

# TUTKIMUS RUOSTUMATTOMIEN EN 1.4420 ja 1.4622- TERÄSTEN MUOVATTAVUUDESTA

Aki Ryynänen

Tekniikka ja liikenne opinnäytetyö  
Kone- ja tuotantotekniikka  
Insinööri (AMK)

Kemi 2015

Tekniikka ja liikenne  
Kone- ja tuotantotekniikka

---

<b>Tekijä</b>	Aki Ryyänen	<b>Vuosi</b>	2015
<b>Ohjaaja</b>	Timo Kauppi		
<b>Toimeksiantaja</b>	Juha Kela		
<b>Työn nimi</b>	Tutkimus ruostumattomien EN 1.4420 ja EN 1.4622 -terästen muovattavuudesta		
<b>Sivu- ja liitemäärä</b>	49		

---

Opinnäytetyön aiheena oli tutkia Outokummun kylmävalssattuja ruostumattomia EN 1.4420 ja EN 1.4622- teräksiä. Tavoitteena oli terästen muovattavuuden rajojen tutkiminen ja vertailu tuloksilla EN 1.4301 ja 1.4521-teräksiin. Raja-muovattavuuspiirrosta käytettiin yhtenä vertailun kohteena. Opinnäytetyön ta-voitteena oli myös kerätä teoriaa ruostumattomien terästen muovattavuudesta.

Teoriaosuudessa käydään läpi yleisesti metallien muovausta ja teräksen muo-vattavuusominaisuuksia. Työssä selvitetään myös rajasuhdetta ja rajamuovat-tavuuspiirrosta. Lisäksi käydään läpi testausmenetelmiä ja reiänlaajennusme-netelmiä.

Kokeellisessa osuudessa tehtiin molemmille tutkittaville materiaaleille EN 1.4420 ja EN 1.4622 vetokoe, KWI- ja ISO- standardin mukainen reiänlaajen-nus, Swift kuppikoe rajavetosuhteelle sekä rajamuovattavuuspiirros. Tuloksia vertailtiin EN 1.4301 ja EN 1.4521 teräksiin.

Vertailemalla ruostumattomien terästen rajamuovattavuuspiirroksia voidaan to-deta, että tutkittavalla austeniittisellä EN 1.4420 teräksellä ovat paremmat muo-vattavuusominaisuudet kuin EN 1.4622 ja EN 1.4301 teräksillä. Ferriittiselle ruostumattomalle teräkselle EN 1.4521 ei löytynyt rajamuovattavuuspiirrosta.

Avainsanat                      ruostumaton teräs, muovaus, muovattavuus, kylmä-valssattu

Industry and Natural Resources  
Mechanical and Production Engineering

---

<b>Author</b>	Aki Ryyänen	<b>Year</b>	2015
<b>Supervisor(s)</b>	Timo Kauppi		
<b>Commissioned by</b>	Juha Kela		
<b>Subject of thesis</b>	Study of the formability of EN 1.4420 and EN 1.4622 stainless steels		
<b>Number of pages</b>	49		

---

The subject of this thesis was to study cold rolled stainless steels EN 1.4420 and EN 1.4622 manufactured by Outokumpu Oy. The aim was to explore the limits of formability and compare the results to the reference materials EN 1.4301 and EN 1.4521. Forming limited drawing was used as one of the comparison. The aim of this study was also to collect the theory of stainless steels formability.

The theory part includes basics for metal forming and steel forming properties. These studies also sort out forming limited drawing and limited drawing rotation. Moreover, these studies go through the most important testing methods and also hole expansion methods.

A tensile test, KWI and ISO standard hole expansion, Swift test, limited drawing ratio and forming limited drawing were made on both of the materials EN 1.4420 and EN 1.4622. All results were compared to EN 1.4301 and 1.4521 cold rolled steels.

Comparing stainless steels forming limited drawings it can be said that EN 1.4220 austenitic steel has better formability than EN 1.4622 or EN 1.4301 steels. A forming limited drawing was not found on ferritic stainless steel EN 1.4521.

**Key words** stainless steel, forming, formability, cold rolled

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	8
2	TERÄKSEN MUOKKAAMINEN .....	10
2.1	Kuumavalssaus .....	10
2.2	Kylmämuovaus .....	12
3	OHUTLEVYJEN MUOVATTAVUUS .....	15
3.1	Mekaaniset ominaisuudet .....	15
3.2	Muokkauslujittaminen .....	16
3.3	Plastinen venymäsuhde $r$ .....	17
3.4	Rajavetosuhde LDR .....	19
3.5	Swiftin kuppikoe .....	20
3.6	Rajamuovattavuus .....	20
4	RAJAMUOVATTAVUUS JA SEN MÄÄRITTÄMINEN .....	22
5	REIÄNLAAJENNUKSEN TESTAUSMENETELMÄT .....	24
5.1	Iso- standardin mukainen reiänlaajennustesti .....	24
5.2	KWI- reiänlaajennuskoe .....	25
6	TESTAUSMENETELMÄT .....	27
6.1	Vetokoe .....	27
6.2	Vetokoestandardi SFS ISO EN 6892-1 .....	28
6.3	Nakajima-testi .....	29
7	KOEMATERIAALIT JA MENETELMÄT .....	31
7.1	Koeteräket .....	31
7.2	Vertailumateriaalit .....	31
7.3	Mekaaniset ominaisuudet .....	32
7.4	LDR-testit .....	33
7.5	FLC-testit .....	33
7.6	Reiänlaajennustetit .....	33
8	TULOKSET .....	35
8.1	Vetokoe .....	35
8.2	Rajavetosuhde LDR .....	37
8.3	Rajamuovattavuuspiirros FLC .....	39
8.4	KWI- reiänlaajennuskoe .....	40
9	TULOSTEN TARKASTELU .....	42

9.1	Mekaaniset ominaisuudet .....	42
9.2	Syvävedettävyys .....	43
9.3	Rajamuovattavuus .....	45
9.4	Reiänlaajenemiskyky .....	46
10	POHDINTA .....	47
	LÄHTEET .....	48

## ALKUSANAT

Haluan kiittää Lapin ammattikorkeakoulun tekniikan TKI- osastoa ja etenkin TkL Timo Kauppia työn ohjaamisesta ja valvonnasta. Suuret kiitokset kuuluvat myös Raimo Vierelälle kokeiden suorittamisen osalta. Lisäksi haluan kiittää työn toimeksiantajaa Juha Kelaa Outokumpu Oy:stä.

Lopuksi haluan antaa kiitokset perheelleni ja ystäville tuesta opinnäytetyön tekemisen aikana.

Kemissä 2015

*Aki Ryynänen*

## KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

FLC	Rajamuovattavuuskäyrä (Forming Limited Curve)
FLD	Rajamuovattavuuspiirros ( Forming Limited diagram)
LDR	Rajavetosuhde (Limited Drawing Ratio)
$r$	Plastinen venymäsuhde
$r_m$	Murtolujuus
$r_{p0,2}$	Myötölujuus
$n$	Muokkauslujittumiseksponentti

## 1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö tehdään Lapin ammattikorkeakoulun materiaalin käytettävyyden tutkimusryhmän ennakkointiprosessiin kuuluvana työnä. Opinnäytetyön toimeksiantajana oli tutkimusinsinööri Juha Kela Outokumpu Oy:stä. Työssä tutkittiin Outokummun uusia kylmävalssattuja ruostumattomia EN 1.4420 ja EN 1.4622 teräksiä ja niiden muovausominaisuuksia.

Opinnäytetyön aiheen taustalla oli tutkia uusia korkea kromipitoisia ruostumattomia teräksiä. Korkeamman kromipitoisuuden ansiosta uudet materiaalit ovat halvempia valmistaa, kuin paljon kallista nikkeliä sisältävät teräslaadut. Tutkittavien ja vertailumateriaalien käyttökohteet ovat samankaltaisia, joten uusien terästen muovausominaisuuksien tutkiminen on kilpailukyvyn kannalta tärkeää.

Teoriaosuudessa käsitellään ruostumattomien terästen kuumavalssausta ja kylmämuovausta, sekä niiden tärkeimpiä ominaisuuksia ja testausmenetelmiä. Kokeellisessa osuudessa selvitettiin terästen mekaaniset ominaisuudet ja syvävedettävyyttä kuvaavat tasoanisotropiaparametrin  $r$ -arvot vetokokeiden avulla. Tutkimuksissa tehtiin lisäksi rajavetosuhteen määrittäminen swiftin- kuppiko- keella ja muodostettiin rajamuovattavuuspiirros. Reiänlaajennustestit kuuluivat myös kokeelliseen osuuteen.

Opinnäytetyön tavoitteet ja rajaus asetettiin seuraavasti:

Opinnäytetyössä tutkitaan Outokummun uusia kylmävalssattuja 20%Cr teräksiä (EN 1.4420 ja 1.4622). Tavoitteena on:

1. tutkia mitkä ovat ao. materiaalien muovattavuuden rajat
2. tehdä rajamuovattavuuspiirros molemmille materiaaleille
3. selvittää, minkälainen terästen muovattavuus on verrattuna verrokkimateriaaleihin.
4. Kerätä teorialietoa ruostumattomien terästen muovattavuudesta.



Työn rajattiin koskemaan terästen EN 1.4420 ja EN 1.4622 osalta terästen mekaanisia ominaisuuksia, reiänlaajennusta sekä rajamuovattavuutta. Tuloksia vertailtiin tulosten osalta 1.4301 ja EN 1.4521 teräksiin.

## 2 TERÄKSEN MUOKKAAMINEN

Teräs saa halutun mukaisen kemiallisen koostumuksen terästehtaan sulatto-prosessissa. Ruostumattomien terästen valmistuksessa raaka-aineet sulate-taan, terässulalle tehdään AOD – konvertointi ja senkkakäsittely ennen sen jähmettämistä aihiksi jatkuvavalussa.

Syntyvä teräsaihio on mitoiltaan sellainen, että vaaditaan sen muokkaamista useassa eri vaiheessa, ennen kuin siitä voidaan tehdä erilaisia lopputuotteita. Ensi vaiheessa aihio kuumavalssataan ja sen jälkeen tarvittaessa edelleen kyl-mävalssataan haluttuun loppumittaan asiakastoimituksia varten. Seuraavassa käydään läpi kuuma- ja kylmämuokkauksen perusteita.

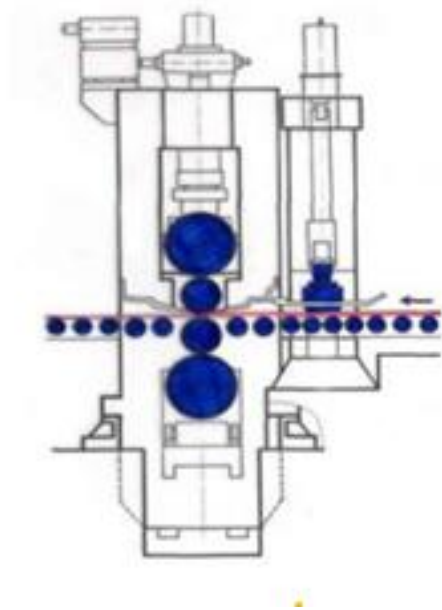
### 2.1 Kuumavalssaus

Muodonmuutosprosessia, jossa metallia muokataan plastisesti ajamalla kappale valssien välistä niin, että sen poikkipinta ohenee, sanotaan valssaukseksi. Mikäli lämpötila on niin korkea ( $> 0.4 \times T_m$ ), että elpymistä (toipuminen, rekristallisaatio) tapahtuu muokkauksen aikana tai välittömästi sen jälkeen, on ky-seessä kuumavalssaus. (Kauppi 2015, 12)

Rekristallisaatio aikaansaa sen, että pysyvään muodonmuutokseen vaadittava valssausvoima ei kasva olennaisesti valssauksen edetessä eli muokkauslujit-tuminen on huomattavasti lievempää kuin tehtäessä muokkausta rekristallisaatiolämpötilan  $T_{nr}$  alapuolella. Näin päästään suuriin mittareduktioihin ja samalla tapahtuu teräksen raerakenteessa edullisia muutoksia. Kuumamuokkaukseen soveltuvan lämpötila-alueen ylärajan muodostaa soliduslämpötila  $T_s$  ja alarajan rekristallisaatiolämpötila  $T_{nr}$ . Hyvin korkea lämpötila johtaa kuitenkin karkeara-keiseen rakenteeseen liiallisen rakeenkasvun johdosta. (Kauppi 2015, 13)

Ruostumattomien terästen kuumavalssauksessa aihiot tulevat lämpöeristetyissä siirtovaunuissa terässulatolta. Kuumavalssaamalla aihiot asetetaan askelpalkki-

