

TUTKIMUS KUUMAVALSSATTUJEN RUOSTUMATTOMI-
EN EN 1.4307 JA EN 1.4404 -TERÄSTEN MUOVATTA-
VUUDESTA

Joonas Leskinen

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

2015

Tekniikka ja liikenne
Kone- ja tuotantotekniikka

Tekijä	Joonas Leskinen	Vuosi	2015
Ohjaaja	Timo Kauppi		
Toimeksiantaja	Timo Manninen, Outokumpu Stainless Oy		
Työn nimi	Tutkimus kuumavalssattujen ruostumattomien 1.4307 ja 1.4404 -terästen muovattavuudesta		
Sivu- ja liitemäärä	48		

Opinnäytetyön aiheena oli tutkia Outokummun kuumavalssattuja 1.4307 ja 1.4404 ruostumattomia teräksiä. Tavoitteena oli tutkia terästen muovattavuutta ja verrata niitä kylmävalssattuihin ruostumattomiin teräsiin sekä selvittää muovattavuusparametrien hajonta. Tavoitteena oli myös selvittää kirjallisuustarkastelulla mahdolliset kylmä- ja kuumavalssatun teräksen muovattavuuden eroavaisuudet ja tehdä kirjallisuustutkielma painosorvausteknologiasta. Kuumavalssattujen ruostumattomien terästen muovattavuutta on tutkittu maailmalla vain vähän, joten tavoitteena oli tuottaa tietoa terästen valmistajien ja jatkojalostajien käyttöön.

Teoriaosuudessa käydään läpi yleisiä metallien muovausmenetelmiä ja terästen tärkeimmät muovattavuusominaisuudet sekä niiden testausmenetelmät. Lähtökohteisesti tiedossa ollut kuumavalssattujen terästen muovattavuuden vähäinen tutkimus näkyi teorian puutteena kirjallisuustutkielmassa.

Käytännön osuudessa tehtiin molemmille teräksille vetokokeet, joiden tuloksina saatiin teräksille tärkeimmät muovattavuusparametrit. ”Haponkestävälle” 1.4404 teräkselle suoritettiin vielä reiänlaajennustestit. Testit sujuivat muutamaa hylättyä tulosta lukuun ottamatta ilman ongelmia.

Vertailemalla kylmävalssattujen ruostumattomien terästen r-arvoja koemateriaaleihin, voidaan todeta, että tulokset ovat kylmävalssatuilla laaduilla hieman korkeammat. Koeterästen keskimääräisistä Δr -arvoista 1.3407-teräksellä tulos oli vastaavaa kylmävalssattua laatua parempi, kun taas 1.4404 teräksellä vastaavaa kylmävalssattua laatua huonompi.

Avainsanat muovaus, muovattavuus, painosorvaus, ruostumaton teräs

Industry and Natural Resources
Mechanical and Production
Engineering

Author	Joonas Leskinen	Year	2015
Supervisor(s)	Timo Kauppi		
Commissioned by	Timo Manninen, Outokumpu Stainless Oy		
Subject of thesis	Study of the formability of hot rolled 1.4307 and 1.4404 stainless steels		
Number of pages	48		

The subject of the thesis was to study hot rolled 1.4307 and 1.4404 stainless steels manufactured by Outokumpu Stainless Oy. The aim of this thesis was to study formability of these steels and compare them to cold rolled stainless steels and to figure out the dispersion of formability parameters. The aim was also to make a literature research on possible differences in the formability of cold rolled and hot rolled stainless steels and spin forming technology. Because there are not many studies of the formability of hot rolled stainless steels the aim was to produce information to steel manufacturers and further processors.

The theory part includes the basics for metal forming and steel forming properties and their testing methods. The low level of studies for hot rolled stainless steel's formability showed in a lack of theory.

In the practical part tensile tests were carried out for both of the steels and it gave the primary formability parameters as a result. For 1.4404 steel hole expansion tests were also performed. The tests were carried out without problems aside from few failed results.

Comparing r-values between testing materials and cold rolled stainless steels it can be said that the results for cold rolled steels are slightly higher. As for testing materials Δr -values average results for 1.4307-steel were better than equivalent cold rolled steel whereas for 1.4404 steel the results were better for equivalent cold rolled steel.

