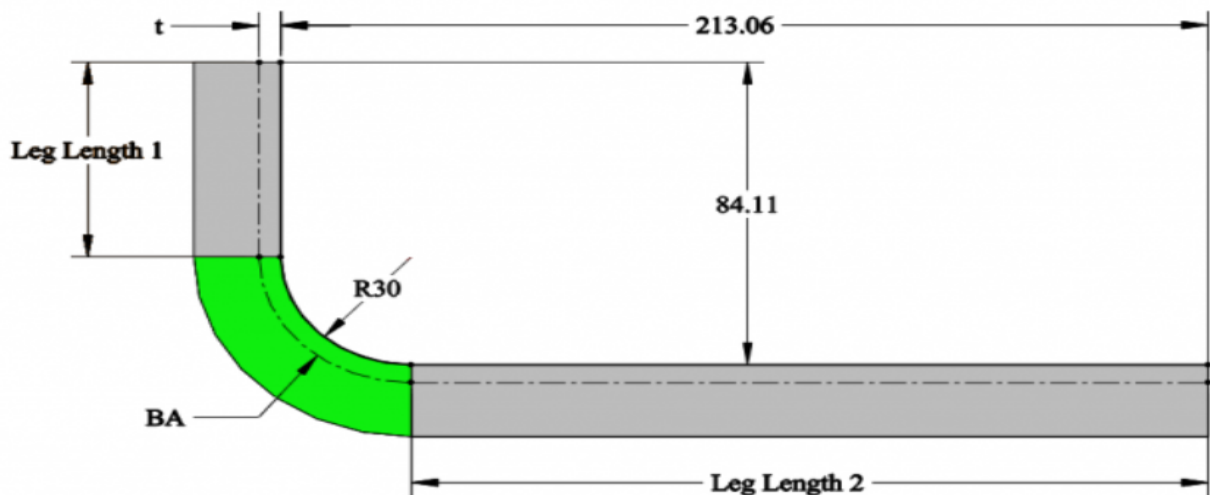
Levitys, eli oikaistu pituus.



Kuva_1

Aineenvahvuus *Levynaihion_suora_pituus*
 $s := 20 \text{ mm}$ $Suora_pituus := 300 \text{ mm}$

90 asteen taivutus.



Kuva_2

Sisäsäde *Taivutetun_levyaihion_sisämitta2* *Taivutetun_levyaihion_sisämitta1*
 $R := 30 \text{ mm}$ $Mitta2 := 213.06 \text{ mm}$ $Mitta1 := 84.11 \text{ mm}$

Laippojen_pituuksien_laskeminen_Leg_lenght

$Pituus1 := Mitta1 - R = 54.11 \text{ mm}$

$Pituus2 := Mitta2 - R = 183.06 \text{ mm}$

Bend Allowancen_laskeminen_(kaaren_pituus_neutraaliakselilla)

$BA := Suora_pituus - Pituus1 - Pituus2 = 62.83 \text{ mm}$

Neutraaliakselin_kaaren_säteen_laskeminen

$$R' := \frac{2 \cdot BA}{\pi} = 40 \text{ mm}$$

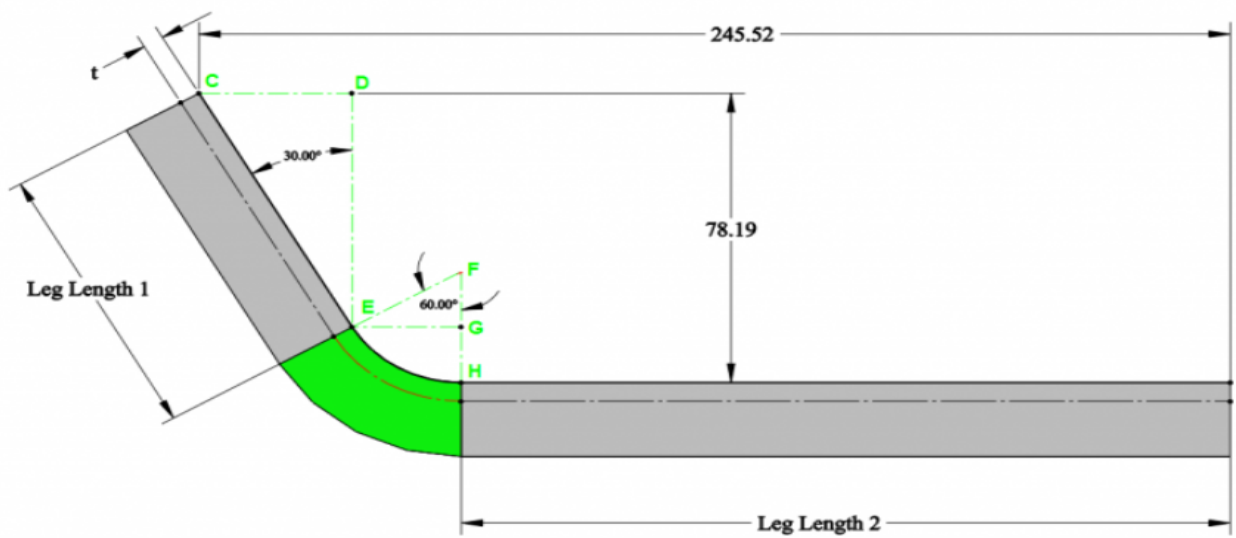
Neutraaliakselin_etäisyyden_laskeminen_levyaihion_sisäpinnasta