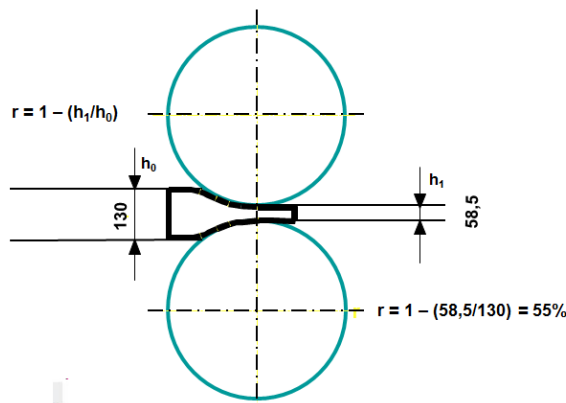
uuniin, jonka lämpötila on noin 1260°C astetta. Askelpalkkiuunit toimivat häkä- ja propaanipolttoaineella. Aihioita kuumennetaan 2 - 3 tuntia, riippuen kummasa uunissa ne ovat. Kuumennuksen jälkeen aihiot siirtyvät rullaradalle, jota pitkin ne siirtyvät etuvalssaimelle. Esivalssauksessa karkea jäähtymisrakenne uusiutuu pistojen aikana ja välissä tapahtuvan rekristallisaation ansiosta. Raekoko jää kuitenkin vielä suureksi korkeasta lämpötilasta johtuen. Etuvalssaimen tehtävänä on ohentaa aihiot haluttuun paksuuteen. Valssausvoima on maksimissiiin 4400 t ja valssauksen aikana aihiot jäähtyvät 1100°C asteeseen. Etuvalssaimen jälkeen levy siirtyy nauhavalssaimelle, jossa tuote kelataan valssaimien läpi rullalle. Nauhavalssaimella materiaali saadaan loppupaksuuteen 1,9 - 12,7 mm.( Kauppi 2015, 8 – 10. )



Kuva 1. Kuumavalssauksessa käytettävien etu- ja pystyvalssaimen periaatekuva (Kauppi 2015, 37)

Valssauksessa tapahtuvan ainepaksuuden suhteellinen oheneminen määritellään reduktiolla. Se lasketaan kuvan 2 merkintöjä käyttäen kaavasta:

$$r = 1 - \frac{h_1}{h_0}$$



Kuva 2. Kuumavalssauksessa tapahtuva reduktio. (Kauppi, opintomateriaalit 2015, 14)

Aihion paksuus on n. 175 – 185 mm ja kuumavalssatun nauhan loppupaksuus vaihtelee välillä 2,4 – 12,7 mm. Tämä tarkoittaa sitä, että kuumavalssauksessa kokonaisreduktio nousee jopa yli 98%. (Kauppi 2015, 20.)

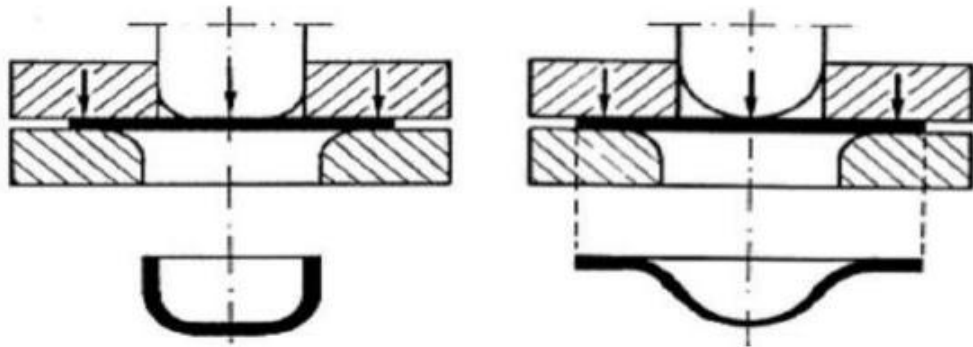
Kuumavalssauksen jälkeen kuumanauhat jäähdytetään mahdollisimman nopeasti n. 600 – 650° C lämpötilaan. Hiiliteräksistä poiketen nopea jäähdyttäminen ei juurikaan vaikuta teräksen ominaisuuksiin, koska sen aikana ei tapahdu faasimuutoksia. Monilla teräksillä lopputuotteen mekaanisiin ominaisuuksiin vaikuttaa kuumavalssauksessa syntyvä suuntaisuus eli tekstuuri. Austeniittisilla ja täysin ferriittisillä (esim. EN 1.4521 ja 1.4622) teräksillä valssaus ei vaikuta tekstuuriin kovinkaan paljon. (Kauppi 2015, 26.)

## 2.2 Kylmämuovaus

Teräkseen saadaan syntymään hyvinkin moninaisia ja mittatarkkoja muotoja kylmämuovauksella. Se suoritetaan matalissa lämpötiloissa so. selvästi rekristallisaatiolämpötilan alapuolella. Tavoitteena on saada aikaan halutun muotoinen tuote ilman sen vaurioitumista ja ilman liiallista ainespaksuuden ohenemista. Hyvä lujuus, mittatarkkuus, pinnanlaatu ja nopea valmistus ovat kylmämuovattujen tuotteiden etuja.

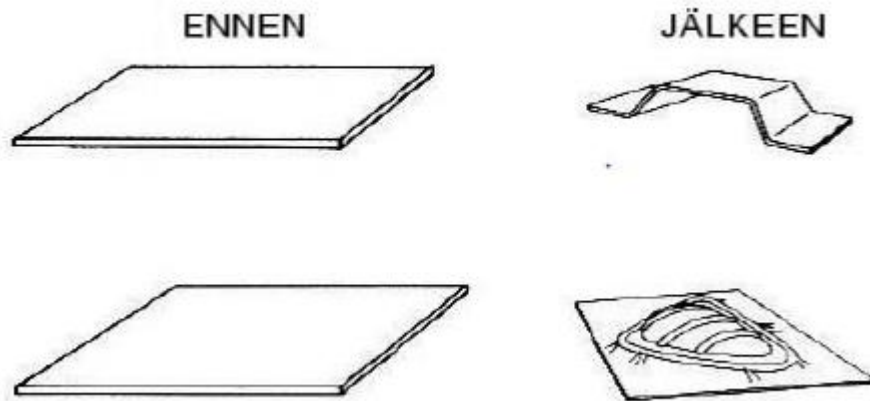
Levyn muovausta, jossa materiaalin virtaus on estetty, kutsutaan venytysmuovattavuudeksi. Venytysmuovausta käytetään dekoratiivisissa osissa ja lentokoneteollisuudessa. Venytysmuovaus on silloin käytössä, kun halutaan valmistaa tuotteita tai osia, joilla on suuri pyöristyssäde.

Kuvassa 3 on esitetty venytysmuovauksen periaate. Vetorengas ja levypidätin avulla estetään aihion reunojen liukuminen. Aihio venyy säteen sekä tangentin suunnassa, koska vetorengas estää materiaalin yli liukumisen. Levy ohenee ja pinta-ala kasvaa. Levyn ohenemisen johdosta venytysmuovauksella ei saada aikaan yhtä syviä muotoja kuin syvävedolla. Venytysmuovausta käytetään yleensä syvävedon yhteydessä esimerkiksi silloin, kun halutaan kupera-pohjaisia tuotteita/osia.



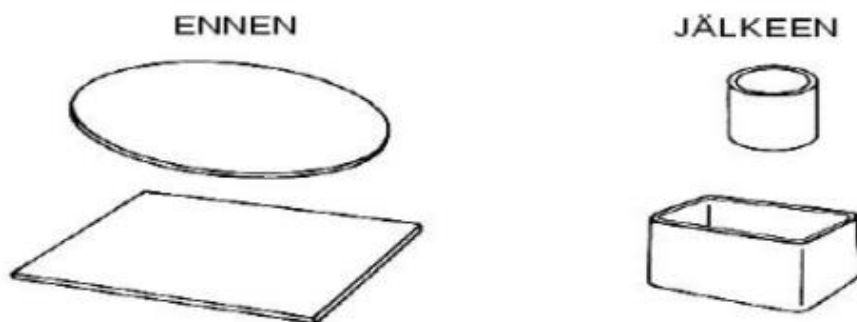
Kuva 3. Syvävedon (vasemmalla) ja venytysmuovauksen (oikealla) periaate kaaviollisesti esitettynä (Kivivuori 2009, 22)

Kuvassa 4 nähdään periaatekuva tilanteesta ennen muovausta ja venytysmuovauksen jälkeen.



Kuva 4. Venytysmuovattavuudessa käytetään vetorengasta ja levypidintä aihion liukumisen estämiseksi. (Kivivuori 2009, 22)

Syvävedossa levyaihio muovataan yleensä astiamaiseksi tai kuppimaiseksi tuotteeksi, ilman aihion seinämänpaksuuden tarkoituksellista muutosta. Aihio liukuu vedon aikana vetoreenkaan ja pidätinlevyn välistä painimen pakottamana ja muovautuu vetoreenkaan pyöristyksen yli kuppimaiseksi tuotteeksi (ks. kuva 3 ja kuva 5). (Kivivuori 2009, 22)



Kuva 5. Syvävedon tuloksena syntyy kuppimaisia tuotteita. (Kivivuori 2009, 22)

### 3 OHUTLEVYJEN MUOVATTAVUUS

Ohutlevyiksi voidaan kutsua kylmävalssattuja levyjä, jotka ovat materiaalipaksuudeltaan alle 3 mm:n. Kylmävalssatut ohutlevyt valmistetaan mittatarkoiksi ja pinnanlaadultaan hyviksi. Kuumavalssattuja ohutlevyjä on saatavilla 1,5–3 mm:n materiaalipaksuudesta lähtien ja niitä käytetään kohteisiin, joissa pinnanlaatuvaatimukset ovat alhaisemmat. (Ahtonen, 2011, 22)

Ruostumattomat teräkset luokitellaan niiden metallurgisen rakenteen perusteella austeniittisiin, ferriittis-austeniittisiin, ferriittisiin ja martensiittisiin laatuihin. Eniten ohutlevyinä käytetään austeniittista terästä. Austeniittisilla laaduilla on parempi yleinen korroosionkestävyys kuin ferriittisillä laaduilla. Ruostumattomia teräsohutlevyjä toimitetaan rullissa tai määrämittaan leikattuina arkkeina useisiin erilaisiin viimeistelytiloihin valmistettuna, kuten esimerkiksi peitattuna, harjattuna, hiottuna, kiiltohehkutettuna, kuviovalssattuna tai irrotettavalla suoja-muovilla pinnoitettuna. (Ahtonen, 2011, 24) Ohutlevyjen muovattavuutta voidaan tutkia eri menetelmillä. Käydään seuraavassa läpi niitä.

#### 3.1 Mekaaniset ominaisuudet

Teräksen mekaanisia ominaisuuksia ovat esimerkiksi myötö- ja murtolujuus, tasa- ja murtovenymä ja kovuus. Ne voidaan määrittää ainetta rikkovalla aineenkoetuksella. Lähtökohtana teräksen muovaamiselle on plastiselle muodonmuutosalueelle pääseminen. Tämä vaatii sellaisen muovausvoiman käyttämisen, jossa teräkseen vaikuttava jännitys ylittää sen myötölujuuden  $R$ . Aineen sitkeyttä kuvataan usein myötösuhteella, joka määritellään teräksen myötö- ja murtolujuuden osamääränä:  $R_{p0,2}/R_m$ . Käyttösovelluksesta riippuen myötösuhteen arvoa 0,7 voidaan pitää riittävänä. (Vierelä, 2012, 9)

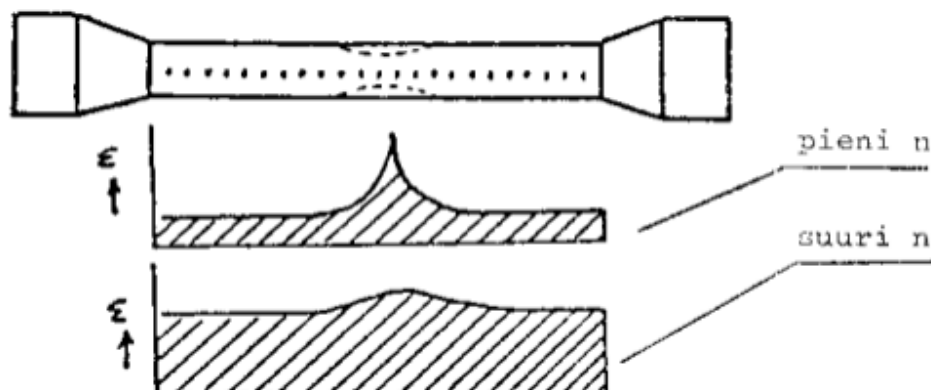
Murtovenymää  $A$  käytetään myös sitkeyden ilmaukseen. Murtovenymä ilmoitetaan prosentteina alkuperäisestä mittapituudesta. Koska murtovenymään sisältyy myös kurouma-alueen venymä, joka riippuu sauvan geometriasta, niin mur-

tovenymää ei voida pitää materiaalivakiona. Murtovenymä on helppo määrittää ja siten helppo käyttää materiaalien sitkeyden vertailemiseen. (Vierelä, 2012, 9)

### 3.2 Muokkauslujittaminen

Plastisen muodonmuutoksen seurauksena muuttuvat lähes kaikki teräksen ominaisuudet. Erityisesti havaitaan muokkauslujittamista ja sen seurauksena muodonmuutoskyvyn heikkenemistä. Metallien plastinen muodonmuutos on seurausta dislokaatioiden liikkumisesta, joiden liikkuvuuden vaikeuttaminen on yksi teräksen lujittamisen perusteista. Metallia kylmämuokatessa tapahtuu muokkauslujittumista ja muodonmuutoskyvyn heikkenemistä. Dislokaatiotiheys kasvaa muokkauksen seurauksena, jolloin niiden liike vaikeutuu. (Meskanen & Toivonen, 21)

Muokkauslujittamiskseenponentti  $n$  kuvaa teräksen muokkauslujittumistaipumusta. Teräksen lujittuminen on voimakkaampaa  $n$ -arvon kasvaessa. Teräksessä, jossa on korkea  $n$ -arvo, muodonmuutos jakaantuu laajalle alueelle ja muovattavan kappaleen seinämä ei ohene liikaa paikallisesti. Pienen  $n$ -arvon omaavilla materiaaleilla venyminen tapahtuu yhdessä paikassa ja ratkeamisen mahdollisuus kasvaa (ks. kuva 6). (Vierelä 2012,10.)