Key words forming, formability, spin forming, stainless steel

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	TERÄSTEN MUOVAUSMENETELMÄT	9
2.1	Kuumavalssaus	9
2.2	Kylmämuovaus	12
2.3	Painosorvaus	15
3	TERÄSTEN MUOVATTAVUUS	17
3.1	Mekaaniset ominaisuudet	17
3.2	Plastinen venymäsuhde r	18
3.3	Muokkauslujittumiseksponentti n	19
3.4	Rajavetosuhde LDR	22
4	AINEENKOETUS	24
4.1	Vetokoe	24
4.2	Reiänlaajennustesti	25
5	KUUMAVALSSATUT TERÄKSET	28
6	KOEMATERIAALIT JA MENETELMÄT	30
6.1	Koemateriaalit	30
6.2	Vetokokeet	31
6.3	Reiänlaajennussuhteen määrittäminen	31
6.4	Grubbsin testi	32
7	TULOKSET	33
7.1	Vetokoetulokset	33
7.2	Reiänlaajennussuhde	36
8	TULOSTEN TARKASTELU	38
8.1	Tutkimusaineiston tilastollinen luotettavuus	38
8.2	Mekaaniset ominaisuudet	39
8.3	Plastinen anisotropia	40
8.4	Reiänlaajennuskyky	44
9	POHDINTA	46
	LÄHTEET	47

ALKUSANAT

Tämä työ tehtiin Lapin ammattikorkeakoulun materiaalin käytettävyyden tutkimusryhmän ennakoitiprosessiin kuuluvana työnä.

Haluan kiittää etenkin Timo Kauppia opinnäytetyön aiheesta ja ohjauksesta sekä saamastani avustuksesta. Kiitos Raimo Vierelälle ja Marko Ylitolvalle avusta testien suorittamisessa. Kiitos myös Timo Manniselle Outokumpu Stainless Oy:sta arvokkaista vinkeistä.

Erityiskiitos tukena olleille ystäville.

Kemissä 2015
Joonas Leskinen

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

A	Murtovenymä
Ag	Tasavenymä
IE	Erichsenin luku
LDR	Rajavetosuhde (Limiting Drawing Ratio)
n	Muokkauslujittumiseksponentti
r	Plastinen venymäsuhde
R _m	Murtolujuus
R _{p0.2}	Myötölujuus
Δr	Levyn anisotrooppisuus tason suunnassa

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö tehdään Lapin ammattikorkeakoulun materiaalin käytettävyyden tutkimusryhmän ennakointiprosessiin kuuluvana työnä. Työn toimeksiantaja on tutkimusinsinööri Timo Manninen Outokumpu Stainless Oy:stä. Opinnäytetyössä tutkitaan Outokummun kuumavalssattujen ruostumattomien EN 1.4307 ja EN 1.4404 -terästen kylmämuovattavuutta.

Tämän työn aiheen taustalla on vähäinen tutkimustieto kuumavalssattujen ruostumattomien terästen muovattavuudesta. Kylmävalssattujen terästen muovattavuudesta tiedetään kuitenkin paljon, joten tutkimustuloksia pystytään vertaamaan keskenään. Kyseessä olevista teräksistä tehdään tuotteita mm. painosorvaamalla, joten työssä tuotettu tieto on myös jatkojalostajien hyödynnettävissä.

Teoriaosuudessa käsitellään teräksen kuumavalssausta ja kylmämuovattavuuden kannalta sen tärkeimpiä ominaisuuksia ja testausmenetelmiä. Kokeellisessa osuudessa selvitetään terästen mekaaniset ominaisuudet ja syvävedettävyttä kuvaavat tasoanisotropiaparametrin r-arvot vetokokeiden avulla. Lisäksi tehdään reiänlaajennuskokeita EN 1.4404-teräkselle.

Tässä työssä tutkitaan kahden kuumavalssatun austeniittisen ruostumattoman teräksen muovattavuutta. Tähän liittyen työn tavoitteita ovat:

1. Tutkia terästen muovattavuutta ja verrata sitä kylmävalssattuihin ruostumattomiin teräksiin.
2. Selvittää muovattavuusparametrien hajonta.
3. Selvittää kirjallisuustarkastelulla, mitä ovat mahdolliset kylmä- ja kuumavalssatun ruostumattoman teräksen muovattavuuden eroavaisuudet.
4. Tehdä painosorvausteknologian kirjallisuustarkastelu.
5. Tuottaa tietoa terästen valmistajan ja jatkojalostajien käyttöön.

