

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Tuotekehitys

Tutkintotyö

Vesa Koivunen

**LENTOKONEIDEN ALUMIINISTEN OHUTLEVYRAKENTEIDEN
TYÖVÄLINESUUNNITTELU**

Työn ohjaaja
Työn teettäjä
Tampere 2007

Diplomi-insinööri Harri Laaksonen
Patricomp Oy, valvojana insinööri Pekka Tuovinen

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

Kone- ja tuotantotekniikka

Tuotekehitys

Vesa Koivunen

Lentokoneiden alumiinisten ohutlevyrakenteiden
työvälinesuunnittelu

Tutkintotyö

43 sivua + 19 liitesivua

Työn ohjaaja

Diplomi-insinööri Harri Laaksonen

Työn teettäjä

Patricomp Oy, valvojana insinööri Pekka Tuovinen

Syyskuu 2007

Hakusanat

työvälinesuunnittelu, ohutlevy, lentokoneenrakennus

TIIVISTELMÄ

Tämä tutkintotyö on tehty Patricomp Oy:lle, joka toimii Jämsän Hallissa ja valmistaa ohutlevytuotteita erityisesti lentokoneiteollisuuden tarpeisiin. Lentokoneiden rakenteissa käytetyt ohutlevytuotteet ovat muotonsa ja materiaalinsa puolesta tavanomaisista ohutlevytuotteista poikkeavia, joten niiden työvälinesuunnittelukin sisältää runsaasti alan erityispiirteitä.

Työssä tutkittiin alan standardien, ohjeistuksen, kirjallisuuden ja käytännön kokemusten pohjalta ohutlevyosien muovausta ja valmistusta työvälinesuunnittelijan näkökulmasta. Työn tuloksina on kuvaus ohutlevyosien valmistukseen soveltuvista työvälineistä ja sellaiset suppeat työvälineiden suunnitteluperiaatteet, joita voi käyttää työvälinesuunnittelun esittelyssä esimerkiksi uudelle työntekijälle.

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

Mechanical and Production Engineering

Product Development

Vesa Koivunen

Tool design of aircrafts' aluminium sheet metal constructions

Engineering thesis

43 pages + 19 appendices

Thesis supervisor

Harri Laaksonen (MSc)

Commissioning Company

Patricomp Oy, supervisor Pekka Tuovinen (BEng)

September 2007

Keyword

tool design, sheet metal, aircraft building

ABSTRACT

This engineering thesis is made for Patricomp Oy. Patricomp Oy manufactures sheet metal products especially for aircraft industry. Sheet metal products of aircraft constructions make an exception in a common sheet metal products. Therefore also tool designing includes lots of special characteristics of aircraft industry.

The aim of the thesis was to investigate sheet metal forming and manufacturing viewpoint of tool designer. The research methods included standards, instructions and knowledge of company personnel. Result of this thesis was a description of sheet metal tools and their design principles. These principles can be used when making someone familiar for tool design of aircraft industry.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ ABSTRACT

1 JOHDANTO	6
2 PATRICOMP OY	6
3 OHUTLEVYJEN MATERIAALIT JA MUOVAUSMENETELMÄT	7
3.1 Alumiiniseosten materiaalitieto.....	7
3.2 Ohutlevyjen kemiallinen työstö.....	12
3.3 Ohutlevyosien muovausmenetelmät.....	13
3.3.1 Muovaaminen pyörästykoneella.....	13
3.3.2 Muovaaminen särmäyskoneella.....	14
3.3.3 Venytysmuovaaminen.....	15
3.3.4 Muovaaminen kumikalvopuristimella.....	16
3.3.5 Muut muovausmenetelmät.....	17
4 OHUTLEVYJEN TAIUTTAMISEN TEORIAA	17
4.1 Neutraalipinta.....	17
4.2 Levyn oikaistu pituus.....	19
4.3 Levyn ohenema.....	22
4.4 Takaisinjousto	23
5 TYÖVÄLINESUUNNITTELUN KEHITTÄMINEN	25
5.1 Tuotteiden ja työvälineiden tasoonlevitys CAD-ohjelmalla.....	25
5.2 Vahanleikkausmallineen suunnittelu.....	26
5.3 Trimmaustyövälineen suunnittelu.....	28
5.4 Kumikalvopuristinlestin suunnittelu.....	32
5.5 Venytysmuovauslestin suunnittelu.....	36
5.6 Tarkastusmallineen suunnittelu.....	38
5.7 Muut työvälineet.....	39
5.8 Kiinnityskorvakkeet.....	39
6 YHTEENVETO	41
LÄHTEET	42
LIITTEET	

- 1 Syövytysvarat
- 2 Kaavio taivutusvaralle
- 3 Lestin ennakot
- 4 Takaisinjoustoarvot
- 5 Uroslestin korkeus
- 6 Levyn taivutussäteet
- 7 Sallitut muovausmenetelmät
- 8 Laipoitetut kevennysreiät
- 9 Työvälineiden ja tuotteiden esimerkkikuvia

LYHENTEET

BA	Taivutusvara
E	Kimmokerroin
e	Murtovenymä
G	Liukkerroin
h	Neutraalikerroksen etäisyys levyn alapinnalta
K	Neutraaliakselin sijainnin korjauskerroin
k	Neutraaliakselin sijainnin korjauskerroin v -tekijän laskennassa, takaisinjoustoprojektio
L	Lestin lisäennakko
R	Taivutussäde
R_e	Myötölujuus
$R_{e0,2\%}$	Myötölujuus ”0,2-raja”
R_{k1}	Keskisäde ennen takaisinjoustoprojektioa
R_m	Murtolujuus
R_s	Sisätaivutussäde
R_{s2}	Sisäpuolinen taivutussäde takaisinjoustoprojektion jälkeen
R_u	Ulkotaivutussäde
SB	Lestin takaisinjoustoprojektioennakko
T	Levyn paksuus
v	Tasausarvo
α	Kylkikulma
β	Taivutuskulma
β_1	Taivutuskulma ennen takaisinjoustoprojektioa
β_2	Taivutuskulma takaisinjoustoprojektion jälkeen
ρ	Tiheys
MHA	Käsijyrsinmalline
MSK	Vahanleikkausmalline
TKU	Tarkastusmalline

1 JOHDANTO

Tutkintotyön tavoitteena on löytää Patricompin tuotteisiin ja tuotantokoneisiin sopivat työvälinesuunnittelun menetelmät lentokoneiden ohutlevyrakenteiden valmistukseen. Tavoitteena on myös saattaa yksien kansien sisälle tärkeimmät työvälinesuunnittelun taulukot ja menetelmät, jolloin työtä voi käyttää myös suunnittelijan jokapäiväisessä työssä ja työntekijän tutustuttamisessa työvälinesuunnitteluun. Työ on tehty erityisesti erään asiakkaan projektia varten, mutta toimintatavat ovat työvälinesuunnittelun kannalta hyvin samanlaiset asiakkaasta ja projektista riippumatta.

Suunnittelumenetelmien löytämisessä tausta-aineistona on ollut ohutlevyjen muovauksen yleiset ohjeet sekä lentokoneiden osiin liittyvät standardit ja erityisvaatimukset.

Työ on rajattu koskemaan tavallisimpien työvälineiden suunnittelua ja myös itse tuotteen valmistuksen suunnittelua niiltä osin, joissa ratkaisut vaikuttavat työvälineisiin. Työssä käsitellään tuotteiden valmistusta vain siihen asti, johon vaaditaan työvälinesuunnittelua, esimerkiksi tuotteiden pintakäsittelyä ei käsitellä lainkaan. Tuotteiden materiaaleja on kuvailtu laajahkosti ja valmistustapahtumia lyhyesti, koska nämä ovat suunnittelun ymmärtämisen kannalta välttämättömiä ja koko työvälinesuunnittelun lähtökohtana on tuotteen valmistaminen. Suunnittelun kannalta erittäin tärkeä asia on ohutlevyjen taivuttamisen teoria, joten siitä on esitelty tarvittavat perusteet.

2 PATRICOMP OY

Patricomp Oy on alkuvuodesta 2006 perustettu ohutlevytuotteisiin erikoistunut yritys. Ohutlevytuotteiden valmistus tapahtui aiemmin Patria Aerostructures Oy:ssä, mutta helmikuussa 2006 se myi koko ohutlevy- ja pintakäsittelyosaston työntekijöineen vastaperustetulle Patricomp Oy:lle /18; 26/. Patricomp Oy:n pääomistajana on KMM-Invest. Patria Aerostructures omistaa osakkeista 20 %.

/26./

Patricomp Oy sijaitsee Jämsän Hallissa samalla alueella Patria-konsernin lentoteollisuusliiketoimintojen kanssa. Yritys valmistaa alumiinisia ja teräksisiä ohutlevytuotteita erityisesti lentokoneiteollisuuden tarpeisiin. Yrityksen nuoresta iästä huolimatta sen juuret lentokoneenrakennuksessa ulottuvat vuoteen 1921, aluksi osana Valmet Oy -konsernia ja myöhemmin osana Patria Oy -konsernia. /26./

Levyosaston tuotantotilat ovat pinta-alaltaan 2000 m². Osasto vastaa materiaalin varastoinnista, aihoiden valmistuksesta, muotoilusta ja lämpökäsittelystä. Osastolla on levyaihioiden jrsintään ja työvälineiden valmistukseen CNC-poraus ja -jrsinkone ja kolme CNC-työstökeskusta, aihoiden muovaukseen muun muassa kumikalvopuristin, venytysmuovauskone, pyöristyskone, särmäyskone ja listanvetokone sekä tuotteiden lämpökäsittelyyn lämpökäsittelyuuneja. /18./

Pintakäsittelyosasto on pinta-alaltaan 1500 m² ja sen tehtävänä on osien anodisointi, kromatointi, kemiallinen työstö, särötarkastus ja maalaus. /18./ Koko yrityksessä oli loppukesästä 2007 työntekijöitä 24 ja toimihenkilöitä 8.

Patricompin työvälinesuunnitteluun liittyvinä ohjelmistoina ovat CATIA V5, SolidWorks, AutoCAD, PowerMill ja SURFCAM. Näistä ohjelmistoista PowerMill on käytössä 3- ja 5-akselisen koneistuksen ohjelmoinnissa erityisesti lestien koneistukseen ja SURFCAM 2-akselisessa ohjelmoinnissa levyaihioiden tekemiseen.

3 OHUTLEVYJEN MATERIAALIT JA MUOVAUSMENETELMÄT

3.1 Alumiiniseosten materiaalitietoa

Lentokoneenrakennuksessa käytetään erityisen paljon 2000-sarjan alumiini-kupari -seoksia eli duralumiineja. Duralumiinien seostusaineina on yleisesti kuparin (1,8...6,8 %) lisäksi magnesiumia (0...2 %), piitä (0,15...0,9 %) ja mangaania (0...1,2 %). Monet 2000-sarjan duralumiinit ovat luonnollisesti vanhenevia, mikä tarkoittaa erkaumien syntymistä jo huoneenlämpötilassa. 2000-sarjan alumiiniseokset ovat erittäin lujia, mutta huonona puolena on huono korroosionkesto. 2000-sarjan alumiineja lujempia ja korroosionkestävämpiä ovat 7000-sarjan alumiinit, joita käytetään myös paljon lentokoneenrakennuksessa.

7000-sarjassa seosaineena on sinkki ja lähes aina myös magnesium (0...3,7 %). /5;
8./ Tässä esitellään lähinnä seosten EN AW-2024 ja EN AW-7075 ominaisuuksia,
koska nämä seokset ovat kaikkein yleisimpiä lentokoneiden rakenteiden
materiaaleina. Suppeammin esiteltyä seoksena on EN AW-6082, joka on
työvälineiden valmistuksessa paljon käytetty seos.

Lämpökäsittelyllä voidaan vaikuttaa alumiiniseosten mekaanisiin ominaisuuksiin.
Tavalliset lämpökäsittelyt ovat pehmeäsihekkutus, erkautuskarkaisu,
jännityksenpoistohekkutus ja homogenisointi. /5, s. 172./

Pehmeäsihekkutuksessa alumiiniseoksen lämpötila nostetaan 300...400-asteeseen,
jolloin saavutetaan pienin mahdollinen lujuus /5, s. 172; 7, s. 8/.

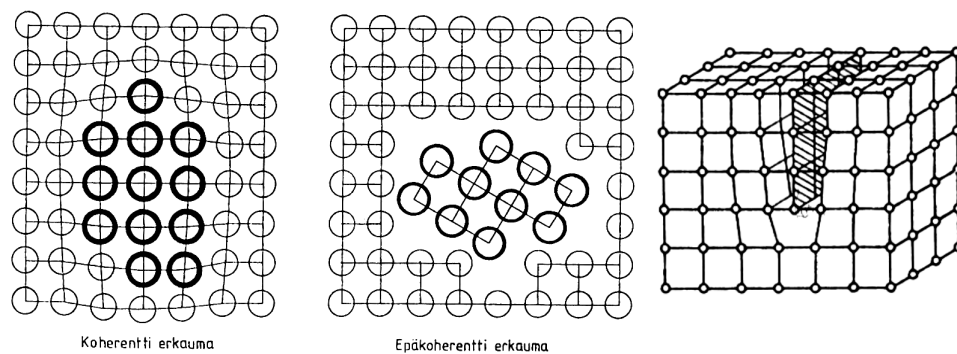
Pehmeäsihekkutetun materiaalin muovattavuus on erittäin hyvä.

Pehmeäsihekkutettu tila on kestävä, mutta kuukausien varastoinnin jälkeen
materiaalin muovattavuus on saattanut hieman heiketä. /9./

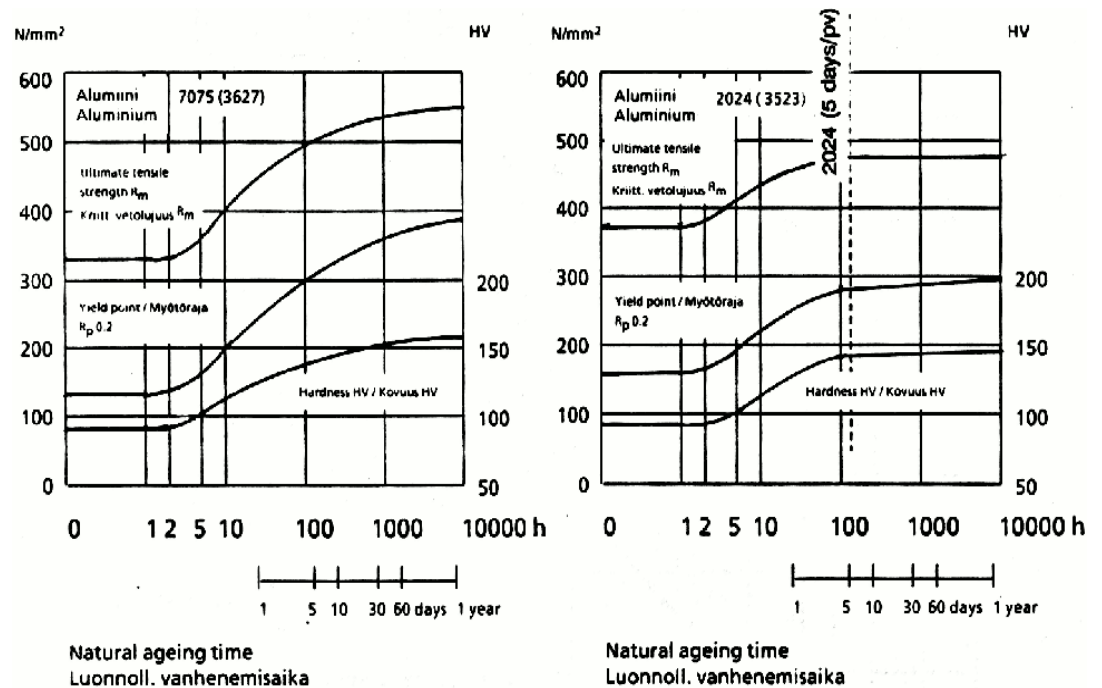
Erkautuskarkaisuun kuuluu liotushekkutus, sammuttaminen ja erkautushekkutus.
Liotushekkutuksessa alumiiniseoksen lämpötila on noin 500 °C, jolloin seosaine
liukenee perusmetalliin. Välittömästi sammutuksen jälkeen materiaalilla on
suunnilleen yhtä hyvä muovattavuus kuin pehmeäsihekkutetulla materiaalilla,
mutta tämä tila ei ole kestävä. Suuret muovaukset pitää suorittaa tässä tilassa, koska
jännityksien hallitseminen on helpompaa kuin pehmeäsihekkutetulla materiaalilla.
Kylmävarastoinnilla voidaan liotushekkutuksen pehmeää tilaa pidentää, ja alle
-40 °C lämpötilassa säilytetty materiaali pysyykin pehmeässä tilassa
rajoittamattoman ajan. Materiaali on muovattava kahden tunnin kuluessa
liotushekkutuksen sammutusvaiheesta tai siitä kun se on otettu pois
kylmävarastosta. /9./

Erkautuskarkaisussa liotushekkutuksen, sammutuksen ja mahdollisen
muovauksen jälkeen materiaali erkautushekkutetaan. Erkautushekkutus voi olla
normaalissa huoneenlämpötilassa tapahtuva luonnollinen vanheneminen tai
korkeassa lämpötilassa tehty keinovanhennus. Erkautushekkutuksessa seosaineen
atomit asettuvat perusmetallin atomien hilaan niiden atomipaikoille. Koska

seosaineen atomit ovat erikokoisia kuin perusaineen atomit, hilakenttä vääristyy. Hilakentän vääristymää kutsutaan koherentiksi erkaumaksi (kuva 1 vasemmalla), ja sen lujittava vaikutus perustuu dislokaatioiden (kuva 1 oikealla) liikkeiden vaikeutumiseen. Jos seosaineen atomien muodostama hilakenttä on leikkautunut irti perusmetallin hilakentästä (kuva 1 keskellä), syntyy tavallinen raeraja, joka ei juurikaan lisää materiaalin lujuutta. /5, s. 166–168./ Karkaistussa tilassa materiaalin muovattavuus on heikkoa ja sallittua lähinnä 2024-tyypin alumiinille vähäisessä määrin /9/. Kuva 2 esittää 2024- ja 7075-seosten lujuuden ja kovuuden muuttumista luonnollisessa vanhenemisessa.



Kuva 1 Koherentti- ja epäkoherentti erkauma, sekä särmädislokaatio /5/



Kuva 2 Erkautushehikutuksen vaikutus lujuuteen ja kovuuteen ajan suhteen seoksilla EN AW-7075 ja EN AW-2024 /9/

Alumiiniseoksen lämpökäsittelytilaa kuvataan toimitustilamerkinnällä. Toimitustilamerkintä tulee seoksen nimekkeen jälkeen ja erotetaan siitä väliviivalla. Toimitustilamerkintään kuuluu päätunnuksena kirjain (taulukko 1) ja tarvittaessa alaluokitusta varten numeroita (taulukko 2). /7./ Päätunnuksista yleisimmät ovat pehmeäsihekkutettu O-tila ja erkautuskarkaistu T-tila.