Kuva 6. Muokkauslujittumisen vaikutus materiaalin venymään. (Vierelä 2012, 10).



### 3.3 Plastinen venymäsuhde $r$

Vetokokeella voidaan määritellä plastinen venymäsuhde  $r$ . Venymäsuhde määritteellään vetokokeessa tapahtuvan poikittais- ja paksuussuuntaisen venymän suhteeksi. Vetosauvaan piirretään venymämittausmerkinnät, joista voidaan mitata pitkittäinen ja poikittainen venymä. Venymämerkkien perusteella voidaan laskea (kaava1) paksuussuuntainen venymiskomponentti ja plastinen venymäsuhde  $r$ . Materiaalin  $r$ -arvon ollessa 1, eli kun levy venyy joka suuntaan yhtä paljon, on materiaali silloin isotrooppinen. Levyn muokkauksen kannalta edullisin vaihtoehto on kuitenkin anistrooppinen levy, jolla  $r$ -arvo on 1,6 - 1,9. Anistrooppisesta materiaalista voidaan valmistaa syvempiä tuotteita.

(1)

$$r = \frac{e_{\text{poikittain}}}{e_{\text{paksuus}}}$$

missä  $r$  on plastinen venymäsuhde

$e_{\text{poikittain}}$  on koesauvan levynsuuntainen plastinen venymä

$e_{\text{paksuus}}$  on koesauvan paksuussuuntainen plastinen venymä

(Kivivuori Seppo 2011.)

Valssattu teräslevy on yleensä anisotrooppista tason suunnassa, siksi sen syvävedettävyyttä kuvaavaa keskimääräistä  $r$ -arvoa määritettäessä käytetään valssaussuuntaan nähden pitkittäin (engl. RD), poikittain (engl. TD) ja 45°:n kulmassa leikattuja vetokoesauvoja. Näistä erisuuntaisista vetokoesauvoista määritellään jokaisesta erikseen plastisenvenymäsuhteen arvo  $r$ , joka merkitään alaindeksillä asteiden mukaan valssaussuuntaan nähden. Alaindeksiin merkitään standardin ISO 10113:n mukaan myös plastisen venymän prosentuaalinen kohta, jolta mittaus on suoritettu, esim.  $r_{45/20}$ , kun se tehdään 20 % pysyvän muodonmuutoksen jälkeen. Plastisen venymäsuhteen keskiarvo lasketaan saatujen  $r$ -arvojen avulla kaavan 1 mukaisesti. Luotettavan plastisen venymäsuhteen keskiarvon saavuttamiseksi on käytettävä jokaisen erisuuntaisen  $r$ -arvon mittaamisessa venymää samalta alueelta.

$$\bar{r} = \frac{r_{0/20} + 2r_{45/20} + r_{90/20}}{4} \quad (2)$$

missä

$r_{0/20}$	on	plastinen venymäsuhde valssaus suunnan suuntaisesti työstetystä koesauvasta 20 % pysyvän venymän jälkeen määritettynä
$r_{45/20}$	on	plastinen venymäsuhde 45 asteen kulmassa valssaus suuntaan nähden työstetystä koesauvasta 20 % pysyvän venymän jälkeen määritettynä
$r_{90/20}$	on	plastinen venymäsuhde kohtisuoraan valssaus suuntaan nähden työstetystä koesauvasta 20 % pysyvän venymän jälkeen määritettynä

Levyn anisotrooppisuus tason suunnassa saadaan käyttämällä samoja mitattuja  $r$ -arvoja, kuin plastisen venymäsuhteen keskiarvon laskemisessakin.  $R$ -arvon ollessa nolla sen syvävedettävyyssominaisuudet ovat parhaat mahdolliset, koska levy on tällöin isotrooppista tason suunnassa. Tasoanisotropian laskennassa käytetään kaavaa 2.

$$\Delta r = \frac{r_{0/20} + r_{90/20} - 2r_{45/20}}{2} \quad (3)$$

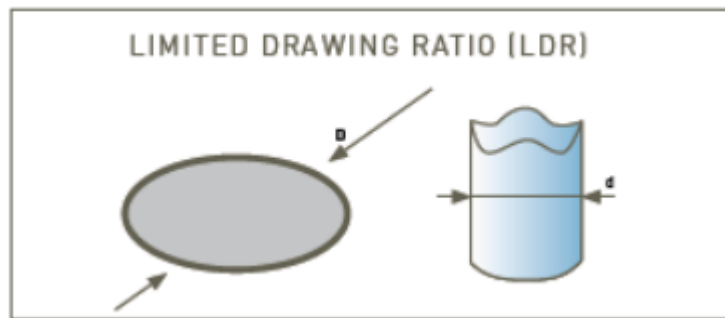
missä

$r_{0/20}$	on	plastinen venymäsuhde valssaus suunnan suuntaisesti työstetystä koesauvasta
$r_{45/20}$	on	plastinen venymäsuhde 45 asteen kulmassa valssaus suuntaan nähden työstetystä koesauvasta
$r_{90/20}$	on	plastinen venymäsuhde kohtisuoraan valssaus suuntaan nähden työstetystä koesauvasta

(Juntunen 2010, 25.)

### 3.4 Rajavetosuhde LDR

Rajavetosuhteesta saatava arvo kuvaa ohutlevyjen syvävedettävyyttä. Valmistustekniikasta ja materiaalista riippuen, voidaan rajavetosuhdetta pitää vakiona. Rajavetosuhteella voidaan määrittellä mahdollisimman suuri aihion ulkohalkaisija vedettävälle syvävetotuotteelle. Voidaan sanoa, että rajavetosuhteen arvo on mahdollisen aihion suhde kupin halkaisijaan, näin ollen tuloksena olisi ehjä syvävedetty kuppi (kuva 6.). Yleensä rajavetosuhdetta määriteltäessä käytetään tapaa, jossa vertaillaan painimen suhdetta alkuperäiseen aihion halkaisijaan. (kaava 2.) Syvävedettävyyden aihion määrittelyssä voidaan hyödyntää maksimirajavetosuhteen arvoa. ( Juntunen 2010,17.)



Kuva.7 Aihion suhde kupin halkaisijaan.( Juntunen 2010, 17.)

(2)

$$\text{LDR} = \frac{D}{d}$$

Missä

LDR on rajavetosuhde  
D on aihion halkaisija  
d on kupin halkaisija

(3)

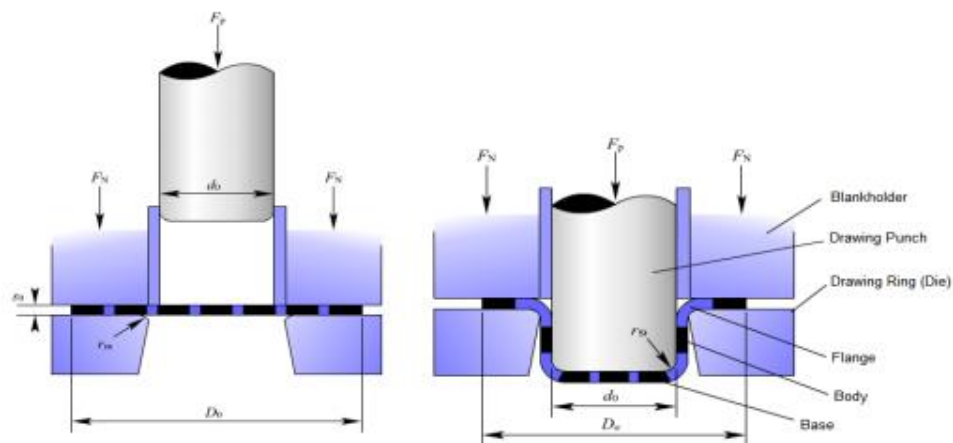
$$\text{LDR}_{\max} = \frac{D_0}{d_0}$$

Missä

$\text{LDR}_{\max}$  on maksimirajavetosuhde  
 $D_0$  on aihion halkaisija  
 $d_0$  on painimen halkaisija

### 3.5 Swiftin kuppikoe

Swiftin kuppikokeella voidaan testata rajavetosuhdetta, kokeen periaate on esitetty kuvassa 8. Aihiota ( $D_0$ ) painetaan tietyn halkaisijan omaavalla tasapäisellä painimella ( $d_0$ ). Aihio on kiinnitettynä pidinrenkaiden välissä puristettuna sopivalla voimalla. Aihion halkaisijaa kasvatetaan niin, että kuppi murtuu. Painimen ollessa 50 mm, valitaan aihiot esimerkiksi väliltä 90 - 120 mm. Rajavetosuhde lasketaan kaavojen 2 - 3 avulla viimeisimmän ehjän koeaihion kupin halkaisijan mukaan. Kuppikoetta tehtäessä on valittava sisähalkaisijaltaan oikean kokoinen vetorengas (drawing die), tällöin painimen ja renkaan välitys on riittävän suuri. Swiftin kokeesta saatava on tulos todellista suurempi, kun mikä on todellisessa prosessissa saatava. ( Juntunen 2010, 18.)



Kuva. 8 Swiftin kuppikokeen periaate. ( Kauppi, Linke, Piisilä, Välimaa & Kesti 2013.)

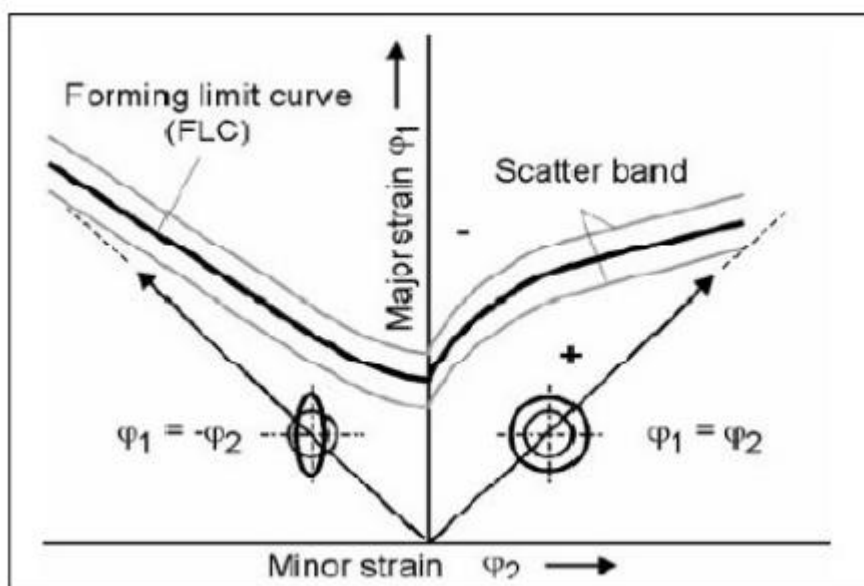
### 3.6 Rajamuovattavuus

Ohutlevyjen rajamuovattavuudesta on ensimmäiset merkinnät vuodelta 1946, jolloin Gensamer julkaisi rajamuovattavuuspiirroksia. Nykyaikaisen rajamuovattavuuspiirroksityypin kehittämisen aloitti Keeler-niminen tutkija vuonna 1964. Goodwin jatkoi Keelerin aloittamia tutkimuksia aina 60-luvun lopulle asti. Rajamuovattavuusdiagrammia (FLD) kutsutaankin Keeler-Goodwin-diagrammiksi. Tutkijat ovat kehittäneet yli 40-vuoden ajan erilaisia tutkimusmenetelmiä ohutlevyjen rajamuovattavuuden tutkimus- ja mittausmenetelmiin. Monet standardisoidut testausmenetelmät ovat saaneet nimet tutkijoidensa mukaan esimerkiksi

Nakajima ja- Marciniack-testit. Testausmenetelmien standardisoinnilla pyritään yhtenäistään testejä, jotta tulokset olisivat vertailu kelpoisia olosuhteista riippumatta. Rajamuovattavuuspiirroksia voidaan hyödyntää tilanteissa, joissa muovauksessa esiintyy ongelmia. FEM- simuloinnissa, jossa on usein ongelmana materiaalin repeytymä, voidaan apuna käyttää rajamuovattavuuskäyrää. Ilman käyrää tulisi simulointi arvioida paksuusjakauman perusteella. (Juntunen 2010, 22.)