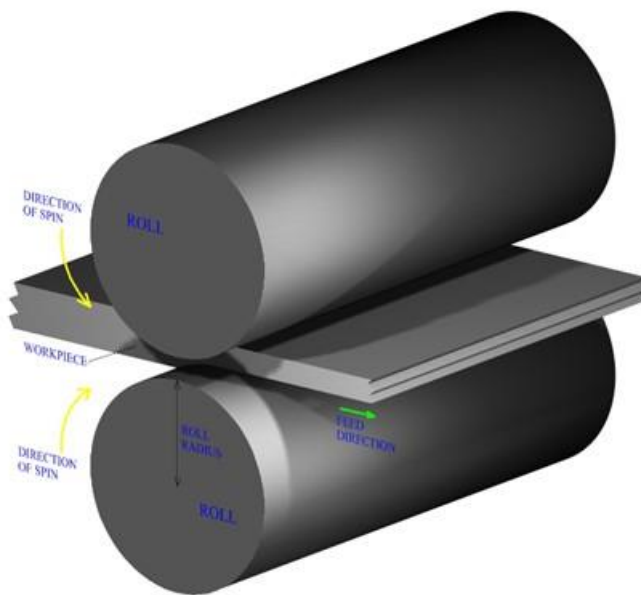
Työn laajuus rajataan molempien tutkittavien terästen (EN 1.4307 ja EN 1.4404) osalta vetokokeiden tekemiseen. Toiselle teräkselle (EN 1.4404) tehdään lisäksi reiänlaajennustestit.

2 TERÄSTEN MUOVAUSMENETELMÄT

Tässä luvussa käsitellään teräksen kuumavalssausta sekä yleisimpiä kylmämuovausmenetelmiä.

2.1 Kuumavalssaus

Valssausta käytetään, kun teräksestä halutaan tehdä esimerkiksi levy- ja nauhatuotteita. Valssaukseksi kutsutaan prosessia, jossa teräskappaletta ohennetaan kahden samaan suuntaan pyörivän telan eli valssin välissä (ks. kuva 1). (Kauppi 2015.)

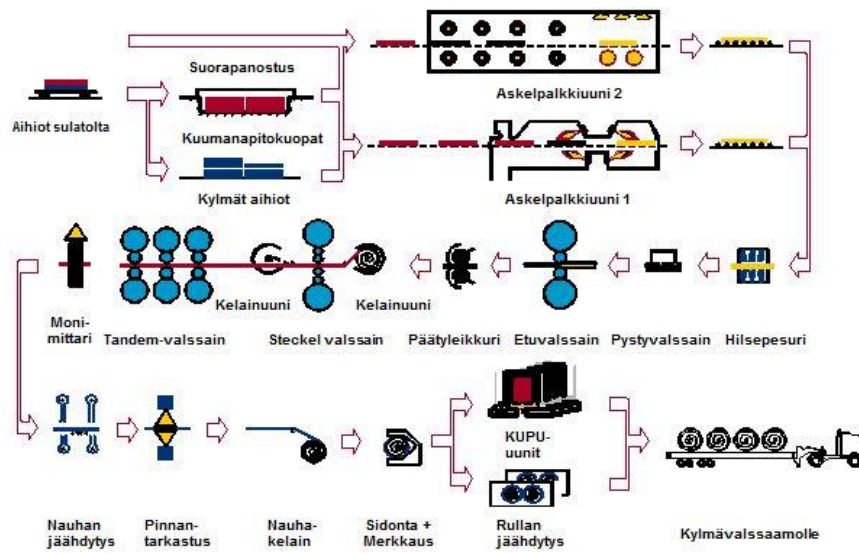


Kuva 1. Valssauksen periaate (The Library of Manufacturing)

Kuumavalssauksessa toimitaan niin korkeassa lämpötilassa, että materiaalissa tapahtuu nk. elpymistä eli sen mikrorakenne uusiutuu muokkauksen indusoimana. Ennen kuumavalssausta teräsaihion lämpötila nostetaan jopa yli 1250 °C lämpötilaan. Kuumavalssauksen tarkoituksena on ohentaa jatkuvavalettu, paksu aihio sopivan paksuiseksi kuumanauhaksi ja aikaansaada syntyvään kuumanauhaan mahdollisimman tarkka paksuusprofiili ja hyvä tasomaisuus. (Kauppi 2015.)