$$t := R' - R = 10 \text{ mm}$$

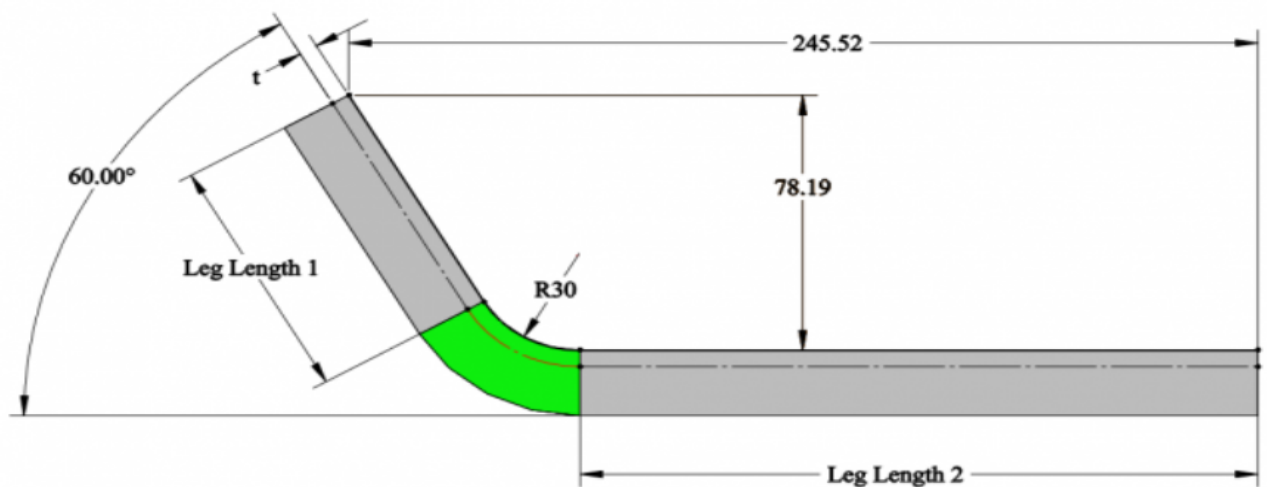
(k_kertoimen_määrittäminen_neutraaliakselin_paikkaa_kuvaava_suhdeluku)

$$k := \frac{t}{s} = 0.5$$

Alle 90 asteen taivutus.



Kuva_3



Kuva_4

Laskukaavan määrittäminen kuvan 3 ja 4 avulla. $FG=R \cdot \cos 60$
 $GH=FH-FG \rightarrow GF=R-FG \rightarrow GH=R-R \cdot \cos 60$. $Mitta1=DE+GH \rightarrow DE=Mitta1-GH$

Sisäsäde *Taivutetun aihion sisämitta2* *Taivutetun aihion sisämitta1*
 $R := 30 \text{ mm}$ $Mitta2 := 245.52 \text{ mm}$ $Mitta1 := 78.19 \text{ mm}$

Kuvan 3 GH mitta *Kuvan 3 DE mitta*
 $GH := R - R \cdot \cos(60 \text{ deg}) = 15 \text{ mm}$ $DE := Mitta1 - GH = 63.19 \text{ mm}$