Taulukko 1 Toimitustilamerkintöjen päätunnuksien merkityksiä /7/

Päätunnus	Tilan nimitys	Merkitys
F	Valmistustila	Muodonantoprosessin tuotteet, joiden valmistuksessa ei ole käytetty lämpötilanvalvontaa tai joita ei ole muokkauslujitettu.
O	Hehkutettu	Hehkutettu pienimmän lujuuden omaavan tilan saattamiseksi.
H	Muokkauslujitettu	Tuotteita on kylmämuokattu hehkutuksen jälkeen tai kylmämuokattu ja osittain hehkutettu tai stabiloitu vaadittujen mekaanisten ominaisuuksien saavuttamiseksi.
W	Liotushehkutettu	Epästabiili tila, jota käytetään seoksille, jotka vanhenevat itsestään huoneenlämpötilassa liotushehkutuksen jälkeen.
T	Lämpökäsitelty muuhun stabiiliin tilaan kuin F, O tai H	Lämpökäsitelty ilman muokkauslujitusta tai samalla muokkauslujitusta stabiilien tilojen saavuttamiseksi.

Taulukko 2 T-tilan lisämerkkien merkityksiä. /7/

Alaluokitus	Tilan nimitys	Merkitys
T3	Liutushehkutettu, kylmämuokattu ja luonnollisesti vanhennettu olennaisesti stabiiliin tilaan.	Tuotteita on kylmämuokattu lujuuden parantamiseksi liutushehkutuksen jälkeen, tai tuotteen oikaisussa tapahtuneen kylmämuokkauksen vaikutus voidaan havaita mekaanisissa ominaisuuksissa.
T3511	Liutushehkutettu ja jännityksenpoistokäsitelty venyttämällä tietty määrä ja luonnollisesti vanhennettu. Pienet oikaisut ovat sallittuja venytyksen jälkeen.	Tuotetta (tanko, profiili tai putki) on venytetty tietty määrä liutushehkutuksen jälkeen.
T42	Liutushehkutettu ja luonnollisesti vanhennettu.	Tuote on lämpökäsitelty hehkutetusta tilasta tai tilasta F, tai käyttäjä on lämpökäsitellyt tuotteen mistä tahansa tilasta. Luonnollisesti vanhennettu.
T6	Liutushehkutettu ja keinovanhennettu.	Tuotetta ei ole kylmämuokattu liutushehkutuksen jälkeen tai oikaisussa tapahtuneen kylmämuokkauksen vaikutusta ei voi havaita mekaanisissa ominaisuuksissa.
T62	Liutushehkutettu ja keinovanhennettu.	Tuote on lämpökäsitelty hehkutetusta tilasta tai tilasta F, tai käyttäjä on lämpökäsitellyt tuotteen mistä tahansa tilasta. Keinovanhennettu.
T73511	Liutushehkutettu ja jännityksenpoistokäsitelty venyttämällä ja keinotekoisesti ylivanhennettu. Pienet oikaisut sallittuja venytyksen jälkeen.	Tuotetta on venytetty tietty määrä liutushehkutuksen jälkeen ja ylivanhennettu parhaan jännityskorroosionkestävyyden saavuttamiseksi.

EN AW-2024:n, EN AW-7075:n sekä EN AW-6082:n toimitustilojen mukaisia mekaanisia ominaisuuksia on kerätty taulukkoon 3. Taulukosta 3 ja kuvasta 2 havaitaan miten suuri vaikutus erkautuskarkaisulla on materiaalin lujuuteen.

Taulukko 3 Alumiiniseosten toimitustilojen mukaisia tyypillisiä mekaanisia ominaisuuksia huoneenlämpötilassa /23; 24/

Materiaali ja toimitustila	R_m MPa	$R_{p0,2}$ MPa	e %	E GPa	G GPa	Kovuus HB	ρ kg/m³
2024-O	186	76	20	73		47	2780
2024-T3	483	345	18	73	28	120	2780
2024-T351	469	324	20	73	28	120	2780
2024-T42	≥425	≥260			28	≥119	2780
7075-O	228	103	17	72		60	2810
7075-T6	572	503	11	72	27	150	2810
6082-T6	284	245	9	70		90	2700

Levymateriaalit voivat olla silattuja tai silaamattomia. Silatussa levyssä korroosionkestävyyttä parannetaan valsaamalla ohut kerros puhdasta alumiinia levyn pintaan /5, s. 169/. Taulukossa 4 on kahdelle seokselle (EN AW-2024 ja EN AW-7075) määrittely, joista ilmenee valmistustapa ja mahdollinen silaus.

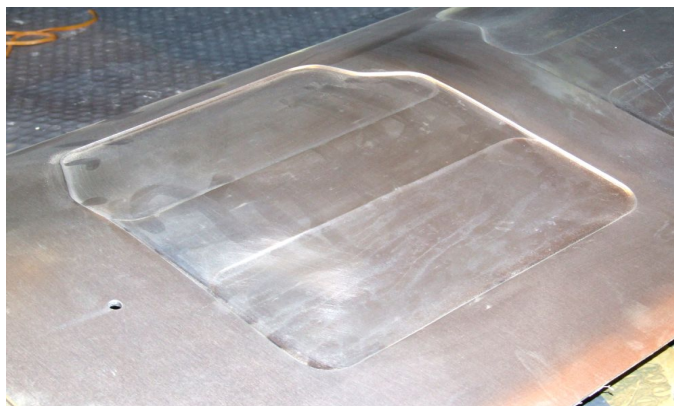
Taulukko 4 SAE Aerospace Material Specifications:n mukaisia materiaalin merkintöjä /24/

Materiaali	Merkintä	Merkitys
2024	AMS-QQ-A-250/4	Silaamattomat levyt ja laatat
2024	AMS-QQ-A-250/5	Silatut levyt ja laatat
2024	AMS-QQ-A-200/3	Pursotetut tuotteet
7075	AMS-QQ-A-250/12, 24	Silaamattomat levyt ja laatat
7075	AMS-QQ-A-250/13,25	Silatut levyt ja laatat
7075	AMS-QQ-A-200/11,15	Pursotetut tuotteet

3.2 Ohutlevyjen kemiallinen työstö

Lentokoneteollisuudessa pyritään luonnollisesti keveisiin rakenteisiin ja monia osia kevennetään ohentamalla levyä tietyistä kohdista syövyttämällä sitä kemiallisessa liuoksessa. Ennen kemiallista työstöä ohutlevyn päälle levitetään noin 0,5...1 mm:n paksuinen suojalakkakerros. Vahakerroksen kuivuttua siihen leikataan

kevennysaukkojen muotoiset ääriviivat ja vaha poistetaan syövyttävältä kohdalta. Syövytysaltaassa natriumhydroksidiliuos syövyttää alumiinia niiltä alueilta, joissa ei ole suojaavaa vahakerrosta. Samassa kappaleessa ja jopa samassa kevennysaukossa voi olla useita erisyvyisiä syövytyskerroksia (kuva 3). Tällaisessa osassa kemiallinen työstö aloitetaan syvimmän portaan kohdalta ja sen ohentuessa riittävästi leikataan vaha pois seuraavaksi syvimmän portaan kohdalta. Syövytettäville osille vaaditaan työvälineeksi vahanleikkausmalline.



Kuva 3 Kaksiportainen kemiallisesti työstetty kevennys

3.3 Ohutlevyosien muovausmenetelmät

3.3.1 Muovaaminen pyörästyskoneella

Pyöristäminen on yleinen tapa ohutlevyosien muovaamiseen.

Lentokoneteollisuudessa peräsinten ja siipien uloimmat levyt ovat usein sellaisia muotoja, joita voi tehdä pyöristämällä. Kuva 4 esittää hydraulista kolmitelaista levynpyörästyskonetta.



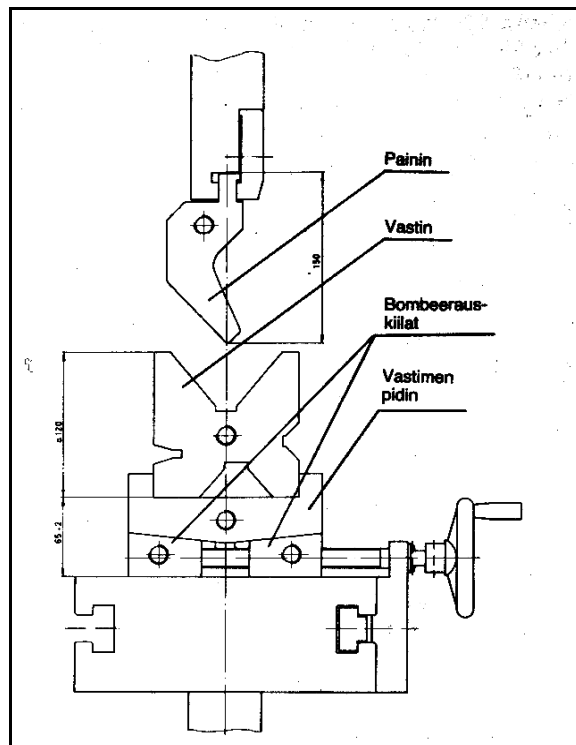
Kuva 4 Pyöristyskone

Pyöristyskoneen telojen keskinäistä paikkaa siirtämällä voidaan tehdä lieriö- ja kartiopintoja. Pyöristämisessä vaaditaan työvälineeksi yleensä tarkastusmalline, johon pyöristettävää tuotetta voidaan verrata.

3.3.2 Muovaaminen särmäyskoneella

Särmääminen on nopea ja monipuolinen tapa muovata levyosia.

Särmäyspuristimessa taivutuksesta vastaavat painin ja vastin (kuva 5), joiden muotoja muuttamalla saadaan tehtyä erilaisia taivutuksia. Yksinkertaisissa osissa särmääminen ei vaadi työvälineitä, mutta monimutkaisemmissa tarvitaan tarkastusmalline, johon muotoa voidaan verrata. Särmäyskoneen harvinaisempia työvälineitä ovat särmäysmuotti, jolloin painimen ja vastimen tilalla ovat muotinpuoliskot.



Kuva 5 Särmäyspuristimen taivutustyökalut /3, s. 19/

3.3.3 Venytysmuovaaminen

Venytysmuovauskoneella voidaan valmistaa ohutlevyosia, joiden muoto on hankala valmistaa muilla menetelmillä. Lentokoneenrakennuksessa tyypillisin venytysmuovausosa on siipien, sivuvakainten ja korkeusvakainten etureuna. Venytysmuovauksessa koneen leuat pitävät levyaihion reunoista kiinni, ja lestiä nostetaan ohutlevyä vasten, jolloin ohutlevy muotoutuu lestin mukaiseksi (kuva 6). Venymisen takia ohutlevyssä tapahtuu ohenemista.



Kuva 6 Teräslevyä muovataan venytysmuovauskoneessa

Patricompissa on venytysmuovauskone Pinchart-Deny, johon suurin mahtuva levykoko on 3000 x 3000 mm. Lestiä ylöspäin nostava voima on suurimmillaan 240 t, ja leukojen sivulle päin vetävä voima 80 t. /18./

3.3.4 Muovaaminen kumikalvopuristimella

Kumikalvopuristimessa levyä muovaavana materiaalina on kumi, jota painetaan lestiä vasten nestepaineella. Kumikalvopuristaminen ei vaadi kuin yhden lestin kumikalvon muodostaessa tavallaan lestin toisen puolikkaan (kuva 7).



Kuva 7 Kumikalvopuristimen toimintaperiaate /21/

Patricompissa on kumikalvopuristin Asea Quintus. Koneen pöydän koko (suurin lestikoko) on 900 x 3000 mm ja suurin työpaine 1000 bar. Kappaleen suurin korkeus on 190 mm. /18./

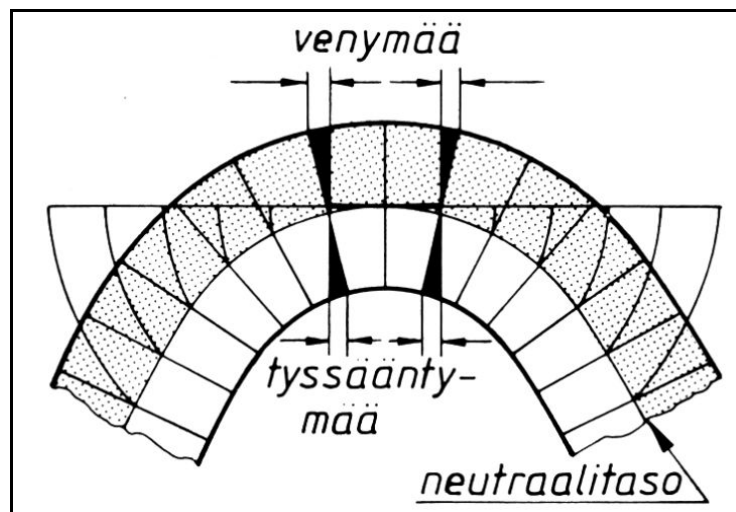
3.3.5 Muut muovausmenetelmät

Muita muovausmenetelmiä ja -koneita ovat esimerkiksi levynkulmauskone, listojenpyörityskoneet ja puristusmuotit. Lentokoneteollisuudessa erityisesti olastusten tekeminen on usein tehtävä varta vasten suunnitelluilla työvälineillä tai koneilla.

4 OHUTLEVYJEN TAIVUTTAMISEN TEORIAA

4.1 Neutraalipinta

Neutraalipinnaksi, neutraalikerrokseksi tai poikkileikkauksessa neutraaliakseliksi kutsutaan taivutettavan levyn ylä- ja alapinnan välillä olevaa kuvitteellista pintaa, joka taivutettaessa ei veny eikä kutistu (kuva 8). Neutraalipinta on rajalla, missä vetojännitys muuttuu puristusjännitykseksi. Levyn paksuuteen nähden suurilla taivutussäteillä neutraalipinta sijaitsee levyn keskellä, mutta pienemmillä taivutussäteillä neutraalipinta siirtyy lähemmäksi pyöristyksen sisäpintaa /14, s. 25/.



Kuva 8 Levyn neutraalipinnan sijainti taivutuksessa /4, s. 57/

Neutraalipinnan sijainnin määrittävää termiä kutsutaan K-kertoimeksi.

Neutraalipinnan etäisyys levyn alapinnasta saadaan kaavalla

$$h = T \cdot K \quad (1) /22/$$

missä

h on neutraalipinnan etäisyys alapinnasta,

T on levyn paksuus ja

K on K -kerroin.

K -kertoimen laskentaan on eri tapoja, mutta yksittäistä kaikkiin tapauksiin sopivaa sääntöä ei ole olemassa /14 s. 29/. CATIA V5:n Generative Sheet Metal Design -moduuli tarjoaa K -kertoimen arviointiin yhtälöä

$$K = \frac{\lg\left[\min\left(100, \frac{\max(20R, T)}{T}\right)\right]}{2\lg(100)}, \quad (2) /22/$$

missä

R on levyn taivutussäde ja

T on levyn paksuus.

Ilmeisesti jostain tietoteknisestä syystä yhtälön (2) jakajana oleva vakio 4 ilmoitetaan logaritmikaavana.

Yleisesti käytetään myös sellaista k -kerrointa, joka ilmoittaa neutraalipinnan sijainnin paikkaan $\frac{1}{2}T$ eli levyn paksuuden puoliväliin

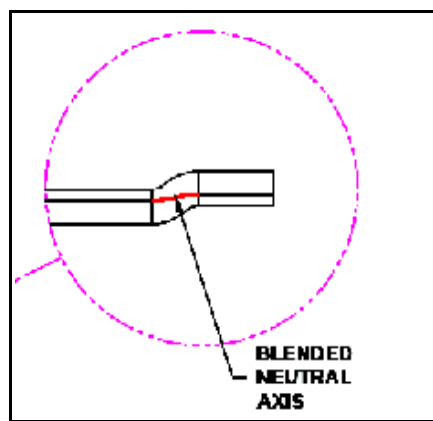
$$\begin{cases} k = 1, & \text{kun } R/T > 5 \\ k = 0,65 + 0,5 \lg(R/T), & \text{kun } R/T \leq 5 \end{cases} \quad (3) /14, \text{ s. 28/}$$

Yhtälöt (2) ja (3) ovat johdettavissa toisistaan ja näiden suhteeksi saakin laskettua $k \approx 2K$ tai $k \approx K \approx 0$.

Yksinkertaisempi tapa arvioida neutraalipinnan paikkaa levyn alapinnasta ovat yhtälöt

$$\begin{cases} h = 0 & , \text{ kun } 0,5 \text{ mm} \leq T \leq 1 \text{ mm} \text{ ja } T \leq R \leq 2T \\ h = \frac{1}{3}T & , \text{ kun } R < 5T \\ h = \frac{1}{2}T & , \text{ kun } R \geq 5T \end{cases} \quad . (4) /4, \text{ s. } 58/$$

Erikoistilanteena on vielä lentokoneenrakenteissa yleinen olastus, jossa neutraaliakseli käyttäytyy hieman toisin kuin yksittäisessä taivutuksessa (kuva 9).



Kuva 9 Neutraaliakseli olastuksessa /20/

4.2 Levyn oikaistu pituus

Levyn oikaistu pituus voidaan saada käyttämällä mallinnusohjelman levynoikaisutoimintoa, laskea tässä esiteltyjen yhtälöiden avulla tai käyttämällä valmiiksi laskettuja taulukoita. Mallinnusohjelmien levynoikaisut eivät toimi läheskään kaikille kappaleille, joten pelkästään niiden varaan ei voi suunnittelussa jättäytyä.

Levyn oikaistua pituutta laskettaessa käytetään yleisesti kahta erilaista laskentatapaa. Molemmat perustuvat samaan asiaan ja antavatkin saman tuloksen, mutta eroja on lähtöarvoissa. Molemmissa käytetään k-kertoimia ja laippojen pituuksia, mutta koska ne tarkoittavat hieman eri asioita, on erittäin suuri sekaannuksen vaara olemassa.

Tapa 1

Taivutusvaraksi kutsuttu termi BA (bend allowance) saadaan yhtälöllä

$$BA = \pi(R + KT) \frac{\beta}{180^\circ} , \quad (5) /16, s. 26/$$

missä

R on sisätaivutussäde,

T on levyn paksuus,

β on taivutuskulma asteina (kuva 10) ja

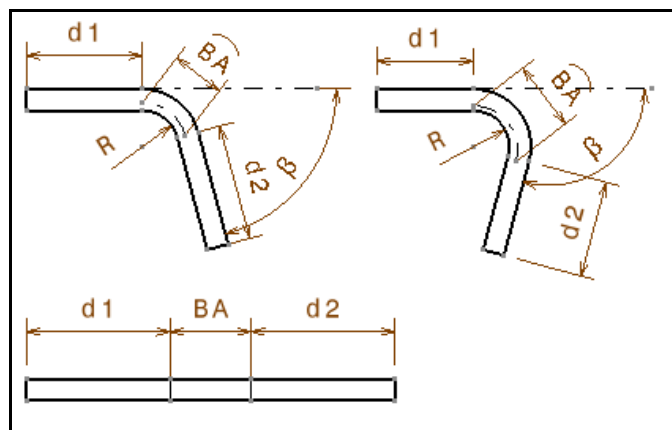
K on K-kerroin, joka saadaan yhtälöstä (2).