Kuumavalssausprosessi on esitetty kuvassa 2. Aihiot tulevat terässulatolta kuumavalssaamolle, jossa ne panostetaan askelpalkkiuuneihin ja niiden lämpötila nostetaan n. 1260 °C. Kuumennus kestää n. 2–3 tuntia, jonka jälkeen aihiot kuljetetaan valssauslinjalle. Outokummun tehtaalla Torniossa valssataan ruostumatonta nauhaa valssauslinjalla, jossa on etuvalssain (ks. kuva 3), Steckel-valssain (ks. kuva 4) ja kolme tandemvalssainta (ks. kuva 5). Etuvalssaimella 175–185 mm paksuiset aihiot valssataan 20–25 mm paksuuteen nk. esinauhaksi viidellä/seitsemällä edestakaisella pistolla. Steckel-valssaimessa aihioista esivalssattua nauhaa ohennetaan edestakaisilla pistoilla, joiden välillä nauhaa kelataan valssituolin molemmin puolin sijaitseviin 900–1000 °C lämpötilassa oleviin kelauuneihin. Tämän jälkeen nauha ohenee loppupaksuuteen mennessään kolmen tandemvalssaimen läpi kohti jäähdytysrataa. Nauhavalssaamalla nauhan loppupaksuudeksi saadaan 2.4–12.7mm. Valssauksen jälkeen nauha jäähdytetään vesisuihkulla haluttuun lämpötilaan ja kelataan. Valssauksen jälkeen kuumanauha jäähdytetään mahdollisimman nopeasti n. 600–650 °C lämpötilaan. Jäähtyminen ei vaikuta teräksen ominaisuuksiin juurikaan, koska sen aikana ei tapahdu faasimuutoksia hiiliterästen tapaan. (Kauppi 2015.)

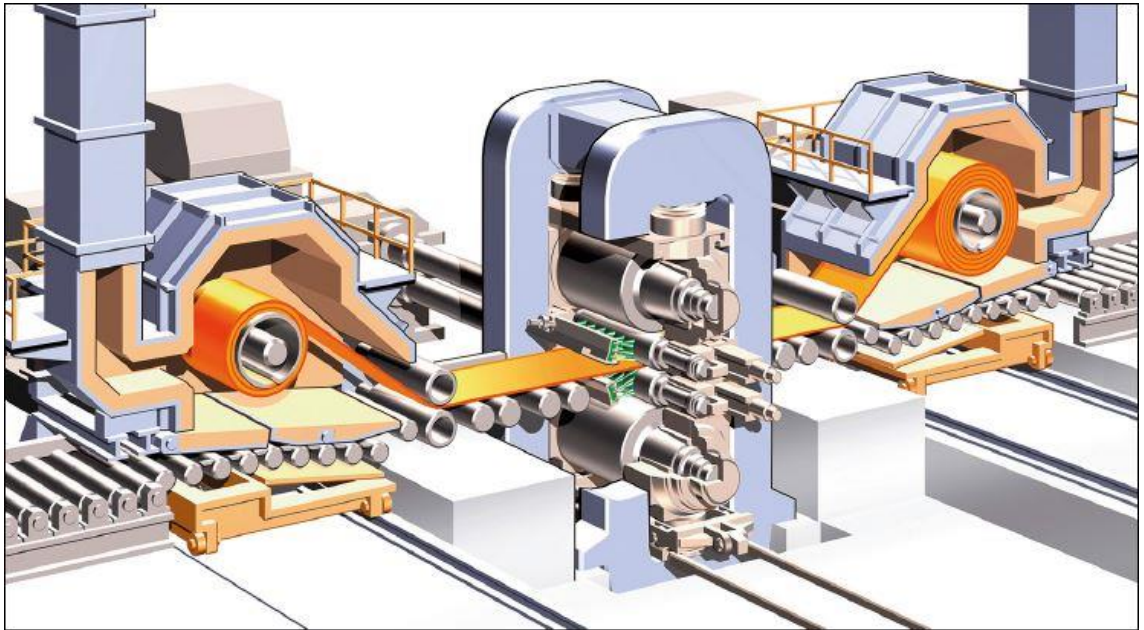
Kuumavalssattu nauha voidaan viimeistelyvalssata, jolloin kela aukikelataan ja siihen valssataan n. 1 % reduktio kylmänä 2-korkealla valssaimella, minkä jälkeen teräs kelataan takaisin rullalle päällekelaimella. Toimenpiteellä parannetaan teräsnauhan tasomaisuutta ja jossain määrin pinnanlaatua. (Teknologiateollisuus 2014, 54.)