Laippojen pituuksien laskeminen Leg_lenght

$$Pituus1 := \frac{DE}{\cos(30 \text{ deg})} = 72.97 \text{ mm}$$

Kuvan 3 EG mitan laskeminen. $\sin 60 = EG/R \rightarrow EG = R \cdot \sin 60$.
 CD mitan laskeminen. $\sin 30 = CD/Pituus1$.

$$EG := R \cdot \sin(60 \text{ deg}) = 25.98 \text{ mm}$$

$$CD := Pituus1 \cdot \sin(30 \text{ deg}) = 36.48 \text{ mm}$$

$$Pituus2 := Mitta2 - CD - EG = 183.06 \text{ mm}$$

Bend Allowancen laskeminen (kaaren pituus neutraaliakselilla)
 $BA := Suora \text{ pituus} - Pituus1 - Pituus2 = 43.98 \text{ mm}$

Taivutuskulma kuva_4
 $A := 60 \text{ deg}$

Neutraaliakselin kaaren säteen laskeminen. $BA = 2 \cdot \pi \cdot R' \cdot A / 360$.

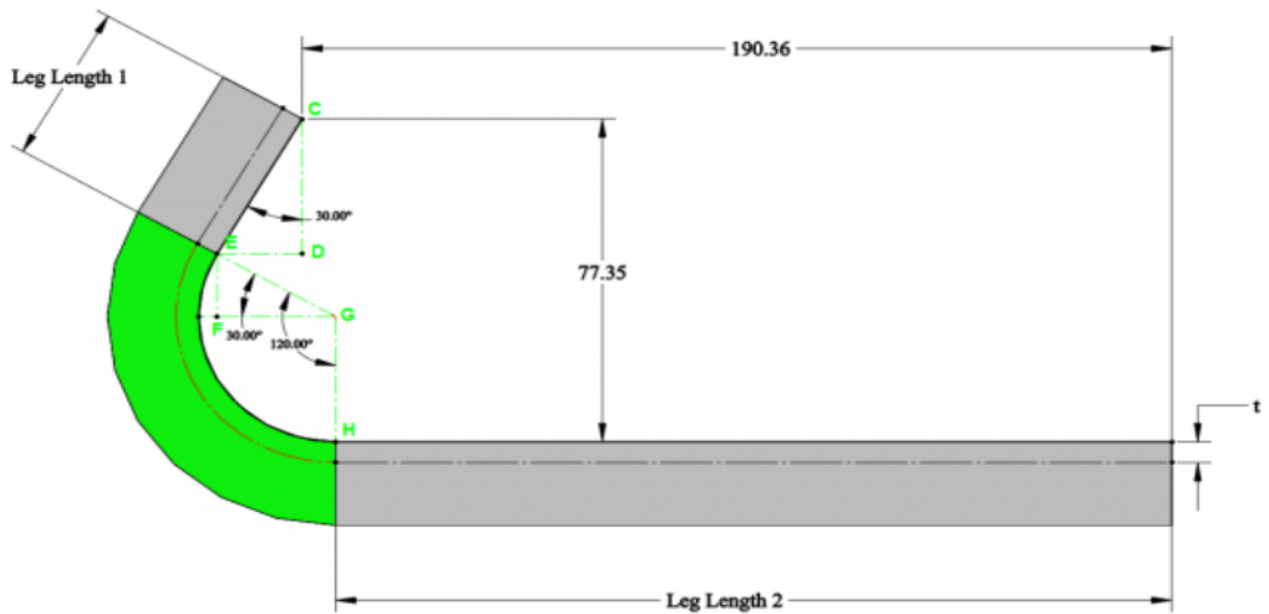
$$R' := \frac{360 \text{ deg} \cdot BA}{2 \cdot \pi \cdot A} = 42 \text{ mm}$$

Neutraaliakselin etäisyyden laskeminen levyaihion sisäpinnasta
 $t := R' - R = 12 \text{ mm}$

k_kertoimen määrittäminen (neutraaliakselin paikkaa kuvaava suhdeluku)

$$k := \frac{t}{s} = 0.6$$

Suuremman kuin 90 asteen taivutus.