Yhtälön (5) laskema taivutusvara on siis neutraaliakselin pituus taivutuskohdassa. Vastaava taivutusvara saadaan liitteen 2 kaaviosta, mutta siinä käytetyn erilaisen kertoimen takia kaavion antama tulos pitää kertoa kahdella. Oikaistu pituus L saadaan lisäämällä yhtälön (5) tulokseen laippojen pituudet

$$L = d_1 + d_2 + BA , \quad (6) /16, s. 26/$$

missä

d_1 ja d_2 ovat laippojen pituudet pyöristykseen reunaan (kuva 10).



Kuva 10 Aihion oikaistun pituuden laskennan lähtöarvot d_1 , d_2 , R ja β , sekä oikaistun kappaleen vastaavien osien sijainnit

Tapa 2

Toinen tapa määrittää oikaistu pituus on laskea tasausarvo v , joka saadaan yhtälöistä

$$\begin{cases} v = \pi \left(\frac{180^\circ - \alpha}{180^\circ} \right) \left(R + \frac{T}{2} k \right) - 2(R + T), \text{ kun } 0^\circ < \alpha \leq 90^\circ \\ v = \pi \left(\frac{180^\circ - \alpha}{180^\circ} \right) \left(R + \frac{T}{2} k \right) - 2(R + T) \tan\left(\frac{180^\circ - \alpha}{2}\right), \text{ (7) /3, s. 5/} \\ v = 0, \text{ kun } 165^\circ < \alpha \leq 180^\circ \end{cases}$$

missä

α on kylkikulma (kuva 11) ja

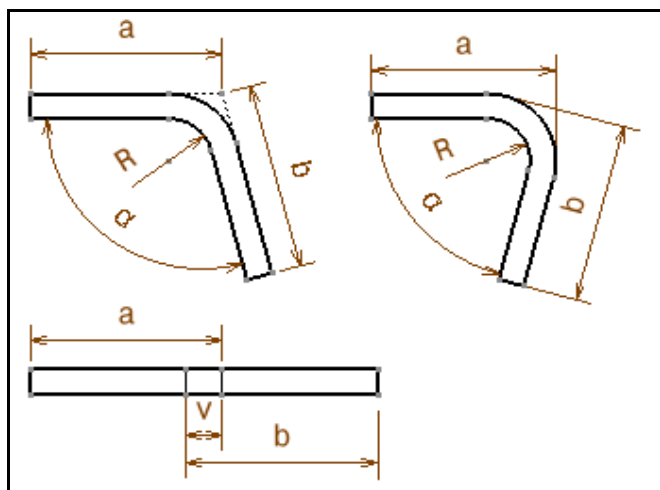
k on k-kerroin, joka ilmoittaa neutraalikerroksen sijainnin levyn paksuuden puoliväliin. Tässä käytettävä k-kerroin saadaan yhtälöstä (3) tai kertomalla yhtälöstä (2) saatu K-kerroin kahdella.

Negatiivisena lukuna tasausarvo v lyhentää ja positiivisena pidentää levyn pituutta. Oikaistu pituus L saadaan yhtälöllä

$$L = a + b + v, \quad (8) /3, \text{ s. 14/}$$

missä

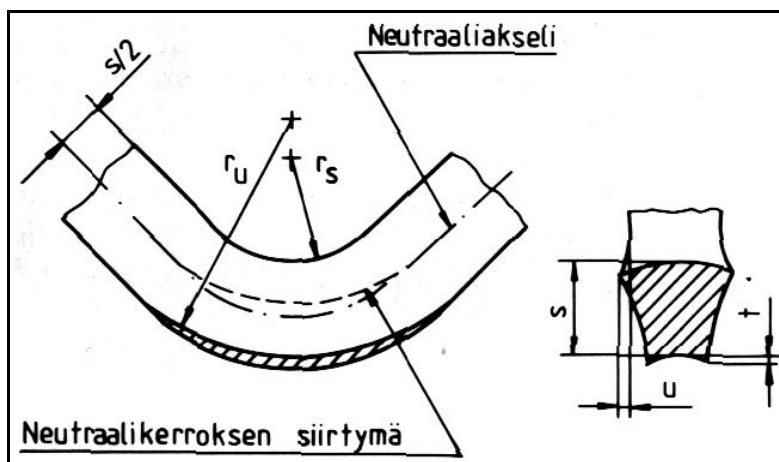
a ja b ovat laippojen pituudet kuvitteelliseen särmään (kuva 11).



Kuva 11 Levyn oikaisun lähtöarvot a , b ja α , sekä oikaistun levyn vastaavien osien paikat, kun laskentaan käytetään tasausarvoa v

4.3 Levyn ohenema

Taivutuksessa levy ohenee, koska neutraalikerros siirtyy sisäreunaan päin, ja levyn ulkosäde ei ole aivan levyn sisäsäteen ja levyn paksuuden summa (kuva 12).



Kuva 12 Levyn oheneminen taivutuksessa /3/

Levyn oheneminen taivutuksessa on noin 10...20 % /4, s. 57/, ja taivutuksen ulkosäde R_u noudattaa likimain yhtälöä

$$R_u = 1,25 R_s + T \quad , \quad (9) /3, s. 13/$$

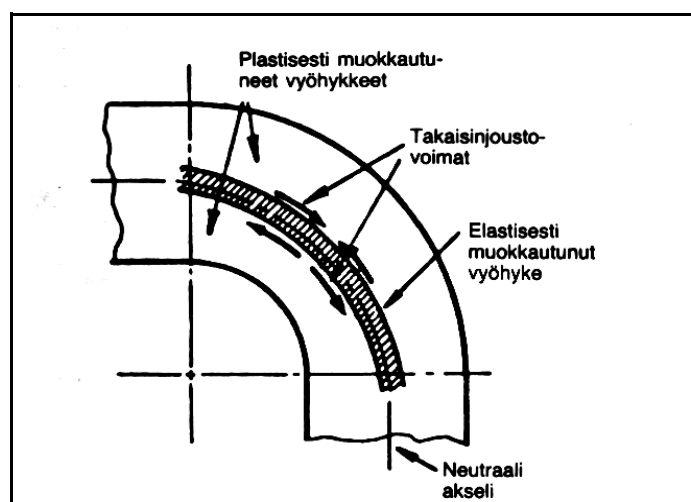
missä

R_s on levyn sisäsäde (taivutussäde) ja

T on levyn paksuus.

4.4 Takaisinjousto

Taivutettaessa levyn ylä- ja alapintojen jännitykset ylittävät materiaalin myötörajan, mutta neutraalipinnan ympärille muodostuu vyöhyke, jossa tapahtuu vain elastista muodonmuutosta. Taivutuksen jälkeen elastisen vyöhykkeen jännitykset pyrkivät palauttamaan levyn takaisin alkuperäiseen muotoonsa, mutta tätä voimaa vastustavat ylä- ja alapinnan plastisesti muovautuneet vyöhykkeet (kuva 13). Sisäinen voimatasapaino saavutetaan, kun muoto on päässyt palautumaan hieman takaisinpäin. Tätä palautumista kutsutaan takaisinjoustoksi. /3, s. 14./



Kuva 13 Takaisinjouston syntyminen /3, s. 14/

Takaisinjouston arvioimiseen ei ole mitään yleispätevää kaavaa, vaan yleisesti käytetään taulukoita (liitteet 3 ja 4) ja testausta. Takaisinjousto kasvaa materiaalin myötölujuuden kasvaessa, taivutussäteen ja levynpaksuuden välisen suhteen R/T kasvaessa ja kimmokertoimen pienentyessä /14, s. 25/. Lisäksi levyn valssaussuunta särmään nähden voi vaikuttaa huomattavasti takaisinjouston suuruuteen /1, s. 21/.

Takaisinjouston suuruus ilmoitetaan yleensä takaisinjoustokertoimella k

$$k = \frac{\beta_2}{\beta_1} , \quad (10) /3, s. 14/$$

missä

β_1 on taivutuskulma ennen takaisinjoustoja ja

β_2 on taivutuskulma takaisinjouston jälkeen.

Materiaalin murtolujuuteen perustuva takaisinjouston arviointiin sopiva yhtälö on

$$k = 1 - \frac{R_m}{E} \frac{2 R_{kl}}{T} , \quad (11) /1, s. 23/$$

missä

R_m on materiaalin murtolujuus,

E on materiaalin kimmokerroin,

R_{kl} on keskisäde ennen takaisinjoustoja ja

T on levyn paksuus.

Vastaava yhtälö materiaalin myötölujuuden mukaan on

$$k = 1 - 3 \frac{R_{kl}}{E} \frac{R_e}{T} , \quad (12) /1, s. 23/$$

missä

R_e on myötölujuus.

Sekä murto- että myötölujuutta käyttävä yhtälö on

$$k = 1 - \left[a \left(\frac{R_e + R_m}{2} \right) + b \left(\frac{R_e + R_m}{2} \right) \left(\frac{R_{s2}}{T} \right)^2 \right] , \quad (13) /1, s. 23/$$

missä

a on vakio 0,001 ,

b on vakio $15 \cdot 10^{-6}$ ja

R_{s2} on sisäsäde takaisinjouston jälkeen. Yhtälössä (13) R_e ja R_m pitää poikkeuksellisesti antaa yksikössä kp / mm^2 ($1 \text{ kp} = 9,80665 \text{ N} / 6/$).

Suurilla taivutussäteillä, kun $R/T \geq 10$, taivutuksen sisäsädettä ennen takaisinjoustoja voi arvioida yhtälöllä

$$R_{s1} = \frac{R_{s2}}{1 + 3 \frac{R_e R_{s2}}{E T}} \quad (14) /1, s. 23/$$

5 TYÖVÄLINESUUNNITTELUN KEHITTÄMINEN

5.1 Tuotteiden ja työvälineiden tasonlevitys CAD-ohjelmalla

Levyaihioiden oikeankokoista leikkausta varten taivutetut tuotteet on levitettävä eli oikaistava tasoon. Tasoon levittämisen joutuu tekemään niin tuoteaihioille kuin työvälineillekin.

Asiakkailta tulevia tuotteita ei ole yleensä mallinnettu ohutlevyinä, vaan tavallisina tilavuusmalleina, joihin on asetettu seinämävahvuus tai joista on boolean operaatioilla poistettu ylimääräinen tilavuus. Asiakkaan käyttämä mallinustapa on nähtävissä CATIAN piirrehistoriasta. CATIAN Generative Sheet Metal Design -moduuli tarjoaa tilavuusmallin levittämiseen työkalun, mutta tämän käyttäminen onnistuu lähinnä yksinkertaisissa särmättävissä osissa. Levitettävässä tilavuusmallissa pitää olla vähintään yksi tasomainen pinta ja selkeä taivutuskohta. Käytännön tuotteissa tasomaista pintaa ei välttämättä ole, ja taivutussäde voi olla muuttuva tai tuotteessa voi olla kaksoiskaarevia pintoja.

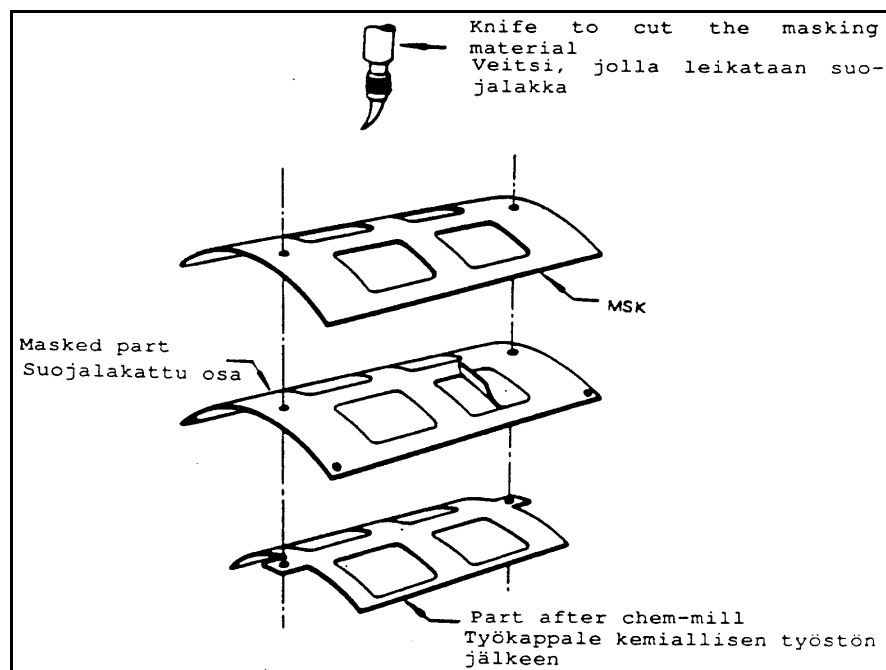
Jos ohutlevymoduulin käyttäminen ei toimi, on seuraava vaihtoehto käyttää pintamallinnustyökaluja. CATIAN Developed Shapes -moduulissa on toiminta, jolla myös kaksoiskaarevia pintoja voi levittää tiettyyn tasoon. Levitettävä pinta on kappaleen 4.1 mukaan arvioitu neutraalipinta, mutta tietyissä kappaleissa voidaan levitettäväksi pinnaksi ottaa joko kappaleen ulko- tai sisäpinta. Vaikka kappaleen ulkopintojen käyttäminen tuottaakin virhettä taivutukseen, voidaan tällä menettelyllä varmistaa se, että tuotteesta ei ainakaan tule liian pieni. Kaksoiskaarevilla pinnoilla pinnan levittäminen tasoon edellyttää aina pinta-alan muutosta. CATIAN pinnanlevitystyökalussa on mahdollista nähdä pinta-alan

prosentuaalinen muutos, mikä on hyödyllistä kun arvioidaan tuotteen käyttäytymistä muovauksessa. Erityisen ongelmallista on jos CATIAN antama tulos on suurempi kuin taulukon 3 murtovenymä *e*.

Monimutkaisemmissa muodoissa ei kokonaisen pinnan levittäminenkään toimi. Silloin mahdollisuudeksi jää levittää pinta osina tai piirtää levityskuva rautalankana, jolloin arvioidaan yksittäisten särmien pituudet ja suunnat.

5.2 Vahanleikkausmallineen suunnittelu

Ohutlevyosat, joita kevennetään kemiallisesti syövyttämällä, vaativat vahanleikkausmallineen eli MSK:n suojalakan leikkaamiseen (liite 9). MSK:lla myös tarkastetaan tuotteet kemiallisen työstön jälkeen /11/. Kuvassa 14 on esitetty MSK:n toimintaperiaate.



Kuva 14 Vahanleikkausmallineen toiminta /11/

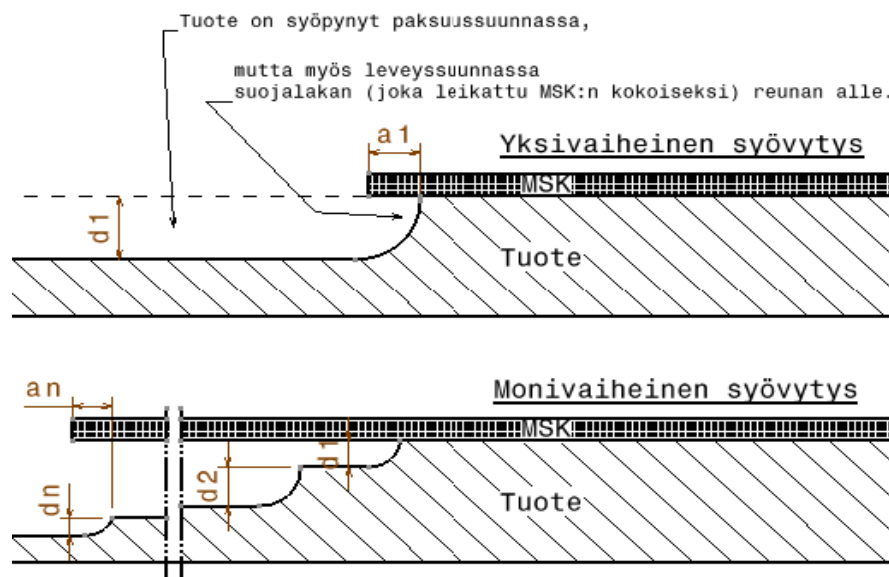
Vahanleikkausmalline on tuotteen aihion kokoinen taivutettu levy, johon on leikattu syövytysaukon tai -aukkojen kokoinen reikä (kuva 14). Lisäksi vahanleikkausmalline pitää saada kohdistettua aihioon tehdyistä työrei'istä (kuva 14). Jos syövytysaukko on niin iso, että se vaikeuttaa levyn taivutusta, täytyy

leikkausaukot tehdä vain osalle matkaa (kuva 15). Kuvan 15 esimerkissä vahanleikkausmallineella jää leikkaamatta vain suoria viivoja, joten ne on helppo yhdistää esimerkiksi taipuisan viivoittimen kanssa.



Kuva 15 Vahanleikkausmalline, jossa leikkausaukot on tehty vain osalle leikattavasta matkasta

Vahanleikkausmallineessa pitää ottaa huomioon, että levy syöpyy paitsi paksuussuunnassa, myös sivusuunnassa vahan reunan alle (kuva 16). Ei siis riitä, että vahaan leikataan täsmälleen tuotteen syövytysalueen kokoinen aukko, vaan aukon pitää olla hieman pienempi. Syövytysvarat $a_1 \dots a_n$ (kuva 16) saadaan liitteen 1 taulukosta.



Kuva 16 Tuotteen syöpyminen suojalakan reunan alle

MSK:n materiaalivalinta on suhteellisen vapaata ja tapauskohtaista. Materiaalin, tai ainakin leikkausreunan, pitää kuitenkin olla sellainen, että veitsi ei leikkaa MSK:ta. Koska tuotteet yleensä muovataan ennen MSK:n käyttöä, pitää MSK myös taivuttaa samanmuotoiseksi tai käyttää sellaista materiaalia, että MSK saadaan taivutettua leikkausvaiheessa riittävän tiiviisti tuotteen päälle. Usein helpointa on käyttää MSK:n muovaukseen samaa menetelmää ja työvälineitä kuin tuotteenkin muovaukseen, jolloin MSK:n materiaali on lähinnä alumiinilevyä. MSK:n levynpaksuus ei vaikuta oleellisesti leikkaamiseen. MSK:n painon, muovauksen ja käsittelyn takia paksuuden ei kuitenkaan ole yleensä syytä olla yli 3 mm.