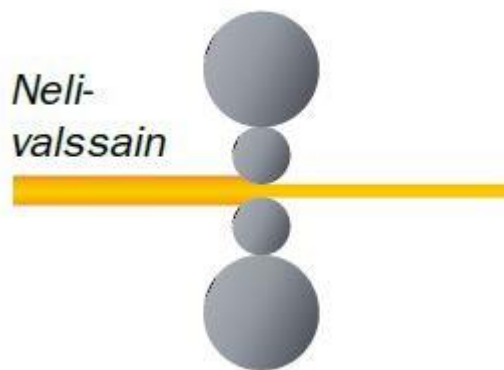
Kuva 2. Kuumavalssaamisprosessi (Kauppi 2015, 7)



Kuva 3. Etuvalssain (Kauppi 2015, 6)



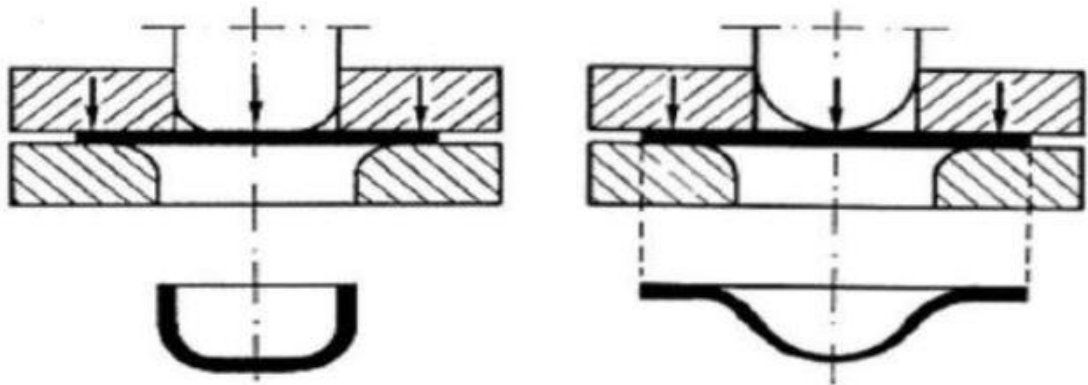
Kuva 4. Nauhan valssaus Steckel-valssaimella (Teknologiateollisuus 2014, 54)



Kuva 5. Nelivalssain (Teknologiateollisuus 2014, 58)

2.2 Kylmämuovaus

Teräksen kylmämuovaus tapahtuu yleensä huoneenlämmössä ja sen tarkoituksena on muovata kappale halutun muotoiseksi ilman vaurioita ja ilman liiallista seinämien ohenemista. Etuina kylmämuovatuilla tuotteilla ovat hyvä lujuus, pinnanlaatu, mittatarkkuus ja niiden nopea valmistaminen. Levynmuovaus jaetaan levyyn kohdistuvien jännitysten mukaan karkeasti venytysmuovaukseen ja syvävetoon (ks. kuva 6). (Vierelä 2012, 6.)