#### 4 RAJAMUOVATTAVUUS JA SEN MÄÄRITTÄMINEN

Puhuttaessa ohutlevyjen rajamuovattavuudesta käytetään yleisesti kahta termiä rajamuovattavuuskäyrä (Forming Limited Curve, FLC) ja rajamuovattavuuspiirros (Forming Limited Diagram, FLD). Monissa tapauksissa näillä tarkoitetaan samaa asiaa ja nämä liittyvät vahvasti toisiinsa. Rajamuovattavuuspiirros sisältää yhden tai useamman rajamuovattavuuskäyrän. Piirroksen avulla voidaan erottaa toisistaan onnistuneet ja murtumaan johtaneen muovauksen hajonnan (kuva 7). Voidaan siis sanoa, että rajamuovattavuuskäyrä määrittää rajan metallien murtumiselle.

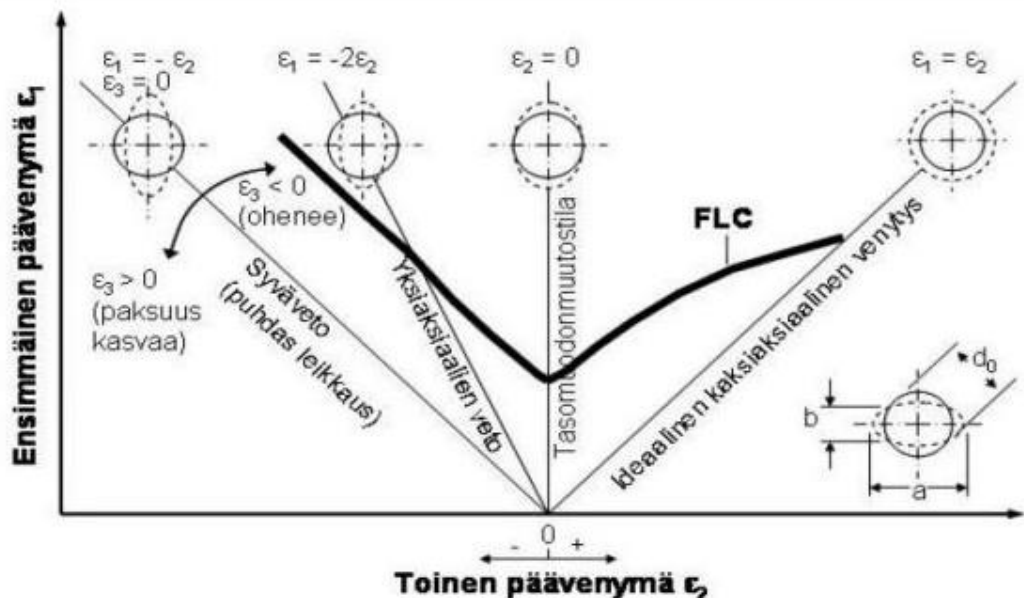


Kuva 9. Rajamuovattavuuspiirros, jossa on nähtävissä rajamuovattavuuskäyrä hajonta-alueineen (Juntunen 2010, 8)

Rajamuovattavuuspiirroksessa olevaan rajamuovattavuuskäyrän asemaan, muotoon ja hajonta-alueeseen vaikuttavat kokeelliset olosuhteet ja materiaalin ominaisuudet. Työkalujen muodot, kitka, ohutlevyjen paksuus ja muut materiaaliominaisuudet vaikuttavat ensisijaisesti. Materiaaliominaisuuksien vaikutus johtuu pääasiassa kemiallisesta koostumuksesta, mekaanisten ominaisuuksien anisotropiasta sekä muokkauslujittumiseksponentista.

Rajamuovattavuuspiirrosta FLD voidaan hyödyntää kattavasti tutkiessa ohutlevyjen muovattavuuden rajoja erityyppisissä muovausolosuhteissa. Rajamuovat-

tavuudella voidaan selvittää sekä hajanainen että paikallinen kurouma. Hajanaisista kuroumista esiintyy, kun materiaali saavuttaa maksimijännityksen ja homogeeninen muodonmuutos loppuu. Materiaalissa tapahtuu tällöin kuroutumista molempiin suuntiin. Paikallista kuroutumaa tapahtuu, kun tietyn suuntainen venymä lähestyy nollaa. Silloin venymää tapahtuu vain paksuussuunnassa eikä ilmaannu leveyssuunnan kutistumista. Päävenymät valitaan pystysuuntaisesti ja kohtisuorassa. Rajamuovattavuuspiirros esitetään koordinaatistossa, jossa pystyakselilla päävenymä  $\epsilon_1$  ja vaaka-akselilla  $\epsilon_2$  toinen päävenymä (kuva 8). (Juntunen 2010, 8.)



Kuva 10. Rajamuovattavuuspiirros esitettynä koordinaatistossa, jossa  $\epsilon_1$  pystyakselilla ja  $\epsilon_2$  vaaka-akselilla. (Vierelä 2012, 13)

Rajamuovattavuuspiirroksessa päävenymät  $\epsilon_1$  ja  $\epsilon_2$  ovat yleensä todellisia venymiä, joskus voidaan käyttää myös suhteellista venymää. Päävenymäkoordinaatiston pystyakselin oikealla puolella ovat positiiviset arvot, ja sitä kutsutaankin venytysmuovauspuoleksi. Positiiviset arvot merkitsevät venyttävää muodonmuutosta. Pystyakselin vasemmalla puolella toinen päävenymä on negatiivinen, jolloin se on puristavaa muodonmuutosta. Sitä kutsutaankin syvävetopuoleksi. Puhtaasta syvävedosta voidaan puhua silloin, kun negatiiviselta puolelta tulee raja vastaan tietyssä vaiheessa ja paksuussuuntainen venymä  $\epsilon_3$  katoaa. (Juntunen 2010, 9.)

## 5 REIÄNLAAJENNUKSEN TESTAUSMENETELMÄT

### 5.1 Iso- standardin mukainen reiänlaajennustesti

Reiänlaajennustestejä on kahdenlaisia, ISO 16630- standardin mukaisesti tehty sekä vanha KWI- reiänlaajennusmenetelmä. Erimuotoiset painimet muodostavat erot näiden reiänlaajennusmenetelmien välille.

ISO 16630- standardin mukaisesti tehtyä reiänlaajennusmenetelmää käytetään 1,2 - 6mm paksujen metallinauhujen- ja levyjen testaukseen. Materiaalin leveys tulee vähintään olla 90mm. Reiänlaajennuskoe suoritetaan kahdessa osassa. (Akola 2013, 10)

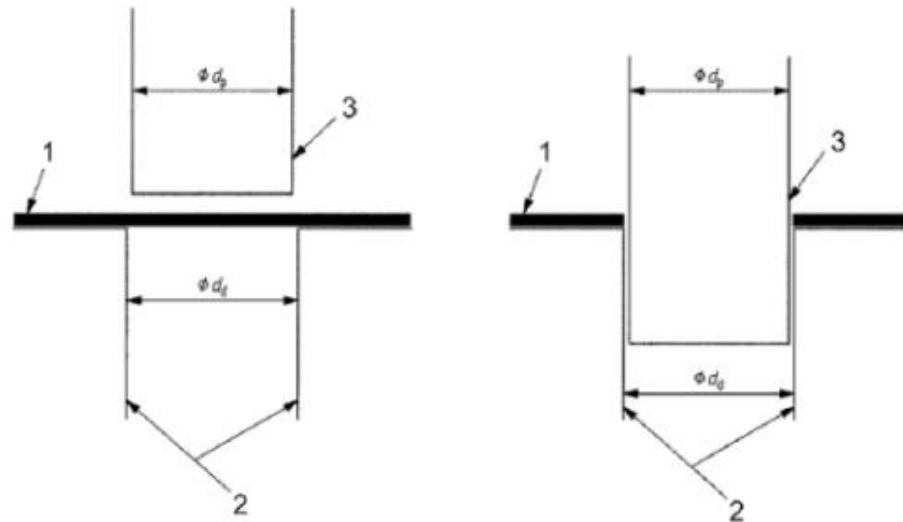
Ensimmäisessä osiossa levyyn tehdään reikiä, joiden halkaisija on 10mm. Reikien halkaisijoiden etäisyys tulee olla vähintään 90mm. Reunimmaisten reikien vähimmäisetäisyys levyn reunasta on 45mm. ISO 16630- standardin suoritetaan mukaisesti stanssaamalla ja työkaluna käytetään asianmukaista muotoista paininta.

Toisessa vaiheessa kappaleeseen tehtyä reikää laajennetaan kartion muotoisella painimella. Kappaleen pidätin voiman tulee olla tarpeeksi suuri, jotta materiaalin virtaaminen estyy. Havaittaessa paksuuden läpi tunkeutuvan murtuman, tulee painimen liike pysäyttää. Tämän jälkeen mitataan reiän halkaisija  $D_h$  kahdesta eri kohdasta koekappaletta, minkä jälkeen voidaan laskea kaavalla 4 niiden reiänlaajennussuhde. (Akola 2013, 10.)

(4)

$$\lambda = \frac{D_h - D_0}{D_0} \times 100$$





Kuva 11. Reiänlävistyksen periaatekuva ennen lävistystä ja sen jälkeen. 1= koekappale, 2= tyyny, 3= lävistin,  $d_p$ = lävistimen halkaisija,  $d_d$ = tyynyn sisähalkaisija. (Akola 2013, 10)

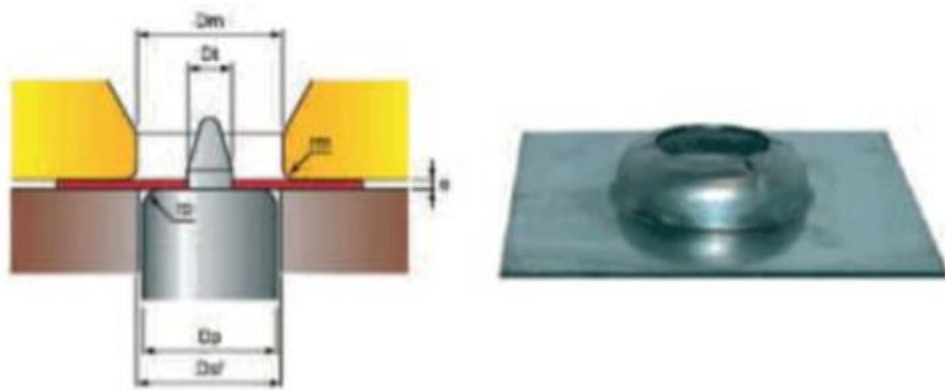
## 5.2 KWI- reiänlaajennuskoe

KWI- reiänlaajennuksessa käytetään tylppäpäistä työkalua. Painimen kärkeen on sijoitettu kohdistustappi, jonka avulla näytelevy voidaan kohdistaa keskelle paininta. KWI- testausmenetelmää voidaan hyödyntää 1,2mm - 3mm paksuille metallinauhoille- ja levyille. Vähimmäisleveys materiaalille tulee olla vähintään 100mm. Materiaalin pituus olisi hyvä valita niin, että siihen voidaan suorittaa vähintään kolme reiänlaajennuskoetta. Levyn reunimmaisten reikien keskipisteiden tulisi vähintään olla 100mm reunasta ja reikien etäisyys tulisi olla 150mm.

KWI- reiänlaajennustesti suoritetaan kahdessa osassa, kuten ISO- standardissa. Ensimmäisessä vaiheessa, tehdään halkaisijaltaan 10mm alkureikä. Reiän tekemiseen käytetään samaa työkalua kun ISO- standardissa. Alkureiän teon jälkeen aloitetaan varsinainen reiänlaajennustesti. Muovauskoneeseen laitettaessa on huomioitava, että alkureiän stanssauksessa tulleet purseet tulevat levyn yläpuolelle. Levy asetetaan aina samalla tavalla purseiden jäädessä levyn yläpuolelle. Tämän toimenpiteen avulla säästetään paininta kulumiselta ja saadaan vertailukelpoisia tuloksia ISO- Standardin kanssa. KWI- reiänlaajennustes-

tissä on tarpeellista käyttää voitelua, sillä muovauksessa tapahtuva muutos on suuri.

Kokeessa käytetään muovausnopeutena 15mm/min ja levypidinvoimana 600kN. Reiänlaajennuskokeessa paininta työnnetään niin pitkälle, että voidaan havaita aineen paksuuden läpi menevä murtuma. (Akola 2013, 12.)