Materiaalin tulee olla myös sellaista, että MSK:n takia ei tarvitse erikseen tehdä levyhankintoja. Hyvä valinta on EN AW-2024 tai EN AW-6082 noin 2 mm paksuisena.

5.3 Trimmaustyövälineen suunnittelu

Ohutlevyosan syövytysvaiheessa kappaleen pitää olla lopullista tuotetta suurempi, joten täytyy tuote leikata oikean kokoiseksi syövytyksen jälkeen. Syövytyksessä tuotteet ovat lähes aina muovattuja, joten tuotteiden trimmaaminen on hankalampaa kuin suoran levyn tapauksessa. Tärkein valittava asia on suoritetaanko tuotteen trimmaaminen CNC-koneella vai käsin. Lentokoneteollisuuden ohjeistuksen mukaan yleensä vain jyrsintökalut ovat sallittuja menetelmiä, joten esimerkiksi polttoleikkaus, laserleikkaus ja vesileikkaus ovat poissuljettuja vaihtoehtoja.

CNC-koneella tapahtuva leikkaaminen vaatii koneistuspitimen suunnittelun ja koneen ohjelmoinnin. Lyhyissä sarjoissa käsinleikkaaminen onkin usein kannattavampaa. CNC-jyrsintää voi käyttää pitkissä sarjoissa tai kun vaaditaan erityistä tarkkuutta tai jos trimmaustyövälineen muovaaminen on poikkeuksellisen hankalaa. Lähes poikkeuksetta tuotteiden muodon CNC-jyrsiminen ja reikien poraaminen vaatii 5-akselisen koneen.

Käsinjyrsinnässä pitää olla jonkinlainen malli tuotteen lopulliselle muodolle ja tässä on lähinnä kolme vaihtoehtoa: 1) luonnollisen kokoinen tuloste tuotteen ääri viivoista ja porattavista rei'istä, 2) tuotteen muotoinen ja kokoinen

käsijyrsinmalline ilman ohjausholkkia tapahtuvaan jyrsintään tai 3) tuotteen muotoinen, mutta hieman sitä pienempi käsijyrsinmalline ohjausholkin kanssa tapahtuvaan jyrsintään.

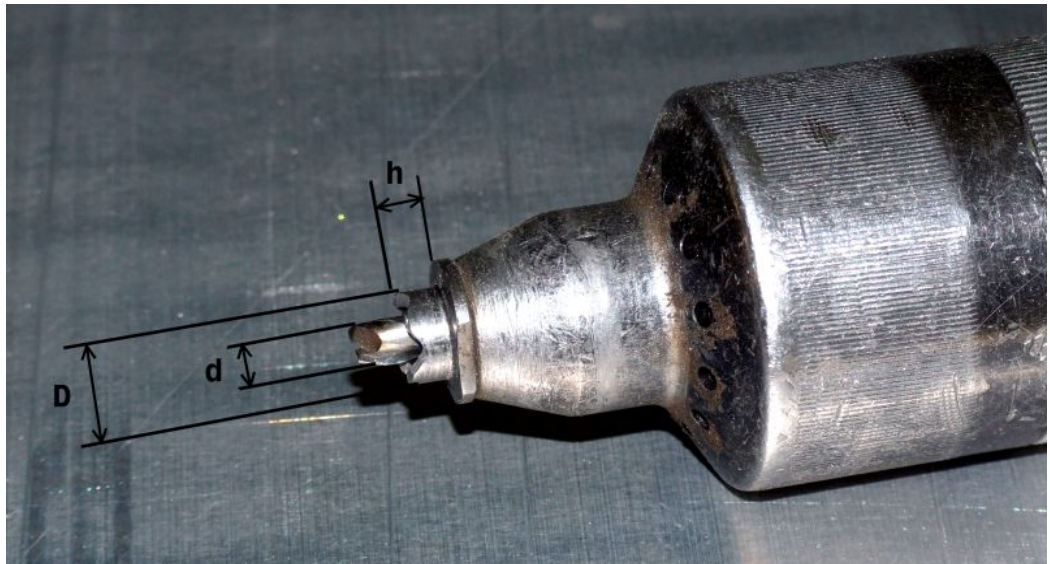
Tuotteen ääriviivojen ja reikien tulostaminen on mahdollista läpikuultavalle muovikalvolle, jolloin tulosteen paikoittaminen tuotteen päälle on helppoa. Käsijyrsintä tällaisen tulosteen kanssa on hankalaa ja tarkkuutta vaativaa työtä ja tämä menetelmä sopiikin lähinnä yksittäisiin tuotteisiin.

Tuotteen muotoinen käsijyrsinmalline eli MHA on huomattavasti käyttäjäystävällisempi. Koska MHA:ta käytetään yleensä muovatulle tuotteelle, tulee MHA:n olla myös muovattu. MHA:n muovaukseen käytetään yleensä särmäys- tai pyörästyskonetta ja samoja työvälineitä kuin tuotteen muovauksessa. Oikean paikoituksen takia siinä tulee olla myös kohdistusreiät vastaavissa paikoissa kuin muovatuissa tuotteissa.

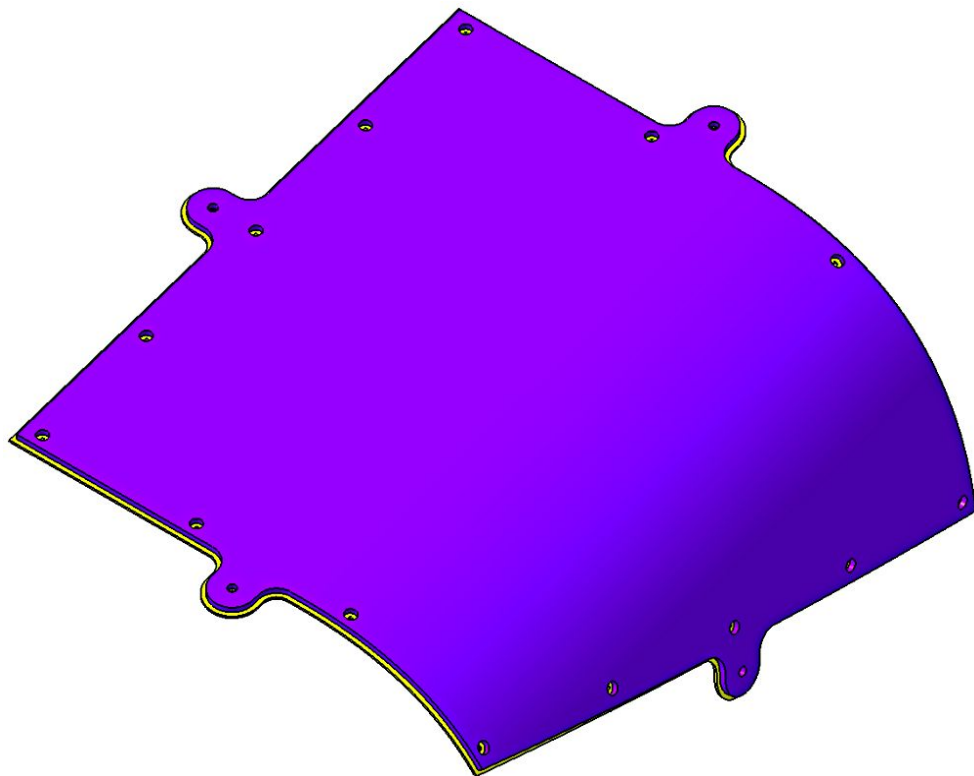
Ilman ohjausholkkia tapahtuvassa jyrsinnässä MHA on samankokoinen ja samanmuotoinen kuin lopullinen tuote. Käsijyrsintäkalu ottaa ohjauksen leikkaavan terän yläpuolelta. Jotta jyrsinterä ei leikkaisi jyrsinmallinetta, pitää mallineen ja tuotteen välissä käyttää esimerkiksi hieman mallinetta pienempää vanerilevyä. Menetelmän suurin rajoitus on siinä, että tällaista käsijyrsintä voi käyttää lähinnä vain suorien levyjen jyrsintään. Ohjausholkittoman jyrsinnän käyttö on perusteltua silloin, kun leikataan levyaihiota tai muovaamatonta tuotetta ja levy on liian suuri CNC-työstökoneelle.

Muovatuille levyille sopivampi menetelmä on käyttää ohjausholkillista käsijyrsintä (kuva 17), jota tuetaan MHA:n reunaan. Koska käsijyrsimen ohjainholkki on halkaisijaltaan suurempi kuin terä, täytyy MHA:n olla lopullista tuotetta ohjainholkin ja terän säteiden erotuksen verran pienempi (kuva 18). Tavallisimmat ohjainholkit ovat halkaisijaltaan 11...14 mm puolen millimetrin välein ja terä n. 6,5 mm. Eräs valinta on 12,5 mm ohjainholkki ja 6,5 mm terä, jolloin MHA:n pitää olla 3 mm lopullista tuotetta pienempi. Tämä suunnitteluvaihtoehto antaa myös tuotantovaiheessa mahdollisuuden leikata tuote varmuuden vuoksi hieman

nimellismittaa suuremmaksi. Käyttämällä 6,5 mm terää ja 13,5 mm ohjainholkkia, saadaan joka reunasta 0,5 mm nimellismittaa suurempi tuote.



Kuva 17 Ohjausholkillinen käsijyrsintyökalu



Kuva 18 Ohjausholkillisen käsijyrsinnän trimmaustyöväline (violetti) tuotteen (keltainen) päällä

Ohjainholkkien korkeudet vaihtelevat parista millimetristä ylöspäin. Ohjainholkin ohjaavan pinnan ei tarvitse olla samankorkuinen kuin MHA-levy, mutta leikkaaminen on helpointa kun ohjainholkki on korkeintaan yhtä korkea kuin levyn paksuus. Silloin käsijyrsintä voi tukea levyä vasten myös pystysuunnassa.

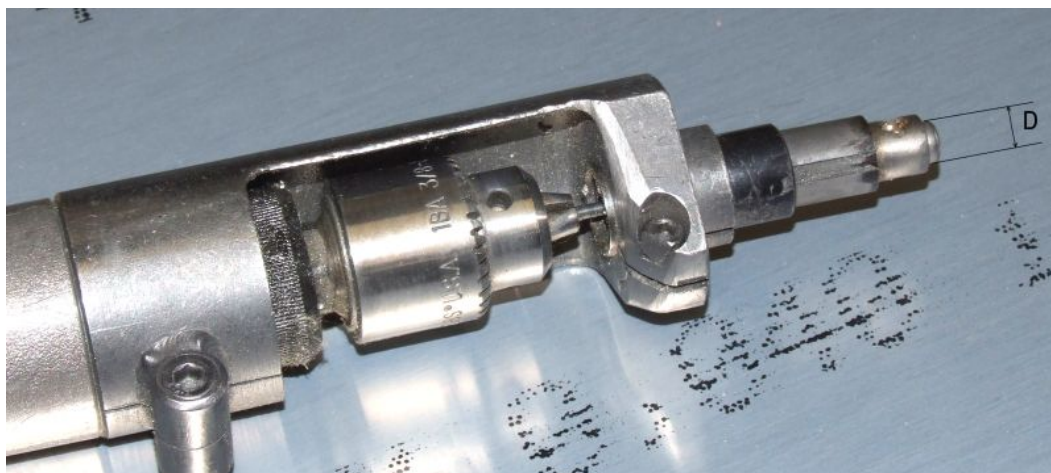
Taulukossa 5 on esitetty neljän eri jyrsintämenetelmän edut ja haitat sekä milläisen työvälineen ne vaativat.

Taulukko 5 Trimmaustapojen ja -työvälineiden edut ja haitat

Trimmaustapa	Työvälineen materiaali ja muoto	Edut ja haitat
CNC-jyrsintä	Koneistuskiinnitin. Alumiinia.	+ Trimmaaminen nopeaa. + Trimmaaminen toistuu samanlaisena pitkissäkin sarjoissa. + Trimmaaminen on tarkkaa. - Koneistuskiinnittimen suunnittelu vaativaa. - Koneistuskiinnittimen valmistus aikaa vievää ja kallista. - Vaatii yleensä 5-akselisen työstökoneen. - Taivutetun tuotteen istuminen koneistuskiinnittimen päälle epävarmaa.
Käsinjyrsintä ilman ohjausholkkia	Muovituloste 1:1.	+ Tulosteen tekeminen on hyvin nopeaa ja vaivatonta. + Tuloste on halpa. - Käsinjyrsintä on hankalaa ilman ohjaavaa pintaa. - Tuotteissa voi olla koko- ja muotoeroja.
Käsinjyrsintä ilman ohjausholkkia	Tuotteen kokoinen käsijyrsinmalline. Alumiinilevy.	+Tuotteet toistuvat samanlaisina. + Käsinjyrsintä on suhteellisen helppoa ja nopeaa. - Sopii lähinnä vain taivuttamattomille levyille.
Käsinjyrsintä ohjausholkin kanssa	Tuotetta hieman pienempi (3 mm) käsijyrsinmalline. Alumiinilevy.	+ Tuotteet toistuvat samanlaisina. + Käsinjyrsintä on suhteellisen helppoa ja nopeaa. - Mallineen taivuttaminen usein hankalaa.

Tuotteissa on usein niittien ja ruuvien reikiä, mutta tuotteen syövytysvaiheessa näistä rei'istä on haittaa. Tästä syystä MHA:ta käytetään usein paitsi ulkomuotojen

jyrsintään myös tuotteen reikien porausmallineena (kuva 18). Myös tulostettua paperikuvaa voi käyttää reikien paikoittamiseen. Reikien kohdalla MHA:ssa pitää olla kulumisen estämiseksi poraholkki tai holkiton reikä, jolloin on käytettävä erityistä ohjausholkillista käsiporakonetta (kuva 19). Käsiporakoneen porausohjainholkkeja on ainakin halkaisijaltaan 7,9 ja 5,1 mm. Holkiton reikä on yksinkertaisempi tehdä ja poraholkeista aiheutuvia kustannuksia ei ole.



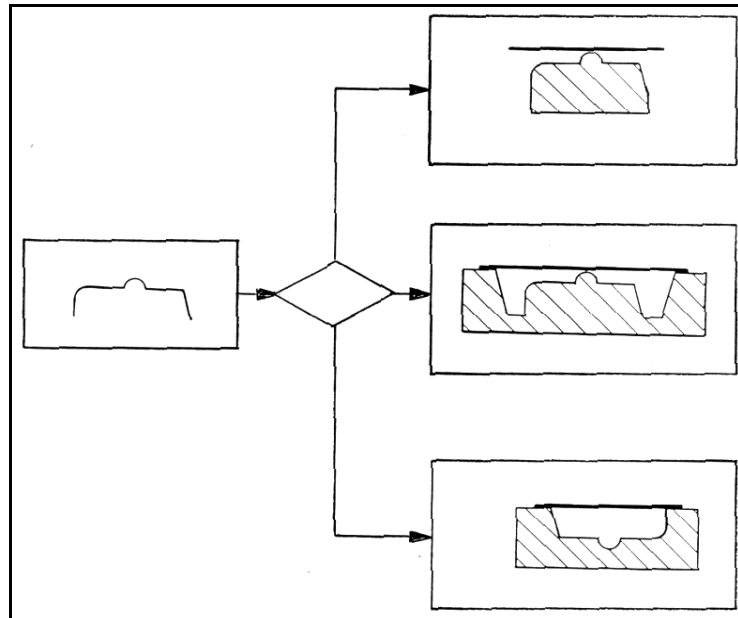
Kuva 19 Paineilmatoimiseen porakoneeseen kiinnitetty porausohjain

MHA:n valmistuksen, taivuttamisen, tukevuuden ja kestävyuden takia käyttökelpoisiin materiaali on alumiini- tai teräslevy. MHA:ta varten ei kannata tehdä erillisiä levyhankintoja, joten 4...6 mm paksuinen EN AW-2024 tai EN AW-6082 on tässäkin hyvä valinta.

5.4 Kumikalvopuristinlestin suunnittelu

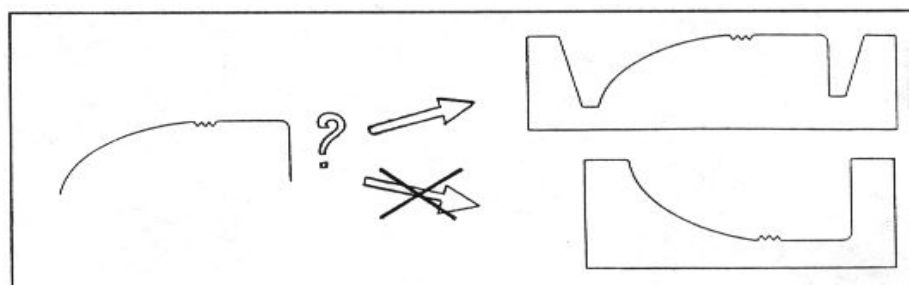
Kumikalvopuristimella voidaan muovata hyvin monimuotoisia tuotteita (liite 9), mutta erkautuskarkaistujen alumiiniseosten muovauksessa on tiettyjä rajoituksia (liite 7). Kumikalvopuristinlestin suunnittelussa ensimmäisenä valitaan käytettävä lestityyppi. Valinta riippuu tuotteen muodosta ja mitoista. Tuotteen sisäpuolisesta muodosta tehty uroslesti (kuva 20 ylin) on yksinkertaisin lestityyppi, mutta syvissä kuppimaisissa tuotteissa on suuri repeytymis- ja rypyttymisvaara. Toisena lestityyppinä on urospuolinen lesti, jossa on tuotealueen ulkopuolella alueet, joiden avulla aihioon kohdistuu muovaustapahtumassa pidätysvoimaa (kuva 20 keskellä). Kolmantena vaihtoehtona on käyttää naaraspuolista lestiä, johon aihion

pidätysvoimaa hallitseva lestinosa tulee aivan luonnostaan lestiä mallinnettaessa (kuva 20 alin).