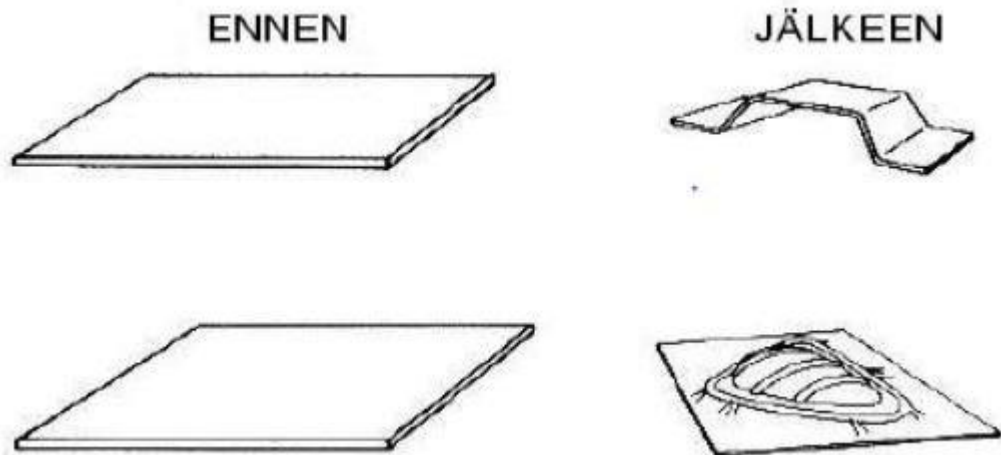


Kuva 6. Syvävedon (vasemmalla) ja venytysmuovauksen (oikealla) periaatekaaviolisesti esitettynä (Kivivuori 2011, 24)

Kuvassa 7 on esitetty periaatekuva venytysmuovauksesta. Siinä aihion reunojen luistaminen on estetty vetorenkaan ja levynpidättimen avulla. Koska materiaali ei pääse liukumaan vetorenkaan yli, aihio venyy sekä säteen että tangentin suunnassa. Puhdas venytysmuovaus ei ole kovinkaan yleinen valmistusmenetelmä, mutta syvävetoon yhdistettynä se on yleinen esim. kuperapohjaisten tuotteiden valmistuksessa. (Kivivuori 2011, 24.)

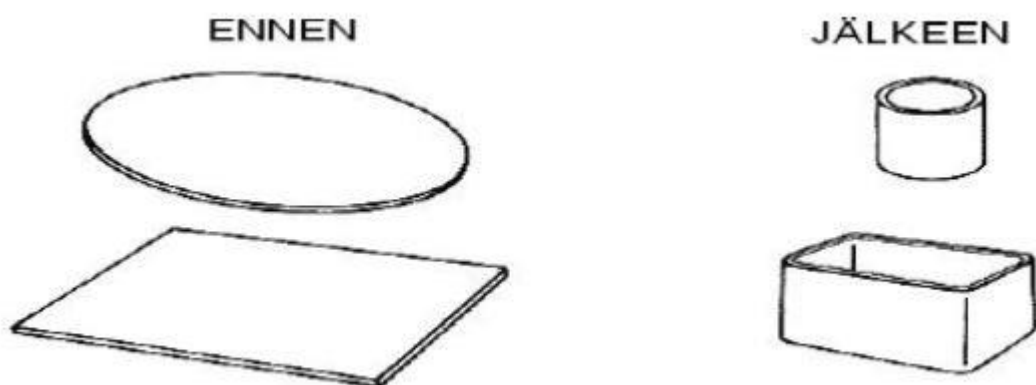
Levyä venytetään tasossa eri suuntiin ja samalla levy ohenee. Aihion reunojen luistaminen on estetty vetorenkaan ja levynpidättimen avulla. Aihio venyy säteen ja tangentin suunnassa, koska sen pääsy liukumaan vetorenkaan yli on estetty. Tämän seurauksena levy ohenee ja pinta-ala kasvaa. Venytysmuovauksessa levy ohenee ja repeämisvaara kasvaa ja tällöin ei saada aikaan yhtä syviä muotoja kuin syvävedolla. Käytännön muovausprosesseissa esiintyy yleensä samanaikaisesti kumpaakin, venytysmuovattavuutta ja syvävetoa, esimerkiksi silloin kun halutaan valmistaa kuperapohjaisia tuotteita. (Kivivuori 2011, 24.)

Venytysmuovattavuutta tutkiessa käytetään yleisesti esimerkiksi Erichsenin kokeetta. Kokeen avulla saadaan määritettyä venytysmuovattavuutta kuvaava parametri, Erichsenin luku IE. Mitä suurempi IE-luku, sitä parempi venytysmuovattavuus materiaalilla on. (Kivivuori 2011, 25.)