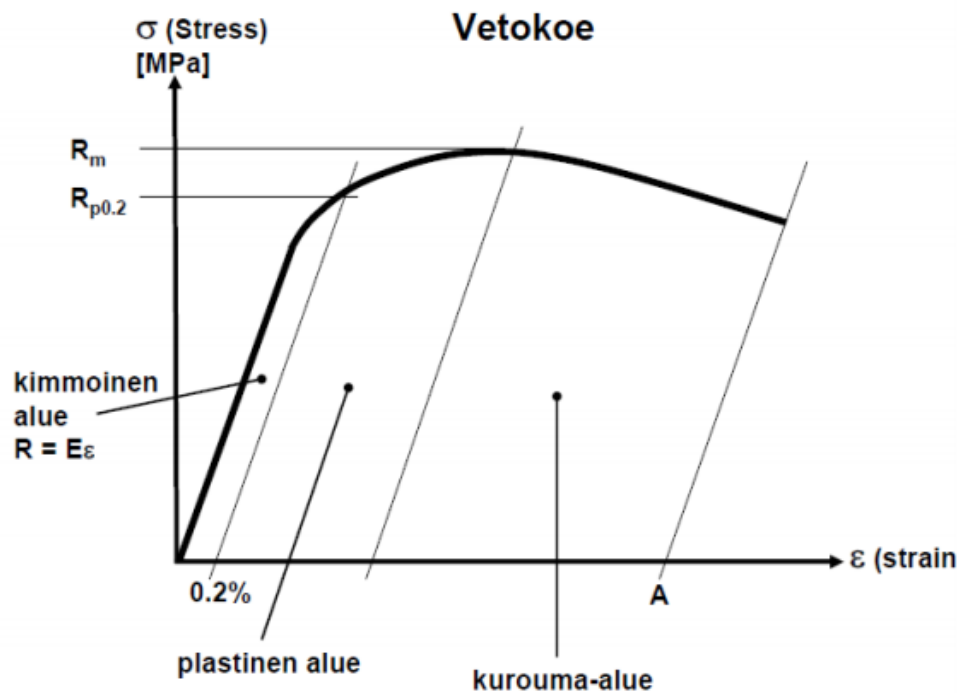


Kuva 12. KWI- reiänlaajennuskokeen alkutilanne (vasemmalla) ja laajennettu reikä (oikealla). (Akola 2013, 12)

## 6 TESTAUSMENETELMÄT

### 6.1 Vetokoe

Vetokokeella voidaan selvittää muovattavuuden kannalta tärkeät mekaaniset ominaisuudet ja näin ollen soveltuvuutta muovaamiseen. Sitkeys ja lujuus ovat metallien tärkeimmät ominaisuudet, jotka saadaan selvitettyä vetokokeen avulla. Jännitysvenymäpiirroksen (kuva 9.) tekemiseen tarvitaan pitenemän ja voiman rekisteröityminen samanaikaisesti. Piirroksista voidaan laskea nimellisjännityksen arvot ja venymän arvot. Nykyään vetokoneilla käytetään tietokoneohjelmaa ja ekstensiometrejä apuna tulosten saamisessa, ja niitä voidaan hyödyntää suoraan tietokoneen näytöltä. Vaatimukset huoneenlämpötilassa tehtävälle vetokokeelle on määritelty kansallisessa standardissa SFS- EN ISO 6892-1:2009. Kyseisestä standardista löytyy ohjeet tietokoneohjattujen vetokoneiden käyttöön. (Vierelä 2012, 25.)



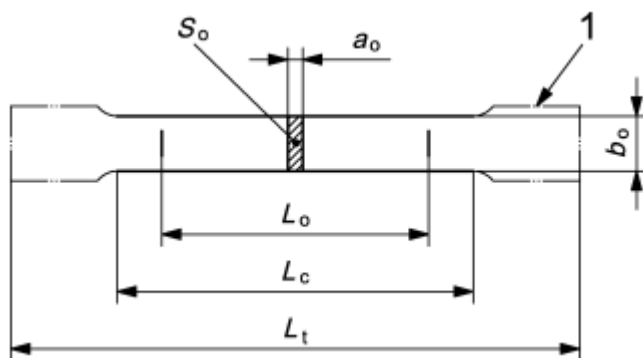
Kuva 13. Jännitysvenymäkäyrä materiaalille. (Vierelä 2012, 26)

## 6.2 Vetokoestandardi SFS ISO EN 6892-1

Vetokoestandardi SFS ISO EN 6892- 1:2009 kumoaa aikaisemmin julkaistun standardin ISO 10002- 1:2001. Vetokoe suoritetaan vetämällä koesauvaa siihen asti, että tuloksena saadaan kaikki tarvittavat mekaaniset materiaalin ominaisuudet. Standardin mukaisesti koe suoritetaan huoneenlämmössä 10..35 °C, kuitenkin valvotuissa olosuhteissa yleinen lämpötila on  $23 \pm 5^\circ\text{C}$ .

Nykyaikaisella tietokoneohjatulla vetokoekalustolla saadaan lähes kaikki tarvittavat materiaalin mekaaniset ominaisuudet. Tietokoneohjatut vetokoelaitteistot kalibroidaan standardin ISO 7500-1 mukaisesti. Tietokoneohjatus vetokokeesta suoraan saatavia materiaalin mekaanisia ominaisuuksia ovat myötöraja  $R_{p0,2}$ , murtolujuus  $R_m$ , plastinen tasavenymä suurimmalla voimalla  $A_g$ , murtovenymä  $A$  ja muokkauslujittamiseksi eksponentti  $n$ .

Standardissa määritellään koesauvan mitat ja muodot. Koesauva valmistetaan tuotteesta, aihioista tai valukappaleesta. Työstämättömiä koesauvoja voidaan käyttää poikkileikkaukseltaan muuttumattomille tuotteille (palkit, tangot, langat). Kokeessa käytettävän materiaalin alkupituuden ollessa alle 20 mm, mittausepävarmuus kasvaa.



Kuva 14. Vetokoesauva.( SFS-EN ISO 6892-1)

Myötö- ja venymisrajoille on standarteissa määritelty toleranssit, joita noudatetaan vetukoetta tehtäessä. Toleranssit esitetään taulukoissa kuormituselemettiin siirtymänopeuksista ja jännityksen muutosnopeuksista. Taulukoita voidaan käyttää apuna, kun muutosnopeutta ei voida säätää tai mitata.

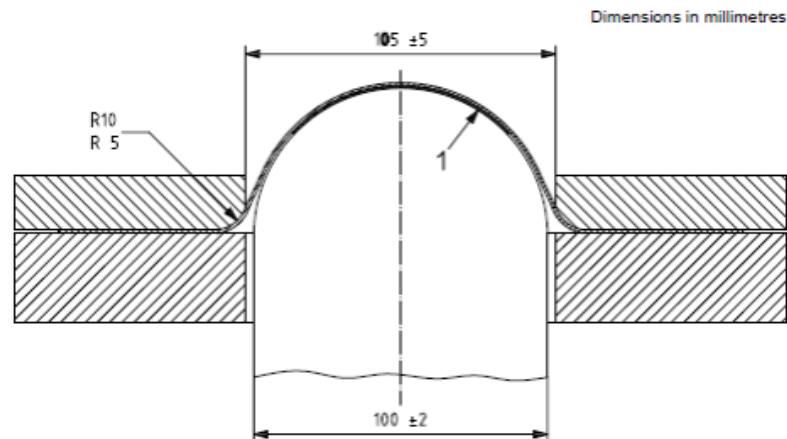
Standardissa sisältää kaavoja, joiden avulla voidaan laskea tarvittavat materiaalin ominaisuudet. Kaavoja on annettu plastisen tasavenymän  $A_g$ , kokonaistasevenymän  $A_{gt}$ , kokonaisvenymän murtohetkellä  $A_t$ , murtovenymä katkenneesta sauvasta  $A$  ja murtokorouman  $Z$  määrittämiseen.

Standardi SFS ISO EN 6892-1 sisältää ohjeistuksen ohuiden 0,1-3mm materiaalien, alle 4mm lankojen ja tankojen sekä putkien koesauvojen valmistukseen. Osiot C,D,E,F sisältävät tarkat koesauvoja koskevat mitoitustoleranssit. Vetoko-keeseen vaadittavat arvot löytyvät kaavoina sekä taulukoina.

Standardissa SFS ISO EN 6892-1 on liitteenä mittausepä-tarkkuuden arvioiminen ja laboratorioiden välisten vertailukokeiden tuloksia taulukoina ja kuvaajana. (SFS-EN ISO 6892-1)

### 6.3 Nakajima-testi

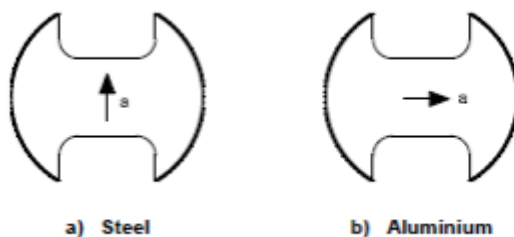
Rajamuovattavuuskäyrän määrittämiseen käytetään joko Nakajima tai Marciniak-testiä. Lapin ammattikorkeakoulussa käytetään Nakajima-testiä, joten tässä työssä perehdytään syvällisemmin kyseiseen testiin. Testi suoritetaan ISO 12004-2- standardin mukaisesti. Standardissa 0,3 mm -4 mm vahvuisten ohutlevyjen muokkaus suoritetaan halkaisijaltaan  $(100 \pm 2)$  mm puolipallon muotoisella painintyökalulla. Pidinrenkaan sisähalkaisijan tulisi olla suurempi kuin painintyökalun plus 2,5 kertaa materiaalin vahvuus, vähintään 105 mm.



Kuva 15. Nakajima-testissä käytettävien työkalujen standardinmukaiset mitat. (Vierelä 2012,21.)

Nakajima-testissä tulisi käyttää vähintään geometrialtaan 5 eri näytettä. Jokaisesta geometriasta kohti 3 näytekappaletta. Näytteiden muotoilu tulisi noudattaa parallel shaft -tyyliä. Näytteen kavennus tapahtuu yhdensuuntaisella suoralla osuudella. Eri geometrioissa kavennuksen leveys vaihtelee ja näin ollen tuloksilla saadaan pisteet eri puolelle FLC- käyrää.

Näytteiden leikkaaminen tulisi suorittaa siten, että näytteiden pintaan tai reunoihin ei synny naarmuja eikä aiheuta muita muutoksia materiaalin ominaisuuksiin. Mikäli leikkuuvaiheessa tapahtuu edellä mainittuja asioita, vaikuttavat ne tuloksiin merkittävästi ja testi menettää luotettavuutensa. Jokaisessa testikappaleessa pitäisi pääsuunta olla päävenymän suuntaisesti ja siten myös valssaussuunta sama jokaisessa näytteessä. ( Vierelä 2012, 21)



Kuva 16. Yhdensuuntaisilla suorilla kavennetut näytekappaleet. a) teräs ja b) alumiini. (Vierelä 2012, 22.)

## 7 KOEMATERIAALIT JA MENETELMÄT

### 7.1 Koeteräkset

Outokumpu Oy on kehittänyt uusia 20% Cr kylmävalssattuja teräksiä. EN 1.4622 on ferriittinen ruostumaton teräs. Tuote soveltuu ominaisuuksien puolesta hyvin auto- ja prosessiteollisuuteen, koska teräksen korroosion sietokyky on hyvä. EN 1.4420 on austeniittinen ruostumaton teräs ja sen hyvän muovattavuuden ja hitsattavuuden ansiosta teräksen käyttökohteita voivat olla esimerkiksi putket ja vedenlämmittäjät. Taulukoissa 1 ja 2 on annettu materiaalien ohjeelliset kemialliset koostumukset ja mekaaniset ominaisuudet. (Outokumpu 2015.)

Taulukko 1. Koeterästen Kemialliset koostumukset. (Outokumpu Oy 2015.)

Materiaali	C wt-%	Cr wt-%	Mn wt-%	Ni wt-%	Ti+Nb wt-%	Fe wt-%	Mo wt-%	N wt-%
EN 1.4622	0,02	21	0,4	-	0,4	Bal.	-	-
EN 1.4420	0,02	20,3	1,8	8,6	-	Bal.	0,7	0,20

Taulukko 2. Koeterästen Mekaaniset ominaisuudet. (Outokumpu Oy 2015.)

Materiaali	$R_{p0,2}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$R_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	A (%)
EN 1.4622	360	470	30
EN 1.4420	390	710	43

### 7.2 Vertailumateriaalit

Vertailumateriaaleina käytetään Outokumpu Oy:n jo aikaisemmin valmistamia EN 1.4521 ja EN 1.4301 teräksiä. Näistä EN 1.4521 on kaksoisstabiloitu molybdeeniseosteinen ferriittinen ruostumaton teräs. Stabiloimiseen on käytetty niobia sekä titaania. Käyttökohteet ovat samankaltaisia kuin teräksellä EN 1.4420. Toinen vertailumateriaali EN 1.4301 on kautta aikojen käytetyin austeniittinen ruostumaton nk. 18/8 teräs. Taulukoissa 3 ja 4 on annettu vertailute-

rästen tyypilliset kemialliset koostumukset ja mekaaniset ominaisuudet. (Outokumpu Oy 2015.)

Taulukko 3. Vertailumateriaalien kemialliset koostumukset. (Outokumpu Oy 2015.)

Materiaali	C wt-%	Cr wt-%	Mn wt-%	Ni wt-%	Ti+Nb wt-%	Mo wt-%	N wt-%
EN 1.4521	0,02	18,0	-	-	0,5	2,0	-
EN 1.4301	0,04	18,1	-	8,1	-	-	-

Taulukko 4. Vertailumateriaalien ohjeelliset mekaaniset ominaisuudet. (Outokumpu Oy 2015.)