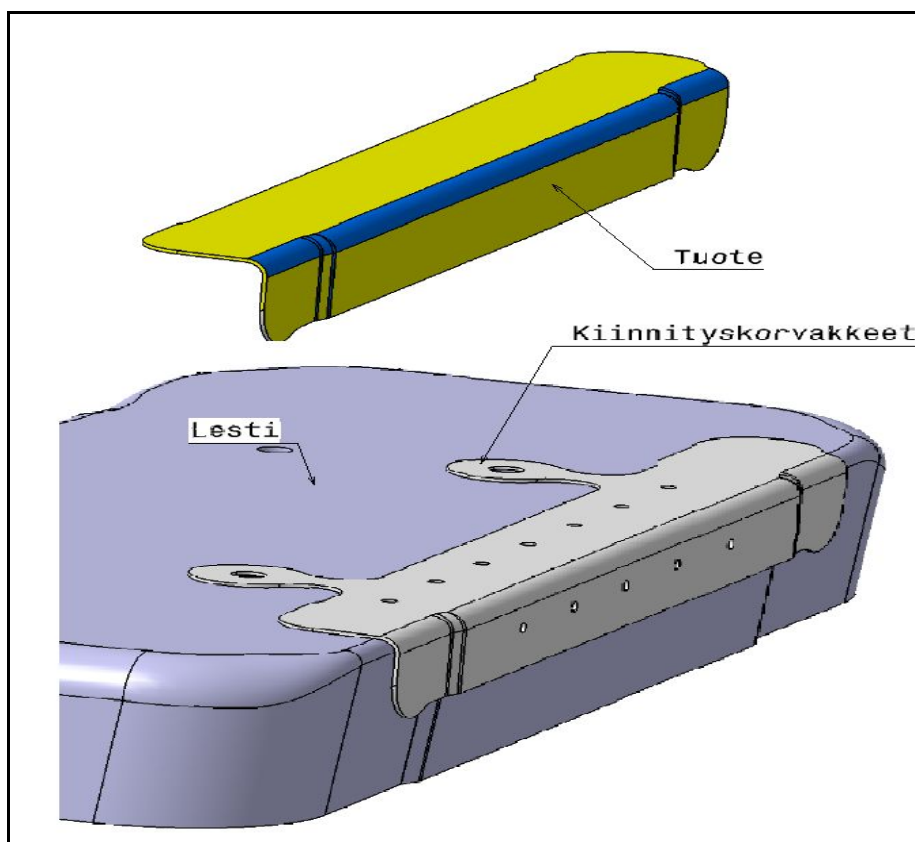
Kuva 20 Kumikalvopuristimen kolme yleisintä lestityyppiä /19/

Syvät tuotteet joissa on suuret taivutussäteet ja juohevat muodot on helpointa muovata naaraspuolisella lestillä, koska tämä lestityyppi tarjoaa muotonsa vuoksi aihion venymiselle paremmat mahdollisuudet. Kulmikkaammille muodoille taas urospuolinen lesti toimii usein paremmin, mutta tuotteen korkeuden kasvaessa valinta on jälleen naaraspuolinen lesti. Liitteessä 5 on esitetty urospuolisen lestin suurin korkeus levynpaksuuden ja taivutussäteen suhteen. Tuotteen monimutkaiset pienellä alueella olevat yksityiskohdat tulee muovata mahdollisimman aikaisessa vaiheessa puristustapahtumaa (kuva 21), mikä vaikuttaa osaltaan lestityypin valintaan. /19./



Kuva 21 Tuotteen monimutkaiset yksityiskohdat vaikuttavat lestin valintaan /19/

Lentokoneiden tukirakenteina käytetään paljon L-profiiliksi taivutettuja sauvoja, joiden muoto on esimerkiksi olastusten takia sellainen, että niitä ei särmäys- tai kulmauskoneella pysty tekemään (kuva 22). Tällaisissa yksinkertaisissa taivutuksissa ei ole suurta repeytymis- tai rypyttymisvaaraa, joten lestityyppinä voidaan käyttää uroslestiä ja aihio voidaan leikata valmiiksi lopullisen tuotteen kokoiseksi. Näin säästytään erillisen trimmaustyövälineen suunnittelulta ja valmistukselta.



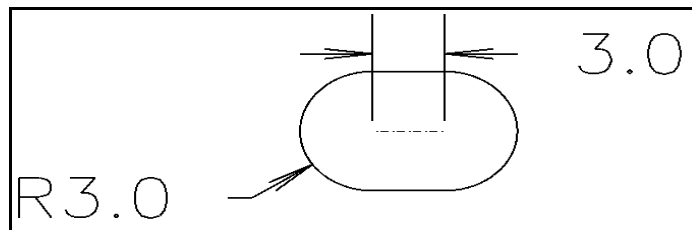
Kuva 22 L-profiilimainen tuote ja uroslesti

Lesteissä tulee ottaa huomioon muovauksen takaisinjousto. Takaisinjouston arvioimiseen voi käyttää kappaleessa 4.4 esiteltyjä periaatteita, mutta helpoimmin lestin ennakot saadaan taulukoista. Liitteissä 3 ja 4 on takaisinjoustokulmia 2024-O, 2024-W ja 2024-T3 seoksille taivutussäteen ja levynpaksuuden suhteen.

Toinen takaisinjouston takia huomioon otettava asia on tuotteen taivutuskohdan sisäsäteen muuttuminen ennen ja jälkeen takaisinjousto. Taivutuspyöristyksen voi

lestiin tehdä hieman nimellismittaa pienemmäksi esimerkiksi kaavan (14) mukaan, mutta liitteen 3 taulukossa asia on tavallaan ratkaistu käyttämällä lisäennakkoa L . Materiaalien pienimmät sallitut taivutussäteet (liite 6) tulee huomioida taivutuspyörityksissä.

Jos levyaihio leikataan ennen muovausta oikean kokoiseksi, tulee lestiin tehdä vähintään kaksi paikoitus- ja kiinnitysreikää levyaihiole (kuva 22). Listamaisissa tuotteissa lestiin tehdään yksi reikä pyöreäksi ja loput 6x9 mm suuruisiksi rei'iksi (kuva 23) /15/, mikä helpottaa levyaihion asettamista lestiin ja mahdollistaa aihion lievän liikkumisen puristustapahtumassa. Levyaihioon tehdään kaikki reiät kuitenkin aina pyöreiksi. Joissain tapauksissa asiakas haluaa, että osa tuotteisiin tulevista rei'istä porataan vasta muovausvaiheen jälkeen. Tällaiset reiät voidaan porata lestin läpi tuotteen ollessa lestin päällä, jolloin lestiin tulee tehdä läpireikä ja asentaa sopivankokoinen poraholkki.



Kuva 23 Kiinnitys- ja paikoitusreikä 6x9 mm

Muita lestin suunnittelussa huomioon otettavia asioita ovat tuotteiden kevennysreiät (kuva 24). Kevennysreikien muodot ja mitat saadaan standardista (liite 8).



Kuva 24 Laipallinen kevennysreikä

Kumipuristimen kalvon suojelemiseksi lestissä tuotealueen ulkopuolisten kulmien tulee olla säteeltään vähintään 10 mm. Lestin on myös hyvä olla vähintään 10 mm taivutettua tuotetta korkeampi, jotta puristimen puristusaine ulottuisi tasaisesti koko tuotteen alueelle. /19./

Lestin materiaalin pitää olla hyvin koneistettavaa. Materiaalina hyvä valinta on alumiini EN AW-6082 tai suuremmissa lesteissä teräs S355.

5.5 Venytysmuovauslestin suunnittelu

Venytysmuovaaminen asettaa rajoituksia erkautuskarkaistujen tuotteiden muovaamiseen (liite 7). Venytysmuovauslestin pitää olla aina urospuolinen (liite 9). Tuotteen pieni kovera muoto voidaan koneistaa lestiin ja se alue voidaan kumivasaralla lyömällä tai erillisellä yläpuolisella painimella saada myös tuotteeseen, mutta pääsääntöisesti venytysmuovaamalla tehtäviin tuotteisiin ei tule koveria muotoja.

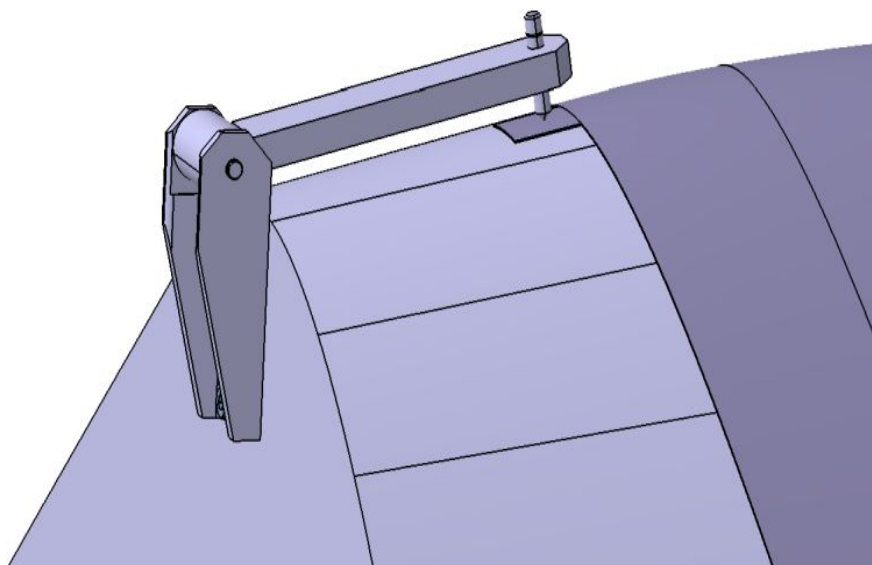
Venytysmuovauksessa tuotteen takaisinjousto jää pienemmäksi kuin kumikalvopuristuksessa /2/, joten lestit tehdään yleensä tuotteen nimellimitan kokoisiksi.

Lestin liikkuminen muovaustapahtuman aikana on estettävä. Lestin pohjassa voi käyttää koneen pöydän ohjaustupeihin sopivia reikiä, joilla lesti saadaan sovitettua aina samaan kohtaan pöytää. Lestin pohjaan voi tehdä myös kierrereivät ruuvikiinnitykseen pöydän läpi. Käytettävien reikien koko ja etäisyys riippuvat lestin koosta ja mahdollisesti koneessa olevista apupöydistä ja kiinnityslevyistä.

Koska levyaihio kiinnitetään venytysmuovauskoneen leukoihin, pitää levyaihion olla aina lopullista tuotetta suurempi. Trimmaustyöväline ja mahdollinen vahanleikkausmalline pitää kohdistaa oikealle kohtaa muovattua aihiota, joten venytysmuovauslestissä täytyy olla kohdistustyökalu. Kumikalvopuristinlestissä käytettäviä ohjaintupeja ei voi käyttää, koska levyaihion pitää päästä huomattavasti vapaammin liikkumaan ja venymään muovaustapahtumassa.

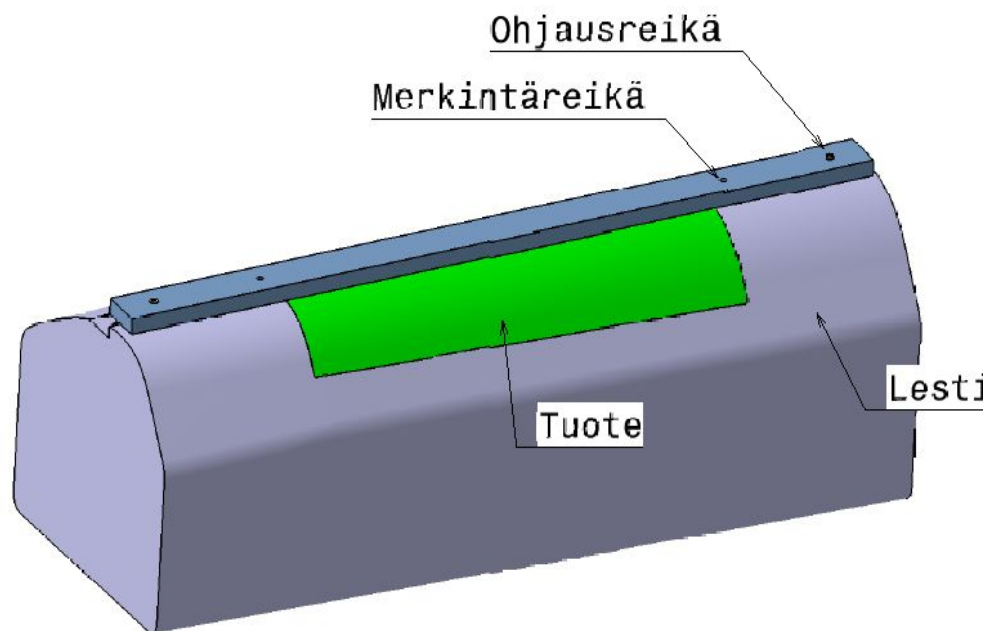
Muovatus aihion merkitsemiseen voi käyttää saranoituja merkintätyökaluja (kuva 25), jotka saadaan käännettyä pois tieltä muovauksen ajaksi. Muovatus aihion vielä

ollessa paikalla lestissä, merkintätyökalun piikillä lyödään aihioon merkit. Näiden merkkien kohdille porataan käsiporakoneella työreivät MHA:n ja MSK:n kohdistusta varten. Merkintätyökalun varren pituus pitää olla sellainen, että työreivät jäävät varsinaisen tuotteen ulkopuolelle.



Kuva 25 Käännettävä merkintätyökalu venytysmuovauslestissä

Toinen tapa on käyttää merkintäsauvaa (kuva 26), jonka valmistaminen on huomattavasti helpompaa, koska lesti ei vaadi muuta kuin kaksi reikää sauvan kohdistamiseen. Sauvan mitoissa vain reikien etäisyys toisistaan on merkityksellinen. Tällaisen suoran sauvan käyttäminen merkitsemiseen onnistuu kuitenkin vain silloin, kun lestin yläosa on riittävän suora. Suurissa sarjoissa merkintäsauvan käyttäminen on myös hidasta.

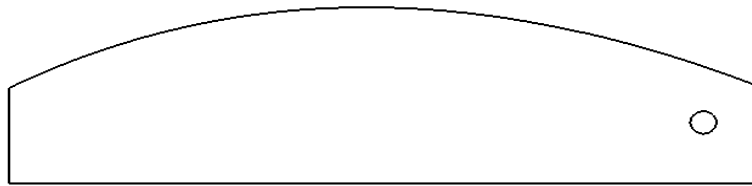


Kuva 26 Venytysmuovauslestissä merkintätyökaluna erillinen sauva

Venytysmuovauslestin materiaalina käytetään yleensä S355 terästä, mutta muutkin koneistettavat materiaalit käyvät. Kaikkein suurimmat lestit vaativat painon säästämiseksi lestin valmistusta valamalla. Valumateriaalina on lähinnä suomugrafiittivalurauta GRS ja valumallin valmistusmateriaalina esimerkiksi polystyreeni (EPS). Valumallia suunniteltaessa pitää ottaa huomioon valettavan materiaalin kiinteäkutistuma, hellitykset ja työstövarat. Lestien muodon takia ne tuskin koskaan tarvitsevat keernoja.

5.6 Tarkastusmallineen suunnittelu

Tarkastusmallinetta TKU (kuva 27) käytetään särmäämällä ja pyöristämällä muovattujen osien oikean muodon tarkastamiseen. Tarkastusmallinetta ei tarvita jos tuote pystytään helposti mitoittamaan ja mittaamaan yksiselitteisesti tavallisilla mittavälineillä. Tyypillinen tarkastusmallinetta vaativa osa on koko matkaltaan kaareutuva lieriö- tai kartiopinta. TKU:n suunnittelussa oleellisin asia on sen oikea paikoittaminen mittaustilanteessa tuotteeseen.



Kuva 27 Tarkastusmalline TKU

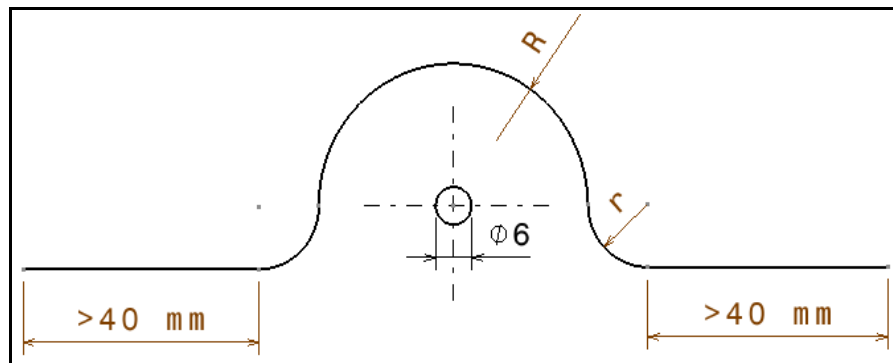
Tarkastusmallineeksi sopii taivuttamaton levy, joka on koneistettu taivutetun tuotteen poikkileikkauksen muotoiseksi. TKU:n paksuudella tai materiaalilla ei ole juuri merkitystä, mutta koneistettavuuden ja käsiteltävyyden vuoksi 2 mm alumiinilevy EN AW-6082 tai EN AW-2024 on sopiva valinta.

5.7 Muut työvälineet

Tässä esitellyt työvälineet ovat kaikkein yleisimpiä ohutlevyjen valmistuksessa, mutta satunnaisesti tarvitaan myös paljon muita työvälineitä. Koneistuskiinnittimet, asennus-, hitsaus- ja tarkastusjigit, käsipuristinlestit ja särmäyspuristinmuotit ovat kuitenkin niin tapauskohtaisia, että niille ei voi antaa mitään yleispäteviä ohjeita. Koneistuosille pääperiaatteena on luonnollisesti käyttää materiaaleja, jotka ovat helposti koneistettavia ja riittävän kestäviä. Muotteihin, lesteihin ja koneistuskiinnittimiin sopii yleensä parhaiten 6000-sarjan alumiinit tai kovimmin rasittuvissa osissa 7000-sarjan alumiinit tai S355 teräs.

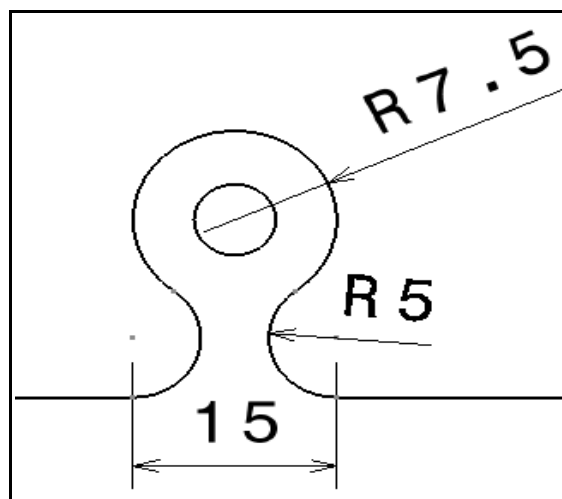
5.8 Kiinnityskorvakkeet

Kiinnityskorvakkeita tarvitaan aihion kiinnittämisessä ja paikoituksessa urospuoliseen kumikalvopuristinlestiin sekä vahanleikkausmallineen ja jyrsinmallineen kiinnityksessä ja paikoituksessa tuoteaihioon. Kiinnityskorvake ja kiinnityskorvakkeen reikä menevät varsinaisen tuotteen ulkopuolelle. Sopiva reiän halkaisija on 6 mm, jolloin sitä voi käyttää paikoittamiseen ohjaustappien avulla ja kiinnitykseen M6 ruuveilla. Suurempi reikä vaatii vastaavasti suuremman kiinnityskorvakkeen ja suuremman kiinnityskorvakkeen sijoittaminen tuotteeseen on hankalampaa. Jos vain mahdollista, korvake tulisi sijoittaa suoralle särmälle siten, että molemmin puolin korvaketta suora särmä jatkuu vähintään 40 mm (kuva 28). Tämä mahdollistaa korvakkeiden poistamisen erityisellä koneella.