Kuva 7. Kaaviokuva venytysmuovauksesta. Aihion reunojen luistaminen on esitetty vetorenkaan ja levynpidättimen avulla (Kivivuori 2011, 24)

Syvävedossa aihio muovataan astiamaiseksi tai kuppimaiseksi tuotteeksi, jonka seinämäpaksuutta ei tarkoituksellisesti muuteta. Vedon aikana aihio liikuu pidätinlevyn ja vetorenkaan välistä painimen pakottamana ja muovautuu vetorenkaan pyöristyksen yli virratessaan kuppimaiseksi tuotteeksi (ks. kuva 8). Levyn paksuus pysyy alkuperäisenä tai saattaa jopa paksuuntua aihion tyssäytymisen seurauksena. (Kivivuori 2011, 25.)

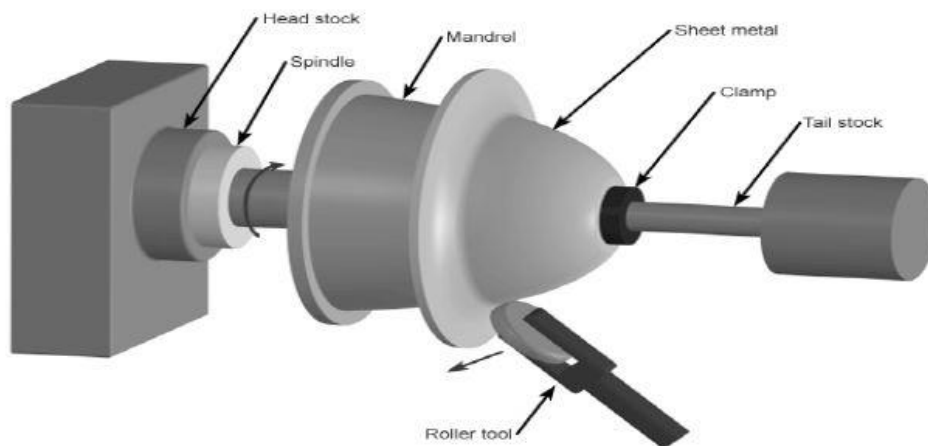


Kuva 8. Kuvaus syvävedetyistä kappaleista (Kivivuori 2011, 25)

2.3 Painosorvaus

Painosorvaus on metallien muovausmenetelmä, jossa valmistetaan ohutlevystä onttoja pyörähdyskappaleita. Painosorvatut metallikappaleet omaavat pyörähdysymmetriset muodot, esimerkkinä sylinteri, kartio tai pallonpuolisko. Tällä menetelmällä valmistetaan mm. keittiövälineitä, pölykapseleita, satelliittilautasia sekä rakettien kärkikartioita. (Kumar 2013, 173.)

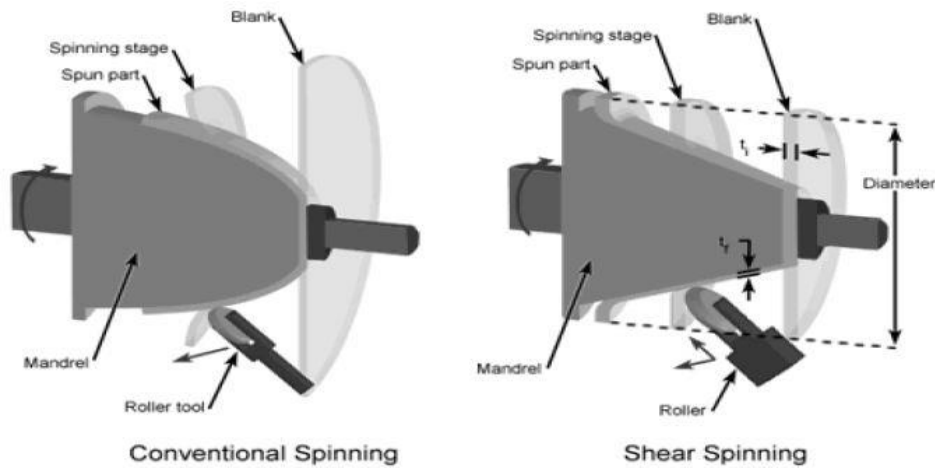
Painosorvaus (ks. kuva 9) suoritetaan manuaali- tai CNC-sorvilla ja se vaatii pyöreän ohutlevyaihion, muotin ja muovaintyökalun. Muotti on valmistettavan kappaleen sisäpuolen muotoinen, jonka päälle ohutlevy puristetaan. Suurissa tuotannoissa käytetään yleensä teräksestä sorvattuja muotteja. Muotin ja ohutlevyaihion pyöriessä sorvissa, painetaan ohutlevyä muovaintyökalulla pakottaen metallia taipumaan muotin ympärille. Tämä voi vaatia useampia painalluksia. Painosorvaus on syvävedon kaltainen muovausprosessi, jossa levynpaksuus pysyy muuttumattomana. (Kumar 2013, 173.)