Materiaali	$R_{p0,2}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$R_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	A (%)
EN 1.4521	320	420	20
EN 1.4301	270	600	55

### 7.3 Mekaaniset ominaisuudet

Vetokokeet suoritettiin standardin SFS ISO EN 6892- 1:2009 mukaisesti Lapin ammattikorkeakoulun Kemin yksikön aineenkoetuslaboratorion Zwick Allround-floor 250 kN koneella. Outokumpu toimitti vetosauvat valmiiksi koneistettuna.

Kaikista koesauvoista mitattiin standardin mukaisesti kolmesta eri kohdasta paksuudet ja leveydet mikrometrillä ja niiden keskiarvot laitettiin ohjelmaan. Pitkittäistä ja poikittaista Ekstensometriä käytettiin venymän mittauksessa. Tämä mahdollisti myös  $r$ - arvojen määrittämisen vetokokeessa. Vetokokeen näytteistä saaduista tuloksista käy ilmi myötö- ja murtolujuudet ( $R_{p0,2}$  ja  $R_m$ ), venymäarvot ( $A$  ja  $A_g$ ),  $r$ - ja  $\Delta r$ - arvot sekä muokkauslujittamiskspontentti ( $n$ ).



Vetokoesauvojen merkinnät suoritettiin siten, että jokaiseen sarjaan merkittiin koemateriaalin tunnus (1.4420 tai 1.4662) ja näytenumerot väliltä (1...n). Lisäksi koesauvaan laitettiin merkinnät leikkaussuunnan näyttävä tunnus ( $\pi = 0^\circ$ ,  $45 = 45^\circ$  ja  $90 = 90^\circ$ )

#### 7.4 LDR–testit

Rajavetosuhdetesti tehtiin Erichsen 145 – 60 ohutlevyjen muovattavuuden tutkimuslaitteella. Testitulokset saatiin käyttämällä Swiftin kuppikoetta.

Molemmissa koeteräksissä koesarjoja tehtiin kolme kappaletta ja jokaisessa sarjassa koeaihioden halkaisijaa kasvatettiin kolme kertaa painimen halkaisijan pysyessä samana. Kokeessa pidinvoimaa vaihdeltiin teräksen ja aihioden halkaisijan mukaan. Testitulokset taulukoitiin ja niiden perusteella laskettiin kaava 3 käyttäen rajavetosuhde (LDR). Swiftin kuppikokeessa kuppien merkinnässä käytettiin aihioden halkaisijoita (110...n).

#### 7.5 FLC–testit

Rajamuovattavuuspiirrokset tehtiin standardi SFS ISO 12004 – 2:2008 mukaisesti Lapin ammattikorkeakoulun Kemin yksikön aineenkoetuslaboratoriossa Erichsen 145 - 60 ohutlevyjen muovattavuuden tutkimuslaitteistolla GOM/ Aramis 5M- venymämittauslaitteistolla varusteltuna.

Rajamuovattavuuspiirrokset määriteltiin käyttämällä kuutta eri geometriaa omaavaa näytettä. Lapin ammattikorkeakoulun aineenkoetuslaboratoriossa käytetään standardin SFS-EN ISO 12004:2:8 mukaista Nakajima- testiä rajamuovattavuuspiirroksen luomisessa.

#### 7.6 Reiänlaajennustestit

Lapin ammattikorkeakoulun Kemin yksikön aineenkoetuslaboratoriossa tehtiin koeteräksille reiänlaajennustesti Erichsen 145 – 60 ohutlevyjen muovattavuus-

den tutkimuslaitteistolla. Testi suoritettiin kansainvälisen standardin ISO 16630 mukaisesti muiden paitsi KWI- testissä käytettävän painimen osalta. KWI- testissä käytetään tylppää paininta, jona päähän on sijoitettu kohdistustappi. Reiänlaajennustestiä varten leikattiin molemmista koeteräksistä tarvittava määrä  $150 \times 500\text{mm}^2$  näyteaihioita. Aihiot leikattiin poikittain valssaussuuntaan nähden.

## 8 TULOKSET

### 8.1 Vetokoe

Taulukossa 5 on annettu teräksen EN 1.4622 vetokokeesta saadut arvot. Taulukoissa annetaan arvot pitkittäin, poikittain ja 45°C:een kulmassa valssausuuntaan nähden. Tulosten perusteella teräksen myötölujuus vaihteli välillä 331 - 359 MPa, murtolujuus välillä 482 - 505 MPa ja murtovenymä välillä 26,1 - 33,6 %. Muokkauslujittumiseksponentin  $n$ -arvo vaihteli välillä 0,17 – 0,18 ja teräksen anisotropiaa kuvaava  $r$ -arvo välillä 1,12 – 2,24.

Taulukko 5. Teräksen EN 1.4622 vetokoetulokset.

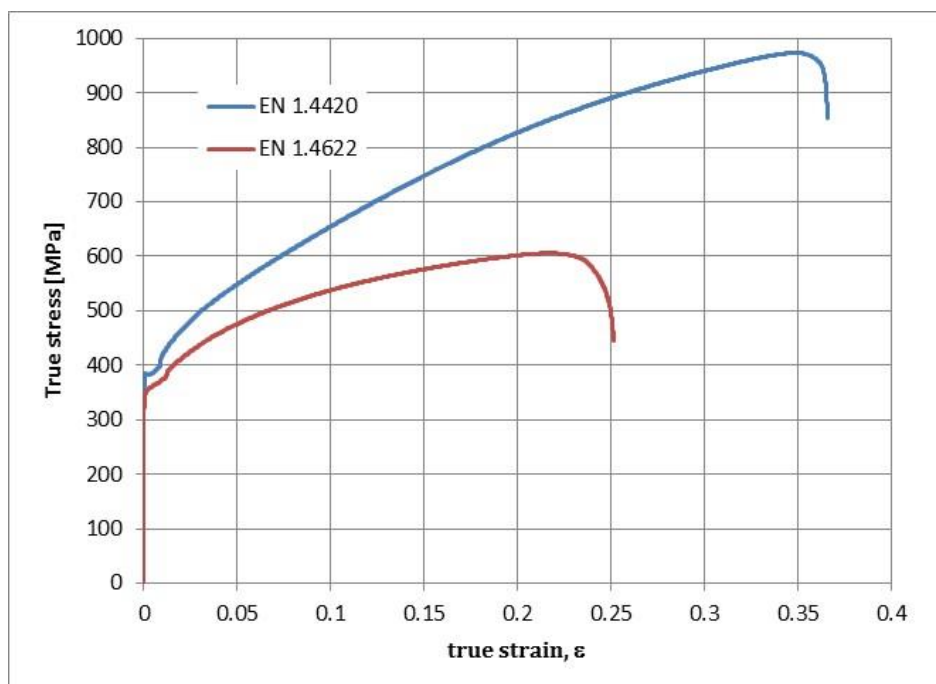
Specimen ID	$R_{p0.2}$	$R_m$	$E$	$A_g$	$A_{gt}$	$A(80)$	$A_t$	$n_{10-20/Ag}$	$r_{10-15/Ag}$	$r(ka.)$
	MPa	N/mm <sup>2</sup>	GPa	%	%	%	%			
EN 1.4622 1.1 PI	331	483	210	18.16	18.39	30.22	30.39	0.18	1.29	
EN 1.4622 1.2 PI	335	484	203	18.30	18.54	30.66	30.81	0.18	1.33	
EN 1.4622 1.3 PI	334	483	206	18.59	18.83	32.56	32.66	0.18	1.25	
EN 1.4622 1.4 PI	334	482	205	18.02	18.26	29.31	29.47	0.18	1.25	1.28
EN 1.4622 2.1 PO	354	495	228	17.14	17.36	28.57	28.72	0.17	2.24	
EN 1.4622 2.2 PO	355	498	233	17.16	17.38	28.05	28.16	0.17	2.22	
EN 1.4622 2.3 PO	354	495	228	17.35	17.57	28.54	28.69	0.17	2.23	
EN 1.4622 2.4 PO	357	498	225	17.20	17.42	33.64	33.80	0.17	2.24	2.23
EN 1.4622 3.1 45	358	502	226	17.44	17.66	29.81	29.97	0.17	1.17	
EN 1.4622 3.2 45	359	505	229	16.85	17.07	26.11	26.27	0.17	1.12	
EN 1.4622 3.3 45	359	502	222	17.23	17.46	28.50	28.65	0.17	1.17	
EN 1.4622 3.4 45	357	500	227	17.14	17.36	27.81	27.97	0.17	1.16	1.16
Keskiarvo	349	494	220	17.55	17.77	29.48	29.63	0.17	1.56	
Hajonta	12	9	11	0.56	0.57	2.08	2.08	0.01	0.50	
Min	331	482	203	16.85	17.07	26.11	26.27	0.17	1.12	
Max	359	505	233	18.59	18.83	33.64	33.80	0.18	2.24	

Taulukossa 6 on esitetty teräksen EN 1.4420 vetokokeesta saadut arvot. Tulosten perusteella teräksen myötölujuus vaihteli välillä 379 - 392 MPa, murtolujuus välillä 687 - 730 MPa murtovenymä välillä 26,1 - 33,6 prosenttia. Muokkauslujittumiseksponentin  $n$ -arvo vaihteli välillä 0,33 – 0,34 ja teräksen anisotropiaa kuvaava  $r$  – arvo välillä 0,82 – 1,14. Tulokset ovat loogisia, koska teorian mukaan austeniittinen ruostumaton teräs muokkauslujittuu enemmän (eli  $n$ -arvo on suurempi), kun taas ferriittisellä on parempi syvävedettävyyys eli suuremmat  $r$ -arvot.

Taulukko 6. Teräksen EN 1.4420 vetokoetulokset.

Specimen ID	R <sub>p0.2</sub>	R <sub>m</sub>	E	A <sub>g</sub>	A <sub>gt</sub>	A(80)	A <sub>t</sub>	n <sub>10-20/A<sub>g</sub></sub>	r <sub>10-15/A<sub>g</sub></sub>	r(ka.)
	MPa	N/mm <sup>2</sup>	GPa	%	%	%	%			
EN 1.4420 4.1 45	384.20	694.70	168.44	30.67	31.09	33.50	33.87	0.33	1.11	
EN 1.4420 4.2 45	379.88	687.33	202.80	30.70	31.04	35.95	36.22	0.33	1.14	
EN 1.4420 4.5 45	383.67	691.43	185.01	31.59	31.96	37.91	38.22	0.33	1.08	1.11
EN 1.4420 5.1 PI	388.93	727.96	201.12	31.12	31.48	37.10	37.41	0.34	0.92	
EN 1.4420 5.2 PI	386.31	727.39	200.20	31.50	31.86	40.46	40.74	0.34	0.94	
EN 1.4420 5.3 PI	392.12	729.78	192.79	30.50	30.88	38.41	38.71	0.34	0.94	
EN 1.4420 5.4 PI	386.99	728.34	193.21	29.49	29.87	35.25	35.56	0.34	0.92	0.93
EN 1.4420 6.1 PO	380.97	694.91	185.86	33.71	34.09	44.13	44.46	0.34	0.83	
EN 1.4420 6.2 PO	383.80	699.71	186.43	33.32	33.70	42.92	43.25	0.34	0.82	
EN 1.4420 6.3 PO	378.76	695.41	198.50	33.64	34.00	44.92	45.22	0.34	0.84	
EN 1.4420 6.4 PO	382.77	697.20	198.61	33.28	33.64	42.61	42.92	0.34	0.83	0.83
Keskiarvo	384	707	192	31.77	32.15	39.38	39.69	0.34	0.94	
Hajonta	4	17	10	1.47	1.47	3.86	3.86	0.01	0.12	
Min	379	687	168	29.49	29.87	33.50	33.87	0.33	0.82	
Max	392	730	203	33.71	34.09	44.92	45.22	0.34	1.14	

Kuvassa 17 on esitetty esimerkki teräksen EN 1.4420 ja EN 1.4622 jännitys-venymäkäyristä. Kuvasta nähdään selvästi, kuinka paljon enemmän austeniittinen EN 1.4622 muokkauslujittuu ferriittiseen EN 1.4420 teräkseen verrattuna ja se kuinka paljon suurempi murtovenymä sillä on.



Kuva 17. terästen EN 1.4420 ja EN 1.4622 jännitysvenymäkäyrä

Taulukossa 7 on laskettu terästen EN 1.4622 ja EN 1.4420 kaavoilla (2) ja (3) lasketut keskimääräiset  $r$  ja  $\Delta r$ -arvot. Tulokset ovat loogisia, koska ferriittisen EN 1.4622 teräksen keskimääräinen  $r$ -arvo on selvästi austeniittista EN 1.4420 terästä korkeampi.

Taulukko 7. Terästen EN 1.4622 ja EN 1.4420 plastisen venymäsuhteen  $r$ - arvo ja keskiarvo  $\Delta r$ .