Kuva 28 Kiinnityskorvake

Jyrsinmallineissa korvakkeen pyöristyssäteen R (kuva 28) pitää olla vähintään 22,5 mm /17/. Koska jyrsinmalline on yleensä 3 mm tuotetta pienempi, tulee tuotteeseen jäävän korvakkeen pyöristyssäteestä R 3 mm suurempi ja säteestä r 3 mm pienempi. Hyvä arvo säteelle r on jyrsinmallineissa noin 10 mm, jolloin jyrsinmallineen voi koneistaa 20 mm terälläkin. Pienemmissä särmissä on kuitenkin käytettävä vähemmän tilaa vievää kiinnityskorvaketta (kuva 29).



Kuva 29 Vähän tilaa vievä kiinnityskorvake

Paikoituksen takia kiinnityskorvakkeita tulee olla vähintään kaksi kappaletta. Suuremmissa tuotteissa kiinnityskorvakkeiden määrä pitää arvioida kokemuksen pohjalta siten, että tuote paikoittuu varmasti oikein ja pysyy kiinni.

6 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli etsiä yritykseen sopivat menetelmät lentokoneiden ohutlevyosien työvälinessuunnitteluun. Tältä osin työ on saavuttanut tavoitteensa. Työvälinessuunnittelun kaikkein tärkeimmät taulukot ja menetelmät löytyvät nyt samojen kansien sisältä. Suunnittelijan varsinaiseen perehdyttämiseen ja suunnittelijan ainoaksi ohjeeksi tämä työ ei kuitenkaan yksin riitä. Yksityiskohtaisempi ohjeistus suunnittelumenetelmistä olisi esimerkkikuvineen ja standardeineen laajentunut moninkertaiseksi nykyisestä sivumäärästään, joten nykyinen suppeahko esitys on perusteltua. Yksin kumikalvopuristinlestin suunnittelu olisi laajuudeltaan varmasti riittävä aihe vastaavalle työlle.

Työvälinessuunnitteluun liittyvistä asioista on tässä työssä jätetty kokonaan pois työpiirustusten tekeminen ja tiedostojen käsittely. Lisäksi tässä esiteltyjenkin työvälaineiden suunnittelusta on jätetty hieman yksityiskohtia pois. Näiden poisjätettyjen asioiden lisäksi nykyistä laajempi levyn taivuttamisen teoria olisi myös mielenkiintoinen aihe vastaavalle työlle. Tekniikan ja menetelmien kehittyessä sekä suunnittelukokemuksen karttuessa tässä esitellyt suunnittelutavat tulevat varmasti muuttumaan.

LÄHTEET

Painetut lähteet

- 1 Erkkilä, Timo, Takaisinjousto särmäyksessä. Metalliteollisuuden keskusliitto, Tekninen tiedotus 27/85. Metalliteollisuuden Kustannus Oy, Helsinki. 1985. 49 s.
- 2 Jokinen, Harri, Ohutlevyn muovauksen suunnittelu ja simulointi. Metalliteollisuuden keskusliitto, Tekninen tiedotus 7/2002. Metalliteollisuuden Kustannus Oy, Helsinki. 2002. 29 s.
- 3 Karppinen, Antti, Ohutlevyjen taivutus. Metalliteollisuuden keskusliitto, Tekninen tiedotus 23/86. Metalliteollisuuden Kustannus Oy, Helsinki. 1986. 48 s.
- 4 Katainen, Harri – Mäkinen, Armas, Kone- ja metallitekniikka Levytyötekniikka 1. Tekijät ja WSOY, WSOY:n graafiset laitokset. Porvoo 1983. 162 s.
- 5 Koivisto, Kaarlo – Laitinen, Esko – Niinimäki, Matti – Tiainen, Tuomo – Tiilikka, Pentti – Tuomikoski, Juho, Konetekniikan materiaalioppi. 8. painos. Edita Oyj. Helsinki 2001. 336 s.
- 6 Mäkelä, Mikko – Soininen, Lauri – Tuomola, Seppo – Öistämö, Juhani, Tekniikan kaavasto. 4. painos. Tammertekniikka, Tampere. 2000. 192 s.
- 7 SFS-EN 515. Alumiini ja alumiiniseokset. Muokatut tuotteet. Tilojen tunnukset. Suomen standardisoimisliitto SFS 1993. 29 s.
- 8 SFS-EN 573-3. Alumiini ja alumiiniseokset. Muokattujen tuotteiden kemiallinen koostumus ja tuotemuodot. Osa 3: kemiallinen koostumus. Suomen standardisoimisliitto SFS 2003. 25 s.

Painamattomat lähteet

- 9 A-TO-SSC-81A. Technical Order. Alumiiniseosten muovaus, oikaisu ja koneistus. Valmet Avicomp. 1996. 24 s.
- 10 C-TO-SSC-50B. Technical Order. Valmet Aviation Industries. Levyn taivutussäteet. 1992. 3 s.
- 11 Fi A9328:020, SAAB 2000. Kemiallisen työstön malline MSK. Valmet Lentokonetehtas. 5 s.
- 12 HKO-SSC-52. Laipotetut kevennysreiät. Tarkastus- ja korjausohje. Valmet Aircraft Division. 1990. 3 s.

- 13 HKO-SSC-61. Taivutusvara. Tarkastus- ja korjausohje. Valmet Aircraft Division. 1990. 2 s.
- 14 Hyyryläinen, Janne, Särmättävien ohutlevyosien valmistustarkkuuteen vaikuttavat tekijät ja niiden määrittäminen. Diplomityö. Oulun yliopisto. Konetekniikan osasto. Oulu 2004. 70 s + 10 liites.
- 15 Lallukka, Marko. SAAB 2000/TVS-ohje2. Valmet Avicomp Oy. 1993.
- 16 Leiviskä, Anu, Lujien terästen särmäys. Diplomityö. Oulun yliopisto. Konetekniikan osasto. Oulu 2006. 90 s.
- 17 MAN-02025. Saab Aerospace. Tool holes, jig holes and tool tabs. 2002. 5 s.
- 18 Patricomp Oy, Laatukäsikirja. 23.3.2007.
- 19 Quintus Flexform Manual. Asea Brown Boweri. 90-42 Rev 2.

Sähköiset lähteet

- 20 Adams, S. M. SheetMetal-BendAllowance. [www-dokumentti]. [viitattu 3.6.2007]. Saatavissa: www.sheetmetaldesign.com/WhitePapers/BendAllowance/SheetMetal-BendAllowance.pdf
- 21 Avure Technologies. Flex Form Presses. [www-sivu]. [viitattu 10.6.2007]. Saatavissa: http://www.avure.com/sheet_metal_more.htm
- 22 CATIA V5. Dassault Systemes. Versio 5.17. 2007. Tietokoneohjelma.
- 23 Hussey–Wilson, Light Alloys Directory and Databook. Knovel 1998. [www-dokumentti]. [viitattu 21.6.2007]. Saatavissa: <http://www.knovel.com/>
- 24 Metallic Materials Properties Development and Standardization (MMPDS). Knovel 2004. [www-dokumentti]. [viitattu 21.6.2007]. Saatavissa: <http://www.knovel.com/>
- 25 Patria Oyj, Lehistötiedote 24.7.2006. [sähköinen dokumentti]. [viitattu 26.5.2007] Saatavissa: <http://www.patria.fi/>
- 26 Patricomp Oy. [www-sivu]. [viitattu 26.5.2007]. Saatavissa: <http://www.patricomp.fi/>

Syövytysvarat

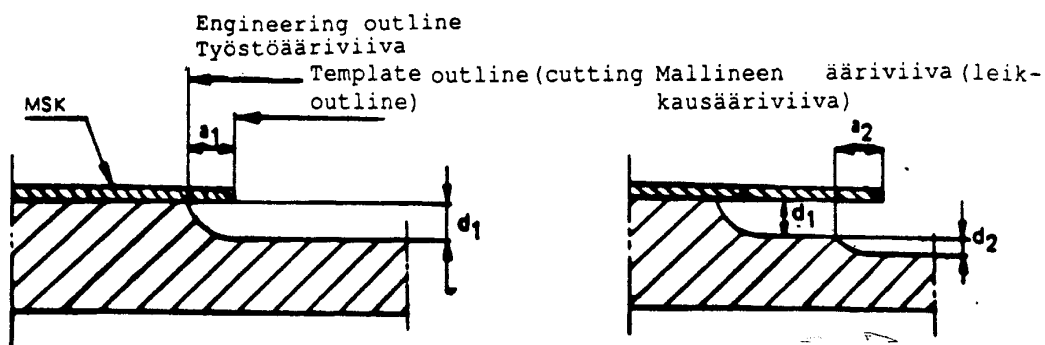


Figure 2. Chem-mill in one step
 Kuva 2. Yksivaiheinen syövytys

Figure 3. Chem-mill in two steps
 Kuva 3. Kaksivaiheinen syövytys

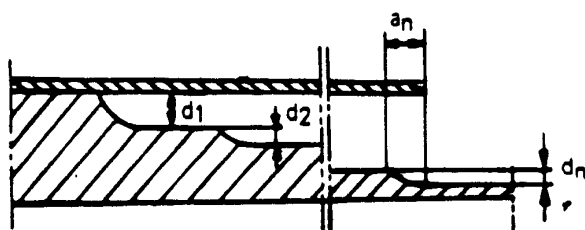


Figure 4. Chem-mill in more than two steps
 Kuva 4. Monivaiheinen syövytys

The set-backs a_1 , a_2 and a_n according to figures 2, 3 and 4 are calculated as follows:

Syövytysvarat a_1 , a_2 ja a_n kuvissa 2, 3 ja 4 lasketaan seuraavan taulukon mukaan:

Lähde: /11/

Syövytysvarat

3(5)
 Fi A9328:020
 Muutostaso: 6

Material Materiaali	a_1	a_2	a_n	(Al. = Aluminium) (Al. = Alumiini)
3526-38 -68	$1,5x d_1$	$1,5x d_2 + 0,4x d_1$	$1,5x d_n + 0,4 (d_1 + d_2 + \dots + d_{n-1})$	-Al.
3627-048 -068	$1,8x d_1$	$1,8x d_2 + 0,3x d_1$	$1,8x d_n + 0,3 (d_1 + d_2 + \dots + d_{n-1})$	-Al.
3114-3-5 3126-42 6061-62	$1,2x d_1$	$1,2x d_2 + 0,3x d_1$	$1,2x d_n + 0,8 (d_1 + d_2 + \dots + d_{n-1})$	-Al.
3523-42 3526-3 3618-3-5 3627-03 -06 -072 -073 3637-77 2024-T42 T3	d_1	$d_2 + 0,8x d_1$	$d_n + 0,8 (d_1 + d_2 + \dots + d_{n-1})$	-Al.
Al. 7075-T62	d_1	$d_2 + 0,8x d_1$	$d_n + 0,8 (d_1 + d_2 + \dots + d_{n-1})$	

Example: Given Material aluminium 3526-38

Chem-mill in 5 steps:

$d_1 = 0,4; d_2 = 0,5; d_3 = 0,3; d_4 = 0,4; d_5 = 0,4;$

Find Dimension a_5

Calculation

$$a_5 = 1,5x d_5 + 0,4 (d_1 + d_2 + d_3 + d_4)$$

$$a_5 = 1,5x 0,4 + 0,4 (0,4 + 0,5 + 0,3 + 0,4) = 1,24 = 1,2$$

Esim. Annettu

Materiaali alumiini 3526-38

5-vaiheinen kemiallinen työstö:

$d_1 = 0,4; d_2 = 0,5; d_3 = 0,3; d_4 = 0,4; d_5 = 0,4;$

Avoin Etäisyys a_5

$$\text{Lasku } a_5 = 1,5x d_5 + 0,4 (d_1 + d_2 + d_3 + d_4)$$

$$a_5 = 1,5x 0,4 + 0,4 (0,4 + 0,5 + 0,3 + 0,4) = 1,24 = 1,2$$

A design drawing or a RTR always shall accompany the chem-milled part. The drawing shall state material thickness with tolerance, dimension "a"

Kemiallisesti työstetyn osan mukana on aina oltava piirustus tai RTR. Piirustuksesta pitää käydä ilmi materiaalin paksuus toleransseineen, mitta

Kaavio taivutusvaralle

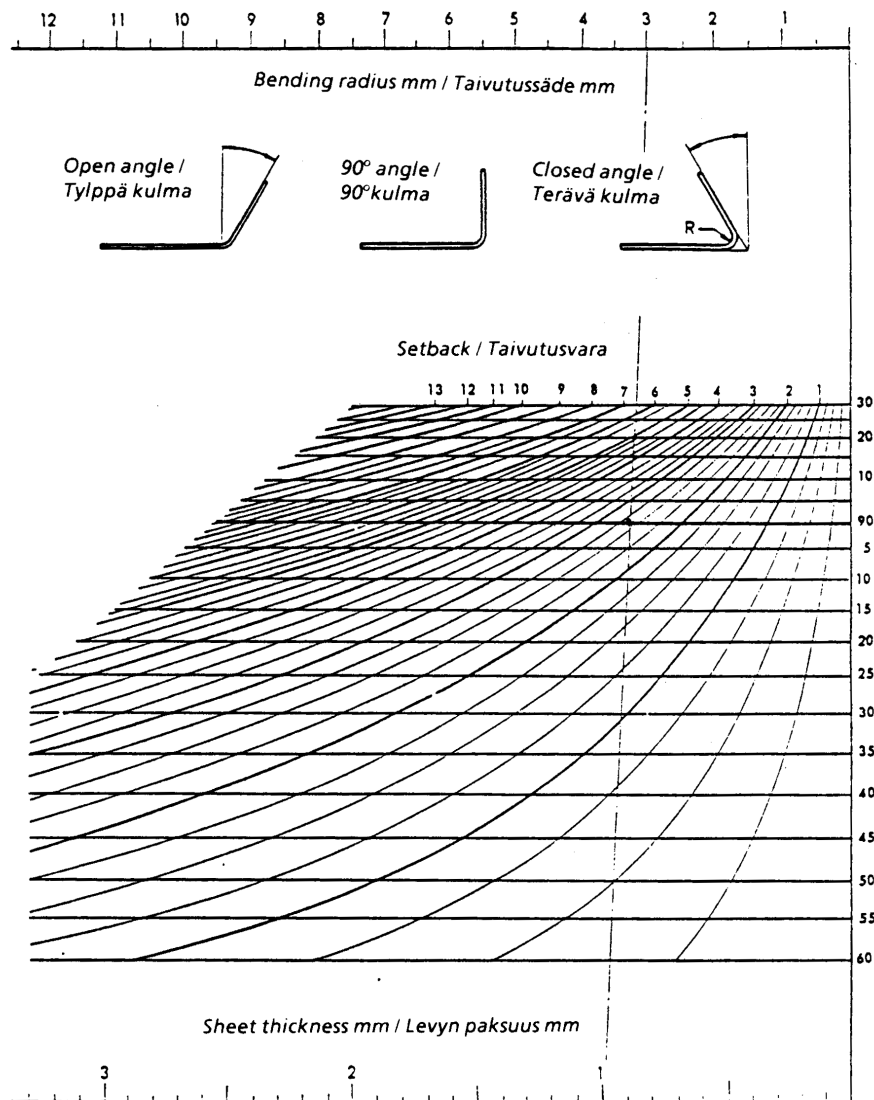


TARKASTUS- JA KORJAUSOHJE
TECHNICAL INSTRUCTION

HKO-SSC-61
Sivu: 2/2

2. CHART FOR SETBACK.

2. KAAVIO TAIVUTUSVARALLE.



Example: $t = 1 \text{ mm}, R = 3 \text{ mm}$, 90° bending angle, Right setback = 2.7 mm.

Esim. $t = 1 \text{ mm}, R = 3 \text{ mm}$, taivutuskulma 90° Vaadittu taivutusvara = 2,7 mm.

Lestin ennakot

LIITE 2

LESTIN ENNAKOT

COMPENSATION FOR ANGLE SPRING BACK AND INCREASE OF WEB
FOR FHY (Hydro Press Block)

FHY (Hydro Press Block) shall be manufactured with certain divergence from the BM (Form Block Template), see below, to compensate angle spring back and in this connection increase of web of the part.

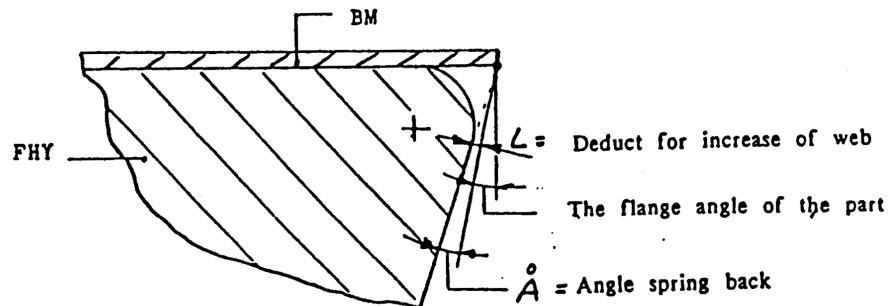
Applicable for a pressure of 500 bars.

Angle spring back and required deduct for increase of web shall be noted on the planning card (VK)

Example $\overset{\circ}{A}/L = 4^{\circ}/0,2$

A is always noted, even if it is 0 (zero). Whether FHY shall be compensated for angle spring back or not is stated in item 226 (not enclosed).

L is only noted in the cases it is really needed - e.g. at parts with two flanges where the dimension of the web is very important.



A and **L** for the sheet metals below are stated

Aluminium AA2024-0 (clad and unclad)	} See page 2
AA2024-W (clad and unclad)	
Aluminium AA7075-0 (clad and unclad)	} See page 3
AA7075-W	
Aluminium AA7475-0 (clad and unclad)	} See page 4
AA7475-W (clad and unclad)	

The tables will be completed with missing values, if needed.