Kuva_5

<i>Sisäsäde</i>	<i>Taivutetun aihion sisämitta2</i>	<i>Taivutetun aihion sisämitta1</i>
$R := 30 \text{ mm}$	$Mitta2 := 190.36 \text{ mm}$	$Mitta1 := 77.35 \text{ mm}$

Laskukaavan määrittäminen kuvan 5 avulla. $\sin 30 = EF/EG = EF/R \rightarrow EF = R \cdot \sin 30$.
 $Mitta1 = CD + EF + GH \rightarrow CD = Mitta1 - EF - R$.

<i>Kuvan_5_EF_mitta</i>	<i>Kuvan_5_CD_mitta</i>
$EF := R \cdot \sin(30 \text{ deg}) = 15 \text{ mm}$	$CD := Mitta1 - EF - R = 32.35 \text{ mm}$

Laippojen pituuksien laskeminen Leg_lenght

$$Pituus1 := \frac{CD}{\cos(30 \text{ deg})} = 37.35 \text{ mm}$$

Kuvan 5 ED mitan laskeminen. $\sin 30 = ED/Pituus1 \rightarrow ED = Mitta1 \cdot \sin 30$.
 FG mitan laskeminen. $\cos 30 = FG/EG = FG/R \rightarrow FG = R \cdot \cos 30$.

$$ED := Pituus1 \cdot \sin(30 \text{ deg}) = 18.68 \text{ mm}$$

$$FG := R \cdot \cos(30 \text{ deg}) = 25.98 \text{ mm}$$

$$Pituus2 := Mitta2 + ED - FG = 183.06 \text{ mm}$$

Bend Allowancen laskeminen (kaaren pituus neutraaliakselilla)

$$BA := Suora_pituus - Pituus1 - Pituus2 = 79.59 \text{ mm}$$

Taivutuskulma esimerkkinä 120 astetta

$$A := 120 \text{ deg}$$

Neutraaliakselin_kaaren_säteen_laskeminen. $BA=2 \cdot \pi \cdot R' \cdot A/360$.

$$R' := \frac{360 \text{ deg} \cdot BA}{2 \cdot \pi \cdot A} = 38 \text{ mm}$$

Neutraaliakselin_etäisyyden_laskeminen_levyaihion_sisäpinnasta

$$t := R' - R = 8 \text{ mm}$$

k_kertoimen_määrittäminen(neutraaliakselin_paikkaa_kuvaava_suhdeluku)