EN 1.4622		EN 1.4420	
$r$	$\Delta r$	$r$	$\Delta r$
1.46	0.60	1.00	-0.23

## 8.2 Rajavetosuhde LDR

Taulukoissa 8 ja 9 on annettu Swiftin kuppikokeiden välittömät testitulokset. Swiftin kuppikokeella määritettiin rajavetosuhde LDR. Molemmille materiaaleille tehtiin testit kolmella eri aihionhalkaisijalla. EN 1.4622 teräksellä halkaisijat vaihtelivat välillä 118 - 120mm ja pidinvoima vaihteli välillä 16 - 22kN. Koeteräksellä EN 1.4420 halkaisijat vaihtelivat välillä 111 - 113mm ja pidinvoima välillä 22 - 27kN.

Taulukko 8. EN 1.4622 Swiftin kuppikokeen tulokset.

Materiaali	Vahvuus [mm]	Halkaisija [mm]	Testi	Pidinvoima [kN]	Tulos	LDR
EN 1.4420	1.5	111	1	27	OK	
EN 1.4420	1.5	111	2	27	OK	
EN 1.4420	1.5	111	3	27	OK	2.22
EN 1.4420	1.5	112	1	28	OK	
EN 1.4420	1.5	112	2	28	Fail	
EN 1.4420	1.5	112	3	26	OK	
EN 1.4420	1.5	112	4	26	OK	2.24
EN 1.4420	1.5	113	1	26	Fail	
EN 1.4420	1.5	113	2	22	Fail	

Taulukko 9. EN 1.4420 Swiftin kuppikokeen tulokset.

Materiaali	Vahvuus [mm]	Halkaisija [mm]	Testi	Pidinvoima [kN]	Tulos	LDR
EN 1.4622	1.5	118	1	22	OK	
EN 1.4622	1.5	118	2	22	OK	
EN 1.4622	1.5	118	3	22	OK	2.36
EN 1.4622	1.5	119	1	22	OK	
EN 1.4622	1.5	119	2	22	OK	
EN 1.4622	1.5	119	3	22	Fail	
EN 1.4622	1.5	119	4	20	OK	2.38
EN 1.4622	1.5	120	1	20	Fail	
EN 1.4622	1.5	120	2	18	Fail	
EN 1.4622	1.5	120	3	16	Fail	

Kuvassa 18 nähdään teräksen EN 1.4622 ja kuvassa 19 teräksen EN 1.4420 vedettyjä Swiftin kuppeja.



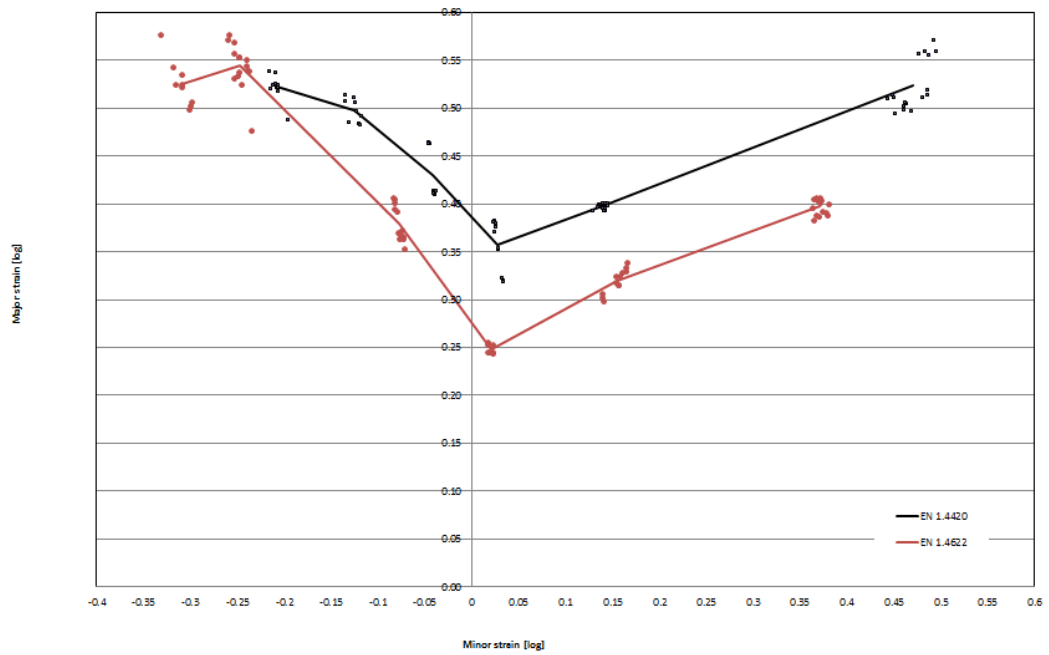
Kuva 18. Teräksen EN 1.4420 Swiftin kuppikokeen tuloksena syntyneet kappalet (numero ilmaisee aihion halkaisijan millimetreinä).



Kuva 19. Teräksen EN 1.4622 Swiftin kuppikokeen tuloksena syntyneet kappaleet (numero ilmaisee aihion halkaisijan millimetreinä)..

### 8.3 Rajamuovattavuuspiirros FLC

Kuvassa 20 on esitetty teräksien EN 1.4420 ja EN 1.4622 rajamuovattavuuspiirrokset. Kuvan perusteella austeniittinen EN 1.4420-teräs kestää suurempia muodonmuutoksia kuin ferriittinen EN 1.4462 teräs, mikä on teorian mukaista.



Kuva 20. Koeteräksien EN 1.4420 ja EN 1.4622 rajamuovattavuuspiirroksat.

#### 8.4 KWI- reiänlaajennuskoe

Taulukossa 10 on annettu EN 1.4622 teräkselle mitatut KWI- reiänlaajennustestien tulokset. Taulukon mukaan reiänlaajennussuhde vaihteli välillä 80,95 - 87,05 %.



Taulukko 10. Teräksen EN 1.4622 KWI- reiänlaajennustestin tulokset.

materiaali	Max muovaus voima [kN]	D <sub>0</sub> [mm]	D <sub>h1</sub> [mm]	D <sub>h2</sub> [mm]	D <sub>h</sub> [mm]	Suhde λ [%]	Murtumi en määrä	Murtumi en suunta Valssauss uunta 0°
1.4622	96.5	10	18.21	18.22	18.22	82.15	1	320
1.4622	99	10	18.87	18.48	18.68	86.75	1	330
1.4622	96.5	10	18.73	18.68	18.71	87.05	1	320
1.4622	97	10	18.03	18.16	18.10	80.95	1	220
1.4622	99.5	10	18.43	18.57	18.50	85.00	1	105
1.4622	98.5	10	18.54	18.3	18.42	84.20	1	45
Keskiarvo						84.35		
Hajonta						2.45		
Min						80.95		
Max						87.05		

Taulukossa 11 on annettu EN 1.4420 teräkselle mitatut KWI- reiänlaajennuksen tulokset. Taulukon mukaan reiänlaajennussuhde vaihteli välillä 58,20- 75,15%.

Taulukko 11. Teräksen EN 1.4420 KWI- reiänlaajennustestin tulokset.

Materiaali	Max muovaus voima [kN]	D <sub>0</sub> [mm]	D <sub>h1</sub> [mm]	D <sub>h2</sub> [mm]	D <sub>h</sub> [mm]	Suhde λ [%]	Murtumi en määrä	Murtumi en suunta Valssauss uunta 0°
1.4420	122	10	17.27	17.08	17.18	71.75	1	100
1.4420	119.6	10	16.53	16.48	16.51	65.05	1	150
1.4420	115.2	10	15.8	15.84	15.82	58.20	1	340
1.4420	118.2	10	16.71	16.72	16.72	67.15	1	90
1.4420	119.7	10	16.98	16.92	16.95	69.50	1	170
1.4420	123.5	10	17.51	17.52	17.52	75.15	2	180.35
Keskiarvo						67.80		
Hajonta						5.88		
Min						58.20		
Max						75.15		

## 9 TULOSTEN TARKASTELU

### 9.1 Mekaaniset ominaisuudet

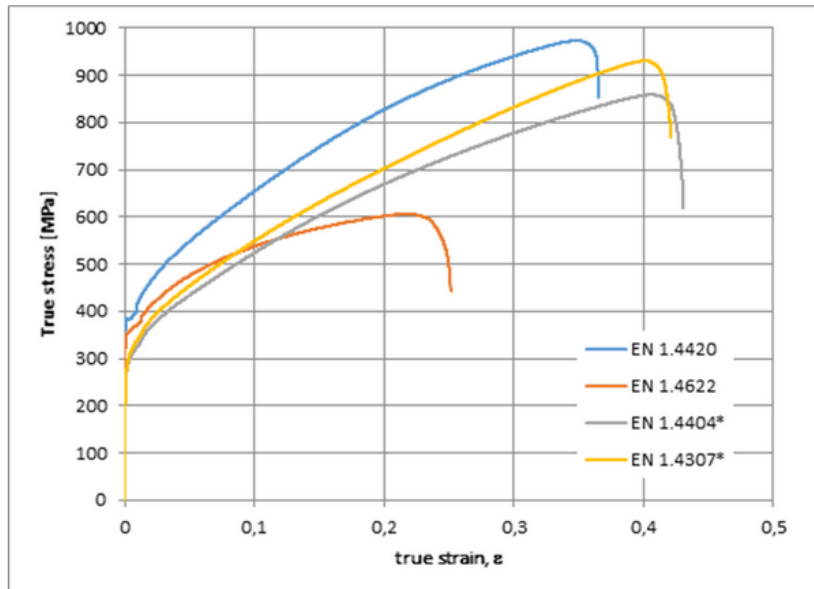
Vetokoetulosten perusteella (ks. taulukot 5 ja 6) austeniittisen EN 1.4420 teräksen pienimmät arvot myötölujuudelle olivat 379MPa ja murtolujuudelle 687MPa. Austeniittisen verrokkiteräksen EN 1.4301 standardin SFS-EN 10088–2:2014 mukaiset minimiarvot myötölujuudelle  $R_{p0.2} = 230\text{MPa}$  ja murtolujuudelle  $R_m = 540\text{MPa}$ . Tämän mukaan koeteräs on selvästi lujempaa. Tutkittu teräs ei ole määritelty ao. standardissa, joten kylmävalssatulle, hehkutetulle ja peitatulle toimitustilalle (2B) ei ole vaatimusta lujuuden suhteen.

Ferriittisen koeteräksen EN 1.4622 minimiarvot ovat myötölujuudelle 331MPa ja murtolujuudelle 482MPa. Verrokkiteräksen EN 1.4521 standardin SFS-EN 10088–2:2014 mukaiset minimiarvot myötölujuudelle  $R_{p0.2} = 300\text{MPa}$  ja murtolujuudelle  $R_m = 420\text{MPa}$ .

Kuvasta 21 voidaan havaita selvästi EN 1.4420 teräksen korkeamman kromipitoisuuden lujuutta lisäävän vaikutuksen (liuoslujittuminen) ja sen, että EN 1.4622 teräksen sitkeys on huomattavasti pienempi ja muokkauslujittuminen paljon vähäisempää, joka on nähtävissä myös vetokokeen n-arvoissa (ks. taulukot 5 ja 6).

Vetokokeiden perusteella austeniittisen koeteräksen EN 1.4420 murtovenymä oli keskimäärin 39.4 %. Austeniittiselle verrokkimateriaalille EN 1.4301 standardi SFS-EN 10088–2:2014 määrittelee murtovenymän vähimmäisarvoksi  $A = 45\%$ . murtovenymää on siis tutkitulla teräksellä selvästi pienempi. Kuten lujuuden kohdalla todettiin, terästä ei kuitenkaan ole määritelty standardissa, joten sen murtovenymällekään ei ole minimivaatimusta. Outokumpu antaa teräksen teknisissä tiedoissa murtovenymälle tyypillisen arvon  $A = 43\%$ , mikä on suurempi kuin tässä työssä testatuilla näytteillä. Kuvan 20 perusteella venymä jää myös

selvästi Leskisen työssä tutkittuja teräksiä EN 1.4307 ja EN 1.4404 pienemmäksi.



Kuva 21. Koeterästen jännitysvenymäkäyriä (\* Leskinen J., 2015).

Ferriittisen koeteräksen EN 1.4622 keskimääräiseksi murtovenymäksi saatiin 29.5 %, mikä on suurempi kuin standardissa SFS-EN 10088–2:2014 määriteltä vähimmäisarvo  $A = 20$  %. Verrokkiteräksen EN 1.4521 minimiarvo  $A = 20$  %, eli sekin ylittyy selvästi. Outokumpu antaa teräksen teknisissä tiedoissa murtovenymälle tyypillisen arvon  $A = 30$  %, mikä ei siis täyty koeteräksellä.

## 9.2 Syvävedettävyys

Taulukossa 12 on annettu Leskisen työssä esitettyjä kylmävalssatulle austeniittiselle ruostumattomalle teräkselle tyypillisiä  $r$  - ja  $\Delta r$ - arvoja. (Leskinen 2015)

Vetokokeesta saatujen tulosten perusteella laskettu teräksen EN 1.4420  $r$ -arvo oli 1,00 ja  $\Delta r$  – arvo -0,23. Nämä ovat lähellä tyypillisiä arvoja.