Lestin ennakot

AA 2024-0 (clad and unclad)

Thickness t	R=1		R=2		R=3		R=4		R=5	
	Å	L	Å	L	Å	L	Å	L	Å	L
0,6					4°24'	0,2				
0,7					3°36'	0,2				
0,8					3°6'	0,2	3°42'	0,3	4°12'	0,4
1,0					2°36'	0,1	3°6'	0,2	3°36'	0,3
1,2					2°12'	0,1	2°42'	0,2	3°6'	0,3
1,4					2°	0,1	2°18'	0,2	2°36'	0,2
1,6					1°48'	0,1	2°	0,1	2°18'	0,2
1,8					1°36'	0,1	1°48'	0,1	2°	0,2
2,0					1°30'	0,1	1°42'	0,1	1°48'	0,2
2,5							1°30'	0,1	1°24'	0,1
3,0									1°	0,1

AA 2024-W (clad and unclad)

Thickness t	R=2		R=3		R=4		R=5	
	Å	L	Å	L	Å	L	Å	L
0,6			7°12'	0,3				
0,7			6°42'	0,3				
0,8			6°12'	0,3				
1,0			5°6'	0,3	5°18'	0,4		
1,2			4°	0,2	4°54'	0,3		
1,4					4°30'	0,3		
1,6					4°	0,3	4°30'	0,4
1,8					3°30'	0,2	4°18'	0,4
2,0							4°	0,4
2,5								
3,0								

Takaisinjoustoarvot

Fig 1
Springback

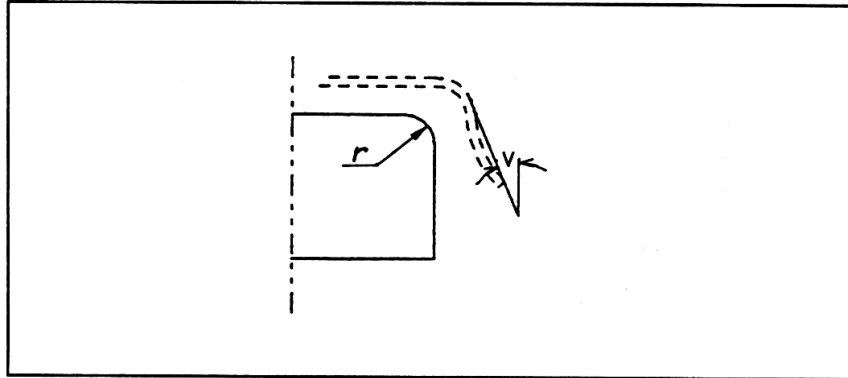


Table 1	Material	Thickness	r = 3 mm	r = 5 mm
Springback angles [°]	Stainless steel	0.8	3.25	4.00
		Aluminium 2024-0 soft annealed	0.8	3.00
		1.0	2.75	3.50
		1.6	2.25	2.75
	Aluminium 2024-W solution heat treated	0.8	5.25	6.50
		1.0	4.50	5.75
1.6		3.50	4.25	
Aluminium 2024-T3 hardened	0.8	8.50	12.50	
	1.0	7.50	10.50	

Lähde: /19/

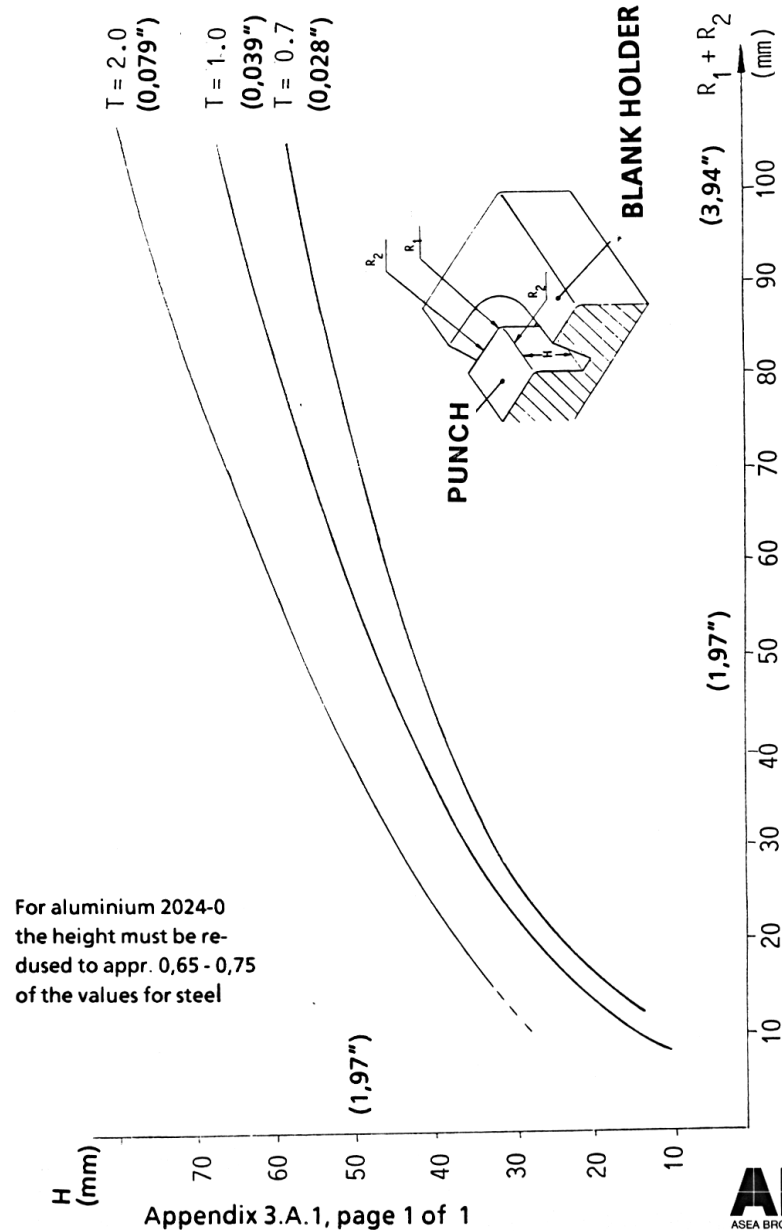
Uroslestin korkeus

Appendix 3.A.1

- Maximum height of punch corner

Maximum height on punch with blank holder for steel (deep drawing quality) that can be formed in one draw.

Sheet thickness: $T = 0.7, 1$ and 2 mm ($0,028''$, $0,039''$ and $0,079''$)



8023.1000E-A
90-42, Rev 2

Appendix 3.A.1, page 1 of 1



Levyn taivutussäteet

VALMET Aviation Industries

TECHNICAL ORDER C-TO-SSC-50B

Date: 9.3.1992

Page(s): 2(3)

Bend radii for sheet / Levyn taivutussäteet.
Thickness inch / mm / Paksuus inch / mm

Material / Materiaali	.006 / 0,15	.010 / 0,25	.012 / 0,30	.016 / 0,41	.020 / 0,51	.025 / 0,64	.032 / 0,81	.040 / 1,02	.050 / 1,27	.063 / 1,60	.071 / 1,80	.080 / 2,03	.090 / 2,29	.100 / 2,54	.112 / 2,84	.125 / 3,18	.140 / 3,56	.160 / 4,06	.180 / 4,57	.190 / 4,83	.200 / 5,03	.224 / 5,69		
Aluminium (Al) ¹⁾																								
Alumiini (Al) ¹⁾																								
2024-0	-	1	1	1	1	1	1	2	2	3	3	4	4	5 ⁹⁾	5	6	6	8						
2024-W (2h) ²⁾	-	1	1	1	1	1	1	2	2	3	3	4	4	5	6	6	8							
2024 T3	-	1	1	1	1	1	1	2	2	3	3	4	4	5	6	6	8							
6061-0	-	1	1	1	1	1	1	2	2	3	3	4	4	5	6	6	8							
7075-0	-	1	1	1	1	1	1	2	2	3	3	4	4	5	6	6	8							
7075-W (2h) ²⁾	-	1	1	1	1	1	1	2	2	3	3	4	4	5	6	6	8							
Steel (STL)																								
Terräs (Fe)																								
1095 Annealed / Hehkutettu ³⁾																								
4130 Normalized / Normalisoitu																								
4340 Annealed / Hehkutettu ³⁾																								
6150 Annealed / Hehkutettu ³⁾																								
9Ni-4Co-20C Annealed / Hehkutettu ³⁾																								
Steel (CRES, corrosion resistant)																								
Terräs (ruostumaton)																								
301 Annealed / Hehkutettu	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
302 Annealed / Hehkutettu	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
304 Annealed / Hehkutettu ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Sallitut muovausmenetelmät



TECHNICAL ORDER A-TO-SSC-81A

Date: 20.3.1996

Page(s): 18(24)

Table 5. Forming/straightening of 2024 1)

Taulukko 5. 2024:n muovaus/oikaisu 1)

Method/ Menetelmä	Form and condition of material/ Materiaalin muoto ja tila								
	Sheet/Levy ≤6 mm			Plate/Laatta >6 mm			Extruded sections, rods, forgings/ Pursotetut osat, tangot, takeet		
	Soft ann./ Peh. heh- kutettu	W(2h) 3)	sht +na	Soft ann./ Peh. heh- kutettu	W(2h) 3)	sht+ na	Soft ann./ Peh. heh- kutettu	W(2h) 3)	sht+ na
Bending, brake forming, roll forming ²⁾ / Taivutus, särmäys, rullamuovaus ²⁾	P	P	P	P	P	RP1	P	P	NP
Rubber press forming/ Kumipuristinmuovaus	P	P	RP2	P	P	NP	-	-	-
Draw press, expander press, drop hammer forming/ Vetopuristin-, venytys- puristin-, pudotus- vasaramuovaus First stage/ Ensimm. vaihe Final stage (si- zing)/ Lopull. vaihe (mittaan viimeis- tely)	P	NP	NP	P	NP	NP	-	-	-
	RP3	P	NP	RP3	P	NP	-	-	-
Stretch press forming/ Venytysmuovaus First stage/ Ensimm. vaihe Final stage (si- zing)/ Lopull. vaihe (mittaan viimeis- tely)	P	P	NP	P	NP	NP	P	NP	NP
	RP3	P	P	RP3	P	P	RP3	P	NP
Jogging ⁴⁾ / Olastus ³⁾	P	P	RP4	P	P	RP4	P	P	RP4
Straightening/ Oikaisu	P	P	RP5	P	P	RP15P	P	P	RP5

Abbreviations in the table

sht	= solution heat treatment	
na	= naturally aged	
P	= permissible	
NP	= not permissible	
-	= not applicable	
RP	= restrictively permissible as follows:	
RP1	= Permissible in the L and TL direction	C
RP2	= Approval from the Materials and Process Technology is required	
RP3	= Permissible for heavy-gauge parts which are not significantly deformed during solution heat treatment	
RP4	= Permissible for Saab 340 and Saab 2000 (See HKO-SSC-46)	
RP5	= Permissible according to paragraphs 5.3.1 and 5.3.2.	N

Taulukossa esiintyvät lyhennykset:

sht	= liuotushehkutus
na	= luonnollisesti vanhennettu
P	= sallittu
NP	= ei sallittu
-	= ei koske
RP	= rajoitetusti sallittu seuraavasti:
RP1	= sallittu L ja TL suunnassa
RP2	= vaaditaan MRB:n hyväksyntä
RP3	= sallittu paksuille osille, jotka eivät muuta merkittävästi muotoaan liuotushehkutuksen aikana
RP4	= sallittu SAAB 340:lle ja SAAB 2000:lle (ks. HKO-SSC-46)
RP5	= sallittu kohtien 5.3.1 ja 5.3.2 mukaan

Sallitut muovausmenetelmät



TECHNICAL ORDER A-TO-SSC-81A

Date: 20.3.1996

Page(s): 20(24)


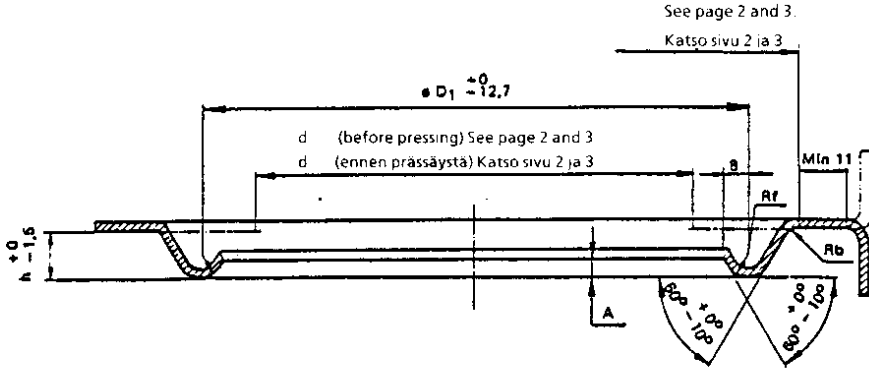
Table 6. Forming/straightening of materials 7050 and 7075 (3627, 3643) 1)

Taulukko 6. 7050:n ja 7075:n muovaus/oikaisu 1)

Method/ Menetelmä	Form and condition of material/ Materiaalin muoto ja tila														
	Sheet/Levy ≤6 mm 5)					Plate/Laattia >6 mm 5)					Extruded sections, rods, forgings/ Pursotetut osat, tangot, säleet				
	Soft ann./ Peh. heh- kuteittu	W(2h) 3)	-01	sht +aa	Soft ann./ Peh. heh- kuteittu	W(2h) 3)	-01	sht+ aa	Soft ann./ Peh. heh- kuteittu	W(2h) 3)	-01 -016	sht+ aa			
Bending, brake forming, roll forming ²⁾ / Taivutus, särmäys, rullamuovaus ²⁾	P	P	RP1	P	P	RP1	RP1	RP1	P	P	NP	NP			
Rubber press forming/ Kumipuristinmuovaus	P	P	RP2	RP2	P	RP2	NP	-	-	-	-	-			
Draw press, expander press, drop hammer forming/ Vetopuristin-, venytys- puristin-, pudotus- vasaramuovaus	P	NP	NP	NP	P	NP	NP	NP	-	-	-	-			
First stage/ Ensimmäinen vaihe	RP3	P	NP	NP	RP3	P	NP	NP	-	-	-	-			
Final stage (sizing)/ Lopullinen vaihe (mittaan viimeistely)															
Stretch press forming/ Venytysmuovaus	P	P	NP	NP	P	NP	NP	NP	P	P	NP	NP			
First stage/ Ensimmäinen vaihe	RP3	P	RP5	P	RP3	P	RP5	P	RP3	P	P	NP			
Final stage (sizing)/ Lopullinen vaihe (mittaan viimeistely)															
Jogging ⁴⁾ / Olastus ⁵⁾	P	P	NP	RP4	P	NP	RP4	RP4	P	P	NP	RP4			
Straightening/Oikaisu	P	P	RP4	RP3	P	RP4	RP3	RP3	P	P	RP4	RP3			
Room temperature/ Huoneen lämpötilalla	-	NP	NP	RP3	-	NP	RP3	RP3	-	NP	NP	RP3			
Hot ⁶⁾ / Kuumalla ⁶⁾															

Lähde: /9/

Laipoitetut kevennysreiät

		TARKASTUS- JA KORJAUSOHJE		HKO-SSC-52																																																																																	
		TECHNICAL INSTRUCTION																																																																																			
Alkuperä: STD 1950 Origin:		Sivu/page: 1/3		Pvm/Date 26.4.1990																																																																																	
Sisältö: Subject: Laipoitetut kevennysreiät. Lip lightening holes.		Korvaa/Replaces		Laati/Compiled by: R Heininen <i>RH</i>																																																																																	
		Tark./Approved by: K Toukonen <i>KT</i>		Hyväks./Confirmed by: V-M Erkkilä <i>VE</i>																																																																																	
		See page 2 and 3		Katso sivu 2 ja 3																																																																																	
																																																																																					
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Gauge Paksuus</th> <th>Dash No Tyypin nro</th> <th>Min ø D1</th> <th>h</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>max. 1,80</td> <td>-2</td> <td>ø 63,5</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>max. 2,54</td> <td>-3</td> <td>ø 100</td> <td>9</td> </tr> <tr> <td>max. 3,175</td> <td>-4</td> <td>ø 120</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td>max. 3,175</td> <td>-5</td> <td>ø 150</td> <td>15</td> </tr> </tbody> </table>		Gauge Paksuus	Dash No Tyypin nro	Min ø D1	h	max. 1,80	-2	ø 63,5	6	max. 2,54	-3	ø 100	9	max. 3,175	-4	ø 120	12	max. 3,175	-5	ø 150	15	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Gauge Paksuus</th> <th>Rb +1,5 -0</th> <th>Rf +1,5 -0</th> <th>A (Ref)</th> <th>B (Ref)</th> </tr> <tr> <th>inch mm</th> <th></th> <th></th> <th></th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>.020 0,51</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>3</td> <td>4,1</td> </tr> <tr> <td>.025 0,63</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>3</td> <td>4,1</td> </tr> <tr> <td>.032 0,81</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>3</td> <td>4,1</td> </tr> <tr> <td>.040 1,07</td> <td>4</td> <td>5</td> <td>4</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>.050 1,27</td> <td>5</td> <td>6,4</td> <td>5</td> <td>6,4</td> </tr> <tr> <td>.063 1,60</td> <td>5</td> <td>6,4</td> <td>5</td> <td>6,4</td> </tr> <tr> <td>.071 1,80</td> <td>5,5</td> <td>7</td> <td>5,5</td> <td>7,3</td> </tr> <tr> <td>.080 2,03</td> <td>6,4</td> <td>8,5</td> <td>6,4</td> <td>8,7</td> </tr> <tr> <td>.090 2,29</td> <td>7</td> <td>9,5</td> <td>6,4</td> <td>9,2</td> </tr> <tr> <td>.100 2,54</td> <td>8</td> <td>10,5</td> <td>7</td> <td>10,1</td> </tr> </tbody> </table>		Gauge Paksuus	Rb +1,5 -0	Rf +1,5 -0	A (Ref)	B (Ref)	inch mm					.020 0,51	3	4	3	4,1	.025 0,63	3	4	3	4,1	.032 0,81	3	4	3	4,1	.040 1,07	4	5	4	5	.050 1,27	5	6,4	5	6,4	.063 1,60	5	6,4	5	6,4	.071 1,80	5,5	7	5,5	7,3	.080 2,03	6,4	8,5	6,4	8,7	.090 2,29	7	9,5	6,4	9,2	.100 2,54	8	10,5	7	10,1		
Gauge Paksuus	Dash No Tyypin nro	Min ø D1	h																																																																																		
max. 1,80	-2	ø 63,5	6																																																																																		
max. 2,54	-3	ø 100	9																																																																																		
max. 3,175	-4	ø 120	12																																																																																		
max. 3,175	-5	ø 150	15																																																																																		
Gauge Paksuus	Rb +1,5 -0	Rf +1,5 -0	A (Ref)	B (Ref)																																																																																	
inch mm																																																																																					
.020 0,51	3	4	3	4,1																																																																																	
.025 0,63	3	4	3	4,1																																																																																	
.032 0,81	3	4	3	4,1																																																																																	
.040 1,07	4	5	4	5																																																																																	
.050 1,27	5	6,4	5	6,4																																																																																	
.063 1,60	5	6,4	5	6,4																																																																																	
.071 1,80	5,5	7	5,5	7,3																																																																																	
.080 2,03	6,4	8,5	6,4	8,7																																																																																	
.090 2,29	7	9,5	6,4	9,2																																																																																	
.100 2,54	8	10,5	7	10,1																																																																																	
<p>Standardseries ø D1 mm. 63,5; 70; 80; 90; 100; 110; 120; 130; 140; 150; 175; 200</p> <p>Application. Intended for aluminium alloys. Other material requires separate Saab approval.</p> <p>Designation. On drawing: Lightening holes - Dash No - D1 per HKO-SSC-52. Example: Lightening holes -3 -120 per HKO-SSC-52. Dimension in mm unless otherwise stated.</p> <p>Remark. For lightening holes ≤ 50 See HKO-SSC-44.</p>		<p>Standardisarjat ø D1 mm. 63,5; 70; 80; 90; 100; 110; 120; 130; 140; 150; 175; 200</p> <p>Käyttö. Tarkoitettu alumiiniseoksille. Muulle materiaalille vaaditaan erillinen Saabin hyväksyminen.</p> <p>Merkintä. Piirustuksessa: Kevennysreiät - tyyppinumero -D1 HKO-SSC-52 mukaan. Esimerkki: Lightening holes -3 -120 per HKO-SSC-52. Mitat mm ellei toisin ole merkitty.</p> <p>Huom. Kevennysreiät ≤ 50, katso HKO-SSC-44.</p>																																																																																			

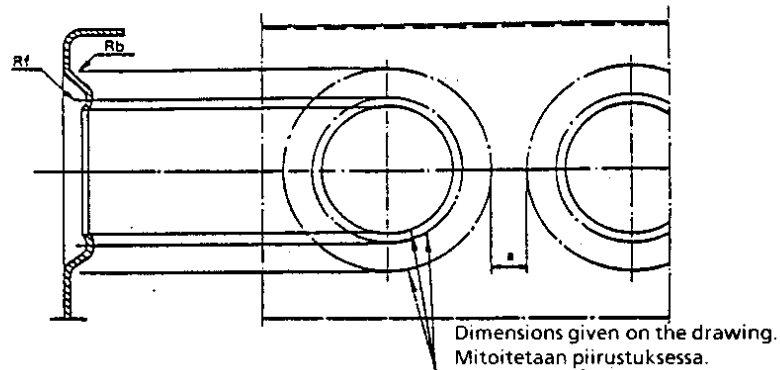
Laipoitetut kevennysreiät



TARKASTUS- JA KORJAUSOHJE
TECHNICAL INSTRUCTION

HKO-SSC-52
Sivu: 2/3

Drawing reference.
Piirustusviite.