$$k := \frac{t}{s} = 0.4$$

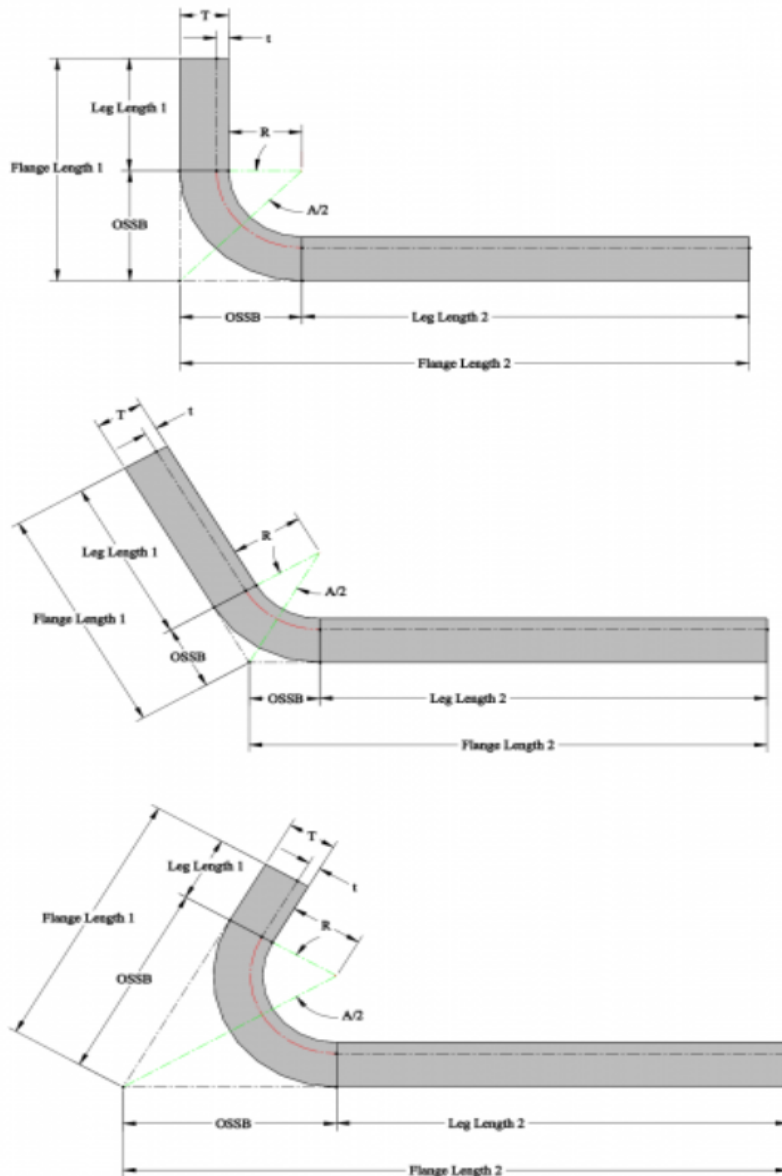
Bend_Deduction

Bend Deduction laskukaava: $BD=2 \cdot OSSB - BA$. OSSB (Outside setback) laskukaava.
 $\tan A/2 = OSSB/R + T \rightarrow OSSB = (R + T) \cdot \tan A/2$. OSSB on määritetty kuvassa 6.

Esimerkiksi_kuvan_5_BD_laskeminen_(taivutuksen_vähennys)

$$OSSB := (R + s) \cdot \tan\left(\frac{A}{2}\right) = 86.6 \text{ mm}$$

$$BD := 2 \cdot OSSB - BA = 93.62 \text{ mm} \quad (\text{vähennettävä_määrä})$$



Kuva_6_OSSB_määritettynä.

Liite 3 (7). JL Levytekniikka Oy:n taulukko (Bend Deduction) oikaistun pituuden vähennykseen (JL Levytekniikka Oy 2018).

90° taivutuksen V-arvo vapaataivutuksessa															LEVIETTY PITUUS = A+B+V									
Materiaali	Al					Fe,Cu					Ms					Rst								
Terän säde	0,2	0,6	1	3	5	10	0,2	0,6	1	3	5	10	0,2	0,6	1	3	5	10						
Ainevahvuus																								
0,4	0,6	0,8	0,9	1,8	2,6	4,8	0,7	0,8	0,9	1,8	2,6	4,8	0,8	0,9	1,0	1,8	2,6	4,8	0,8	0,9	1,0	1,8	2,6	4,8
0,5	0,7	0,9	1,0	1,9	2,8	4,9	0,8	0,9	1,0	1,9	2,8	4,9	0,9	1,0	1,1	1,9	2,8	4,9	0,9	1,0	1,2	1,9	2,8	4,9
0,7-0,8	1,0	1,1	1,2	2,2	3,1	5,2	1,1	1,2	1,3	2,2	3,1	5,2	1,2	1,3	1,4	2,2	3,1	5,2	1,3	1,4	1,5	2,2	3,1	5,2
1,0	1,3	1,5	1,6	2,5	3,4	5,5	1,4	1,6	1,7	2,5	3,4	5,5	1,6	1,7	1,8	2,5	3,4	5,5	1,7	1,8	1,9	2,5	3,4	5,5
1,25	1,7	1,9	2,0	2,6	3,7	5,8	1,8	2,0	2,1	2,7	3,7	5,8	1,9	2,1	2,2	2,8	3,7	5,8	2,0	2,2	2,3	2,9	3,7	5,8
1,5	2,2	2,5	2,6	3,1	4,0	6,1	2,3	2,6	2,7	3,2	4,0	6,1	2,4	2,7	2,8	3,3	4,0	6,1	2,5	2,8	2,9	3,4	4,0	6,1
2,0	2,8	3,3	3,4	3,8	4,6	6,7	2,9	3,4	3,5	3,9	4,6	6,7	3,0	3,5	3,6	4,0	4,6	6,7	3,1	3,6	3,7	4,1	4,6	6,7
2,5	3,3	4,0	4,1	4,9	5,2	7,3	3,5	4,1	4,2	5,0	5,4	7,3	3,6	4,4	4,5	5,3	5,8	7,3	3,8	4,5	4,6	5,4	5,9	7,3
3,0	4,1	4,8	5,0	5,7	5,8	7,9	4,5	5,0	5,1	5,8	6,1	7,9	4,6	5,3	5,4	6,1	6,6	7,9	4,7	5,4	5,5	6,2	6,7	7,9
4,0	5,6	6,3	6,5	6,9	7,0	9,2	5,7	6,5	6,6	7,1	7,4	9,2	5,7	6,9	7,0	7,5	7,9	9,2	5,8	7,0	7,1	7,6	8,2	9,2
5,0	6,9	7,7	7,9	8,0	8,2	10,4	7,0	8,0	8,1	8,4	8,7	10,4	7,1	8,5	8,6	8,8	9,4	10,4	7,2	8,7	8,8	9,0	9,7	10,4