Taulukko 12. Kylmävalssatun austeniittisen ruostumattoman teräksen tyypillisiä  $r$  – ja  $\Delta r$  – arvoja. (Leskinen, 2015)

Teräs	0°	45°	90°	$r$	$\Delta r$
EN 1.4307	0.8	1.19	0.95	1.03	-0.32
EN 1.4404	0.61	1.13	1.33	1.05	-0.16

Taulukossa 13 on esitelty tyypillisiä ferriittiselle ruostumattomalle teräkselle tyypillisiä  $r$ - ja  $\Delta r$  – arvoja.

Vetokokeesta saatujen tulosten perusteella teräksen EN 1.4622  $r$ - arvo oli 1.46 ja  $\Delta r$ - arvo 0,6. Nämä ovat lähellä tyypillisiä arvoja

Taulukko 13. Kylmävalssatun ferriittisen ruostumattoman teräksen tyypillisiä  $r$ - ja  $\Delta r$ - arvoja. (Xu, Barlat, Ahn, Bressan, 2010)

Teräs	0°	45°	90°	$r$	$\Delta r$
AISI4309	0.89	0.94	0.92	1.58	0.90
AISI430	0.96	0.99	0.973	1.06	0.90

LDR-kokeista saatujen tulosten (ks. taulukot 8 ja 9) perusteella rajavetosuhde austeniittiselle koeteräkselle EN 1.4420 oli keskimäärin 2,37 ja ferriittisellä koeteräkselle EN 1.4462 keskimäärin 2,23.

Korkeampi  $r$ - arvo ja rajasuhdearvo kuvaavat parempaa syvävedettävyyttä. Tulosten perusteella ferriittisen EN 1.4662 teräksen syvävedettävyys on parempi kuin austeniittisellä EN 1.4420 teräksellä. Tämä on linjassa kirjallisuudessa esitetyn tiedon kanssa.

Mitä suurempi  $r$ -arvo materiaalilla on sitä suurempi sen rajavetosuhdekin on. Korkeilla  $r$ - arvoilla ja siten suurilla on rajavetosuhteilla voidaan valmistaa vaikeampimuotoisia ja syvempiä tuotteita. (Kivivuori 2009, 22 )

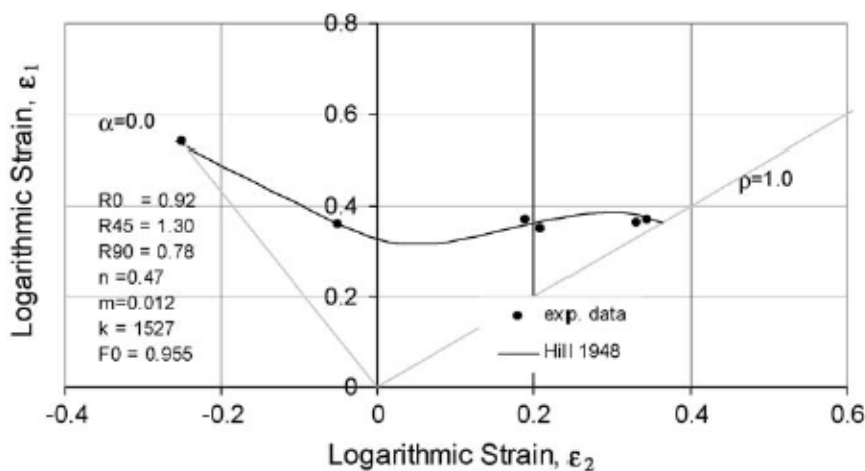
### 9.3 Rajamuovattavuus

Kuvassa 20 esitettiin molempien tutkittujen terästen EN 1.4420 ja EN 1.4622 rajamuovattavuuspiirrokset (FLC).

Ferriittisen EN 1.4622 teräksen alin piste on selvästi alempana, kuin EN 1.4420 ja siinä esiintyy tasokuroutumista ja näin ollen siihen syntyy herkemmin murtumia muovaustapahtumassa.

Tulosten perusteella Austeniittinen EN 1.4420 ruostumaton teräs näyttäisi olevan rajamuovattavuuskäyrän mukaan paremmin muovattavaa, kuin tutkittavana ollut ferriittinen EN 1.4622 teräs. Erot ovat selitettävissä kiderakenteen perusteella (pkk/tkk).

Kuvassa 22 nähdään austeniittiselle verrokkimateriaalille EN 1.4301 kirjallisuudessa esitetty rajamuovattavuuspiirros. Rajamuovattavuuspiirroksia (ks. kuva 20) vertailtaessa voidaan havaita, että kuvaajan keskijanan vasemmalla puolella eli syvävetopuolella käyrät ovat lähes samalla tasolla molemmissa materiaaleissa. Edelleen havaitaan, että teräksen EN 1.4301 keskijanan oikealla puolella, eli venytysmuovauspuolella käyrä on hieman huonompi, kuin EN 1.4420 teräksellä.



Kuva 22. Austeniittisen 1.4301 ruostumattoman teräksen rajamuovattavuuspiirros. (Campos, Butuc, Grácio, Rocha & Duarte 2006, 59)

Ferriittiselle verrokkimateriaalille EN 1.4521 ei löytynyt rajamuovattavuuspiirrosta saatavilla olevista materiaaleista. Ferriittisten terästen keskinäistä vertailemistä ei tehty.

#### 9.4 Reiänlaajenemiskyky

Ruostumattomille teräksille EN 1.4420 ja EN 1.4622 suoritettut KWI-reiänlaajennustestit onnistuivat odotusten mukaisesti. Koekappaleisiin muodostuneista reistä mitataan sisähalkaisijat kahdesta kohdasta ja kaavan 4 avulla laskettiin reiänlaajenemissuhde. Terästen EN 1.4420 ja EN 1.4622 KWI- testin tulokset löytyvät taulukoista 12- 13. KWI- testi antoi suuremman reiänlaajenemissuhteen, kuin vertailumateriaaleille EN 1.4521 ja EN 1.4301. ISO- standardin mukaisesti (ks. taulukko 14) tehdyssä testissä vertailumateriaalin EN 1.4521 reiänlaajenemissuhde on huomattavasti suurempi kuin EN 1.4420, kun taas teräksen EN 1.4301 on alhaisempi verrattuna tutkittavaan materiaaliin EN 1.4622.

Taulukko 14. Verrokkiterästen EN 1.4301 ja EN 1.4521 reiänlaajennustestien arvoja. (Akola 2013,26)

Teräs	KWI	ISO
EN 1.4301	64.2	60.4
EN 1.4521	41.1	125.0

## 10 POHDINTA

Kylmävalssattujen ruostumattomien terästen muovattavuuden tutkiminen oli mielenkiintoinen aihe, koska opintoni ovat painottuneet tutkimuspuolelle. Kursseilta saadut valmiudet olivat hyödyllisiä työtä tehtäessä. Aiemmissa opinnoissa on perehdytty myös opinnäytetyössä käytettäviin testeihin, kuitenkin uusiakin koemenetelmiä joutui käymään läpi.

Opinnäytetyön ajatuksena oli suorittaa erilaisia muovattavuutta testejä Outokumpu Oy:n kehittämistä materiaaleista. Näiden tulosten ja kirjallisuudesta löytyvien materiaalien perusteella vertailtiin eroavaisuuksia Outokumpu Oy:n aikaisemmin kehitettyihin vastaaviin käyttökohteisiin tarkoitettuihin teräksiin.

Kirjallisuudesta löytyi yleisesti helposti tietoa kylmävalssattujen terästen muovattavuudesta ja mekaanisista ominaisuuksista, koska niitä on tutkittu suhteellisen paljon. Kuitenkin toisen vertailumateriaalin EN 1.5421 rajamuovattavuuspiiristä ei löytynyt mistään, joten sen vertaileminen jäi opinnäytetyössä käsittelemättä. Tulosten läpi käyminen oli yllättävän haastavaa, &ja siihen kului enemmän aikaa, kuin oli ennalta suunniteltu.

Oli hyvä päästä tutustumaan erilaisiin standardeihin ja nähdä konkreettisesti niiden vaikutus eri koemenetelmiin. Kokeet suoritettiin standardien mukaisesti, joten niitä voidaan käytännössä hyödyntää.

Omasta mielestäni opinnäytetyön tekeminen oli haastava ja mielenkiintoinen työ, koska pääsin syventymään tarkemmin metallurgiaan ja metallien muovausominaisuuksiin. Aikaisemmin on vain tutustuttu pintapuoleisesti tämän opinnäytetyön aihealueeseen.

## LÄHTEET

- Ahtonen J. 2011. Laserhitsauksen kannattavuusedellytykset piensarjatuotantona tehtävän ohutlevytuotteen kokoonpanossa. Opinnäytetyö. Oulun seudun ammattikorkeakoulu. Oulu,
- Akola T. 2013. Reiänlaajennuskokeiden vertailu. Opinnäytetyö. Kemi- Tornion ammattikorkeakoulu, Kemi.
- Campos, H., Butuc, M., Grácio, J., Rocha, J. & José Manuel Ferreira Duarte. 2006. Journal of materials processing technology. Theoretical and experimental determination of the forming limit diagram for the AISI 304 stainless steel
- Juntunen P. 2010. Tutkimus teräksen EN 1.4512 rajamuovattavuudesta. Opinnäytetyö. Kemi- Tornion ammattikorkeakoulu, Kemi
- Kauppi, T. 2015. Kuumavalssausprosessi, luentomateriaali, opintojakso 3K7336 Ruostumattomat teräkset- johdanto ominaisuuksiin, valmistukseen ja metallurgiaan luku 10, Lapin ammattikorkeakoulu
- Kauppi. T., Linke M., Piisilä N., Välimaa S., & Kesti, V. Ohutlevylevyn muovattavuuden tutkimista oppimisprojektina. Ohutlevylehti 2/2013. Hakupäivä 20.4.2015 <[http://www.ohutlevylehti.com/pdf/s32-37\\_muovattavuus.pdf](http://www.ohutlevylehti.com/pdf/s32-37_muovattavuus.pdf)>
- Kauppi, T. & Manninen T. Ruostumattoman teräksen rajamuovattavuuskäyrän (FLC) määrittäminen SFS-EN ISO 12004-2 mukaisesti- CASE tutkimus Ohutlevy 2/2012. Hakupäivä 27.4.2015. <<http://www.ohutlevy.com/pdf/casetutkimus-s45-47.pdf>>
- Kivivuori, S. & Härkönen, S. 2004. Lämpökäsittelyoppi. 2. painos. Helsinki: Teknova.
- Kivivuori, S. Venytysmuovattavuus. Ohutlevy 2/2009. Hakupäivä 17.2.2015. <<https://www.yumpu.com/fi/document/view/28495061/venytysmuovaus-ohutlevy>>
- Leskinen, J. 2015. Tutkimus kuumavalssattujen ruostumattomien EN 1.4307 ja EN 1.4404 terästen muovattavuudesta. Julkaisematon opinnäytetyö. Lapin ammattikorkeakoulu, Kemi.
- Meskanen, S. & Toivonen, P. Valimotekniikan perusteet, Metallurgian perusteita <[http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/vtp\\_sulatus\\_metallurgia.pdf](http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/vtp_sulatus_metallurgia.pdf)>
- Outokumpu Oy. 2015. Outokumpu Austenitic stainless steel. Viitattu 21.5.2015 <[https://www.outokumpu.com/SiteCollectionDocuments/Austenitic-Stainless-Steel-1.4304-1.4307\\_Datasheet.pdf](https://www.outokumpu.com/SiteCollectionDocuments/Austenitic-Stainless-Steel-1.4304-1.4307_Datasheet.pdf)>



Outokumpu Oy. 2015. Outokumpu ferritic stainless steels. Viitattu 21.5.2015  
<[http://www.outokumpu.com/SiteCollectionDocuments/Ferritic\\_Stainless\\_Steel\\_1.4003\\_1.4512\\_1.4016\\_1.4510\\_1.4509\\_1.4521\\_Datasheet.pdf](http://www.outokumpu.com/SiteCollectionDocuments/Ferritic_Stainless_Steel_1.4003_1.4512_1.4016_1.4510_1.4509_1.4521_Datasheet.pdf)>

Outokumpu Oy. 2015. EN 1.4420 - 20% Cr Austenitic Stainless Steel. Viitattu 21.5.2015  
< <http://www.outokumpu.com/sitecollectiondocuments/outokumpu-austenitic-grade-1-4420-data-sheet.pdf>>

SFS-EN ISO 6892-1, Metallien vetokoe Osa 1: Vetokoe huoneenlämpötilassa, 1.painos, Suomen Standardisoimisliitto, 2009

Vierelä R. 2012. Rajamuovattavuustutkimus kuumavalssatulle teräkselle Optim 650MC. Opinnäytetyö. Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu, Kemi.

Xu, L., Barlat, F., Ahn, D. & Bressan, J. Forming limit and fracture mechanism of ferritic stainless steel sheets. Material Science and Engineering, 2010