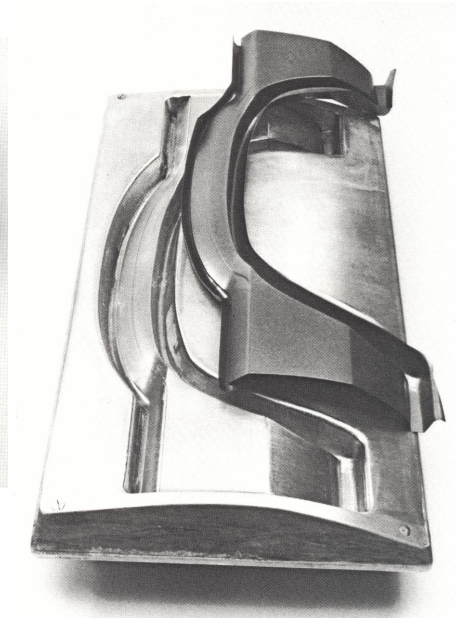
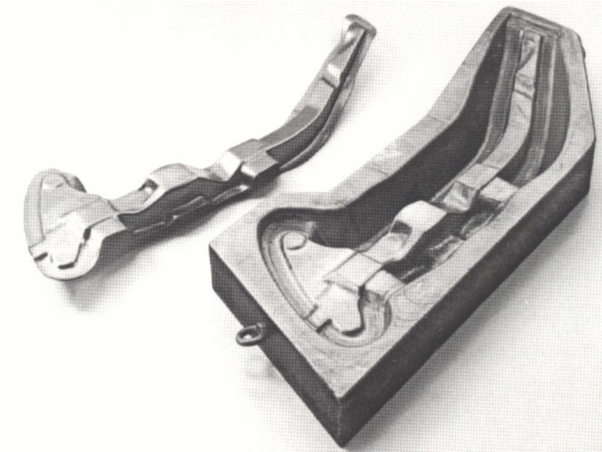
Dim a = Min 12 between lightening holes.
Mitta a = vähintään 12 kevennysreikien välillä.

Gauge Paksuus	inch mm	0,51 0,63 0,81 .020 .025 .032			1,02 .040		1,27 1,60 .050 .063		1,80 .071	
Dash No Tyyppi nro	Dept h Syvyys h	D1	d	C	d	C	d	C	d	C
-2	6	63,5	47,5	79,1	46	80,9	43	83,6	42	85,5
		70	54	85,6	52	87,4	50	90,2	48,5	92
		80	64	95,6	62	97,4	60	100,2	58,5	102
		90	74	105,6	72	107,4	70	110,2	68,5	112
		100	84	115,6	82	117,4	80	120,2	78,5	122
		110	94	125,6	92	127,4	90	130,2	88,5	132
		120	104	135,6	102	137,4	100	142,2	98,5	142
		130	114	145,6	112	147,4	110	150,2	108,5	152
		140	124	155,6	122	157,4	120	160,2	118,5	162
		150	134	165,6	132	167,4	130	170,2	128,5	172
		175	159	190,6	157	192,4	155	195,2	153,5	197
200	184	215,6	182	217,4	180	220,2	178,5	222		

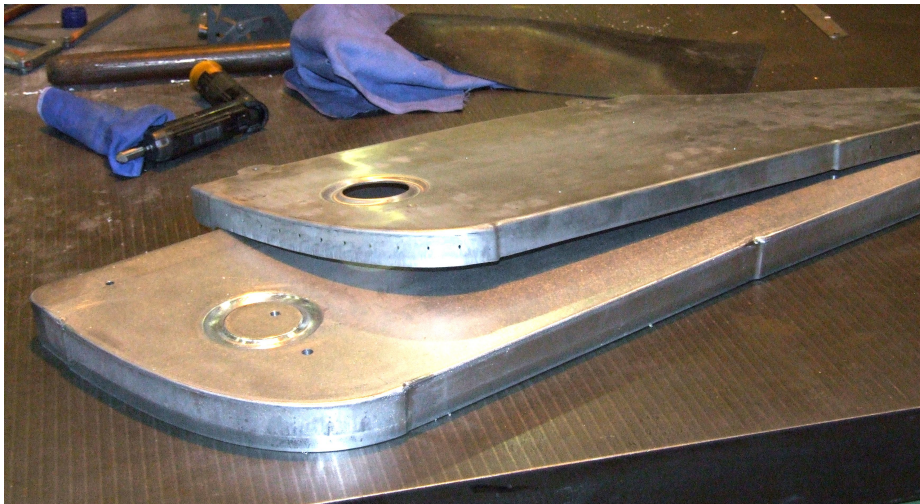
Laipoitetut kevennysreiät

VALMET AIRCRAFT DIVISION		TARKASTUS- JA KORJAUSOHJE TECHNICAL INSTRUCTION		HKO-SSC-52 Sivu: 3/3							
Gauge Paksuus	mm inch	0,51 .020	0,63 .025	0,81 .032	1,02 .040	1,27 .050	1,60 .063	1,80 .071	2,03 .080	2,29 .090	2,54 .100
Dash No Tyypin nro	Depth h Syvyys h	D1									
		100	119,3	80	119,3	78,5	121,1	76,5	123,8	74,5	125,7
		110	129,3	90	129,3	88,5	131,1	86,5	133,8	84,5	135,7
		120	139,3	100	139,3	98,5	141,1	96,5	143,8	94,5	145,7
		130	149,3	110	149,3	108,5	151,1	106,5	153,8	104,5	155,7
-3	9	140	159,3	120	159,3	118,5	161,1	116,5	163,8	114,5	165,7
		150	169,3	130	169,3	128,5	171,1	126,5	173,8	124,5	175,7
		175	194,3	155	194,3	153,5	196,1	151,5	198,8	149,5	200,7
		200	219,3	180	219,3	178,5	221,1	176,5	223,8	174,5	225,7
Gauge Paksuus	mm inch	0,51 .020	0,63 .025	0,81 .032	1,02 .040	1,27 .050	1,60 .063	1,80 .071	2,03 .080	2,29 .090	2,54 .100
Dash No Tyypin nro	Depth h Syvyys h	D1									
		120	96,5	95	144,7	93	147,5	91	149,3	88,5	152,1
		130	106,5	105	154,7	103	157,5	101	159,3	98,5	162,1
-4	12	140	116,5	115	164,7	113	167,5	111	169,3	108,5	172,1
		150	126,5	125	174,7	123	177,5	121	179,3	118,5	182,1
		175	151,5	150	199,7	148	202,5	146	204,3	143,5	207,1
		200	176,5	175	224,7	173	227,5	171	229,3	168,5	232,1
Gauge Paksuus	mm inch	0,51 .020	0,63 .025	0,81 .032	1,02 .040	1,27 .050	1,60 .063	1,80 .071	2,03 .080	2,29 .090	2,54 .100
Dash No Tyypin nro	Depth h Syvyys h	D1									
		150	123	121	178,4	119	181,1	117	183	115	185,8
		175	148	146	203,4	144	206,1	142	208	140	210,8
-5	15	200	173	171	228,6	169	231,1	167	233	165	235,8

Työvälineiden ja tuotteiden esimerkkikuvia

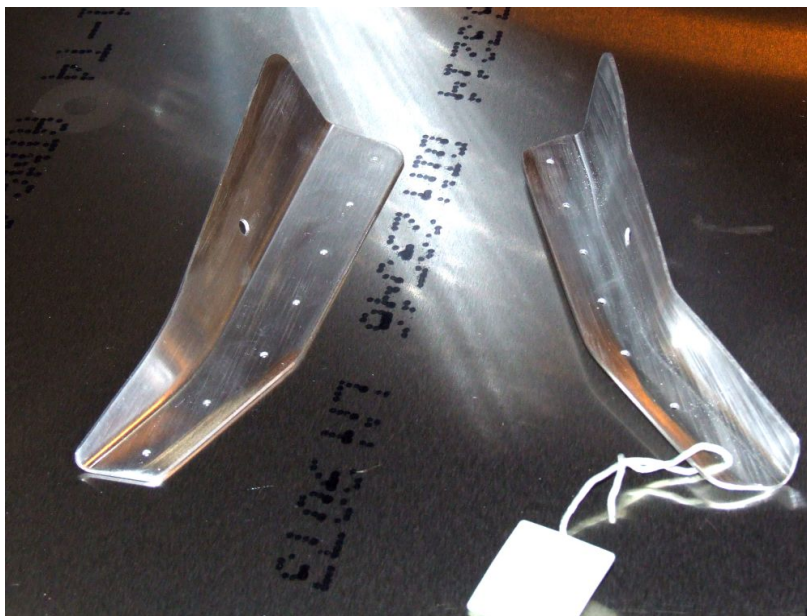


Kumikalvopuristinlestit ja -tuotteet /19/



Kumikalvopuristinlehti ja -tuote

Työvälineiden ja tuotteiden esimerkkikuvia



Kumikalvopuristimella muotoillut tuotteet



Kumikalvopuristinlehti kevennysreiällä

Työvälineiden ja tuotteiden esimerkkikuvia



Kumikalvopuristinlehti kevennysrei'illä

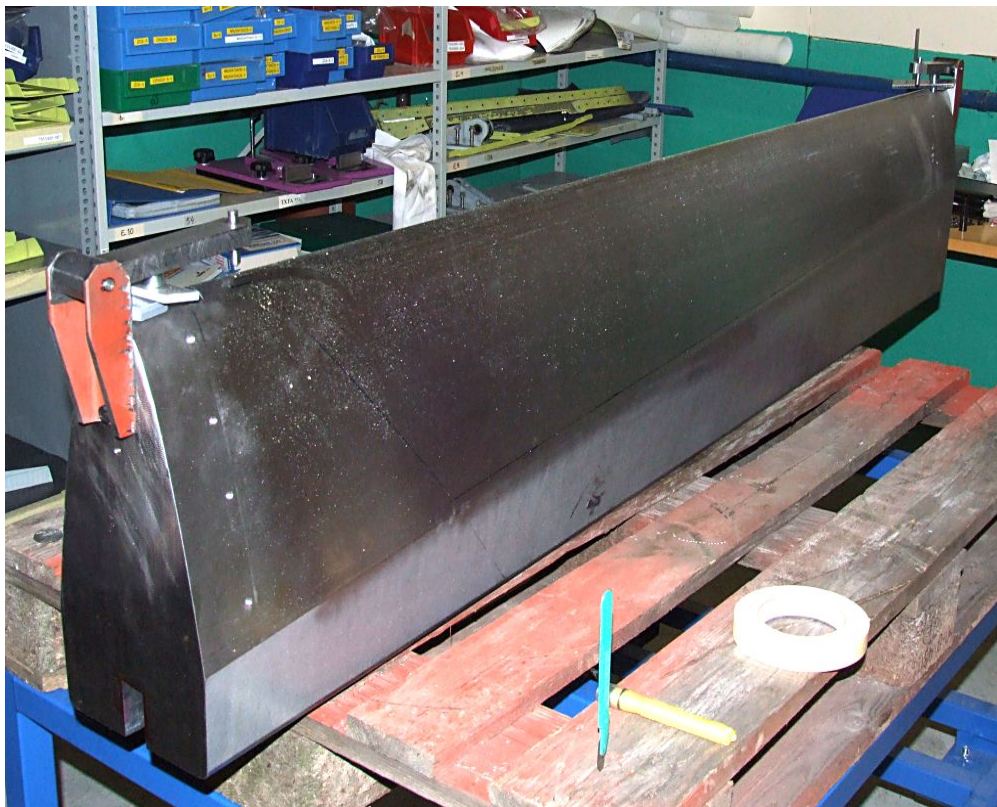


Yksinkertainen kumikalvopuristinlehti

Työvälineiden ja tuotteiden esimerkkikuvia



Venytysmuovauslehti

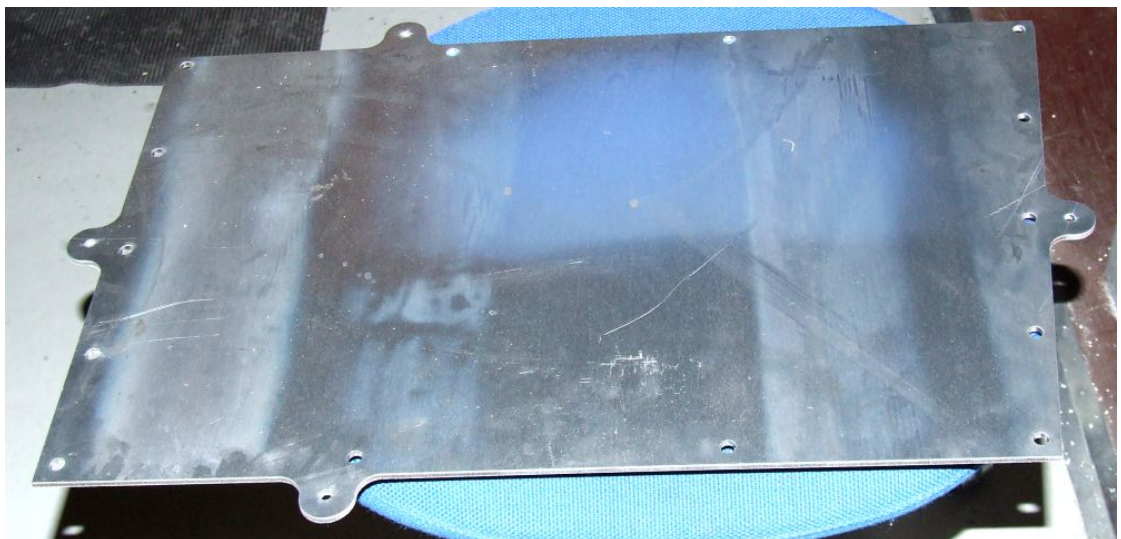


Venytysmuovauslehti

Työvälineiden ja tuotteiden esimerkkikuvia

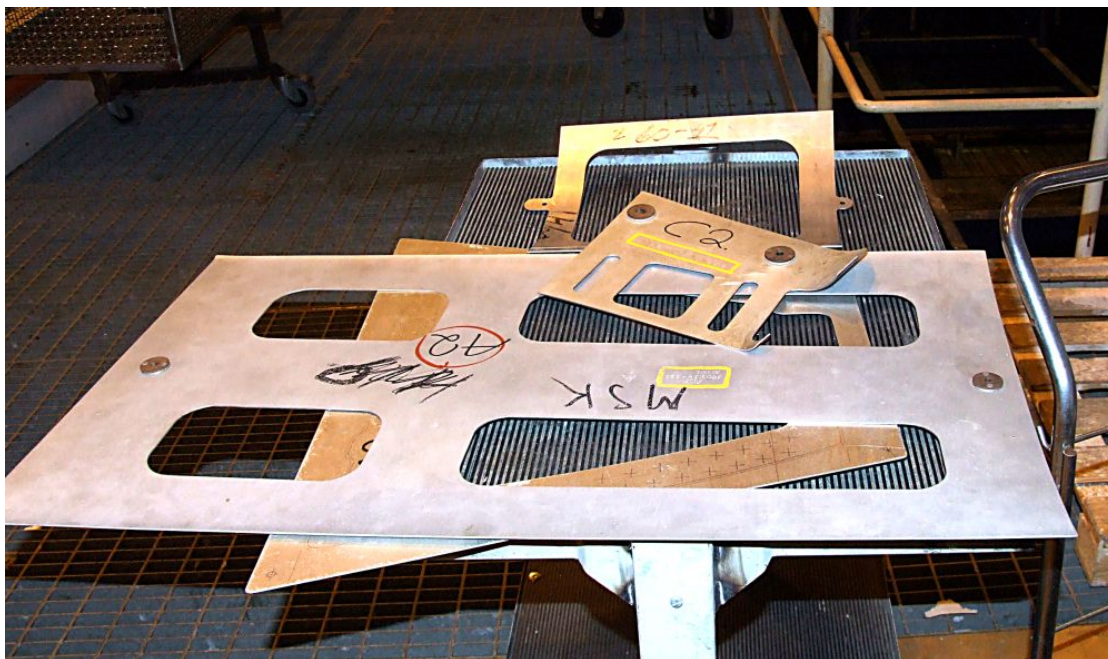


Pyöristämällä ja särmäämällä (olastukset) muotoiltu osa ja tarkastusmalline



Taivuttamaton käsijyrsin- ja porausmalline

Työvälineiden ja tuotteiden esimerkkikuvia



Vahanleikkausmallineita