Liite 3 (8). Teräksen ja ruostumattoman teräksen, puristusvoimataulukko vapaataivutukselle. Taulukosta nähtävissä myös V-uran valinta, eri aineenvahvuuksille. (Ama-Prom Finland Oy 2018b, 70.)



ILMATAIVUTUKSEN VOIMATAULUKKO

70

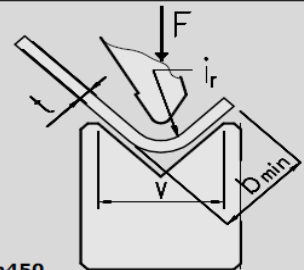
Jos tunnetaan materiaalin paksuus t , suositeltava V-aukko voidaan valita käyttämällä seuraavia kaavoja:

t	(0...3)mm	(3...8)mm	(8...12)mm	12mm <
V	6t	8t	10t	12t

Materiaalin t , V ja vetolujuuden R_m [N/mm²] perusteella taulukossa on esitetty tärkeimmät taivutustiedot:

- Pienin ulkosärmän pituus b_{min}
- Taivutussäde i_r särmättävällä materiaalilla
- Yhden metrin pituisen materiaalin vaatima puristusvoima F , KN

Taulukon arvot ovat teräkselle ja ruostumattomalle teräkselle Muuntyyppisten materiaalien osalta käytä teräksen kerrointa $k = R_m/450$



V	4	6	7	8	10	12	14	16	18	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250
b_{min}	2,8	4	5	5,5	7	8,5	10	11	13,5	14	17,5	22	28	35	45	55	71	89	113	140	175
i_r	0,7	1	1,1	1,3	1,6	2	2,3	2,6	3	3,3	4	5	6,5	8	10	13	16	20	26	33	41

t	Teräkselle $R_m \approx 450\text{N/mm}^2$																						
0,5	40	30																					
0,6	60	40	40	40																			
0,8		70	70	50	40																		
1,0		110	100	80	70	60																	
1,2			140	120	100	80	70	60															
1,4				150	130	110	100	90	80														
1,5				170	150	130	110	90	80														
1,6					170	150	130	110	100	90													
2,0						220	190	170	150	130	110												
2,3							250	230	190	170	150	120											
2,6								280	250	220	180	140											
3,0									340	300	240	190	150										
3,2										340	270	220	170	140									
3,5											330	260	200	160	130								
4											430	340	270	210	170								
4,5												440	340	270	210								
5													520	420	330	260	210						
6														600	480	380	300	240					
7															520	410	330	260					
9																670	540	430					
10																	850	670	530	420			
12																		960	780	600	550		
16																			1360	1070	860		
19																				1500	1250	1000	
22																					1600	1300	
25																						2100	1700
30																							2400

t	Ruostumattomalle teräkselle $R_m \approx 700\text{N/mm}^2$																					
0,5	60	50																				
0,6	90	60	60	60																		
0,7	120	80	80	60	60																	
0,8		110	110	80	70																	
0,9		130	120	100	80	70																
1,0		170	150	120	110	80																
1,2			210	180	150	120	110	90														
1,5						200	170	150	130	120												
2,0							330	290	260	230	200	170										
2,5								390	350	300	250	190										
3									510	450	360	290	230									
4											650	510	410	320	260							
5												780	630	500	390	320						
6													900	720	570	450	360					
8															1020	810	650	510				
10																1280	1010	800	630			
12																	1440	1170	900	830		
15																		1800	1410	1140		
20																			2500	2080	1670	
25																				3150	2550	
30																					3600	