Kuva 9. Painosorvausprosessi (Kumar 2013, 172)

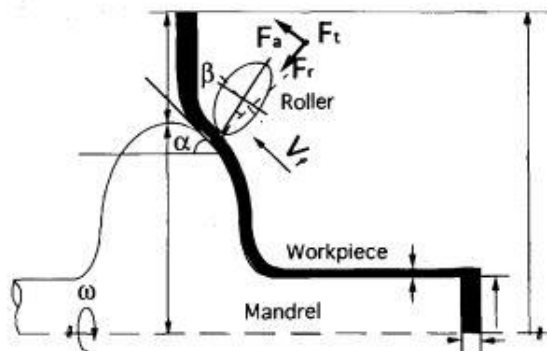
Painosorvaukselle on olemassa kaksi erilaista menetelmää, perinteinen painosorvaus ja leikkaussorvaus (ks. kuva 10). Perinteisessä painosorvauksessa muovaintyökalu painaa aihiota, kunnes se mukautuu muotin pinnalle. Tuloksena aihion halkaisija pienenee, mutta sen paksuus pysyy muuttumattomana. Leikkaussorvauksessa muovaintyökalu tuottaa painalluksen lisäksi alaspäin suuntautuvaa voimaa samalla venyttäen aihiota muotin ympärille. Tuloksena aihio

säilyttää alkuperäisen halkaisijansa, mutta sen paksuus pienenee. (Kumar 2013, 173.)



Kuva 10. Tavanomaisen painosorvauksen ja leikkaussorvauksen (shear spinning) eroavaisuus (Kumar 2013, 173)

Muovaintyökalun geometrialla on vaikutusta levyaihioon syntyviin voimiin. Työkalun vaikuttamat voimat voidaan jakaa kolmeen komponenttiin: aksiaalinen voima F_a , sädemäinen voima F_r , tangentin suuntainen voima F_t (ks. kuva 11). Muodonmuutosvyöhykkeellä aihiota kuormittaa sädemäinen voima F_r ja tangentialinen puristusvoima. Aihion seinämälle syntyy aksiaalisia vetojännityksiä. Samantapaisesti, kuin rajavetosuhteella (käsitellään tarkemmin luvussa 3.5), suhdetta alkuperäisen ja lopullisen halkaisijan välillä kutsutaan muovaussuhteeksi. (Palmieri, Preciso, Ruzinov, Stark & Kulik 1995, 571.)



Kuva 11. Levyaihioon vaikuttavat voimat painosorvauksessa (Palmieri, Preciso, Ruzinov, Stark & Kulik 1995, 571)

3 TERÄSTEN MUOVATTAVUUS

Tässä luvussa käydään läpi niitä terästen ominaisuuksia, joita tässä työssä käytetään tutkittaessa terästen muovattavuutta.

3.1 Mekaaniset ominaisuudet

Teräksen muovaamisen lähtökohtana on pääseminen plastisen muodonmuutoksen alueelle. Tämän takia myötörajalta ja myötölujuuden $R_{p0.2}$ ylittämällä on suuri merkitys muovaamisen kannalta. Merkintä $R_{p0.2}$ tarkoittaa jännitystä, jolla vetokokeessa saadaan aikaan 0.2 prosentin pysyvä muodonmuutos. Terästen myötölujuuteen voidaan vaikuttaa esimerkiksi seostuksella, erkaumien ja raekoon kontrolloinnilla tai faasirakenteella. (Kauppi 2012.)

Murtolujuus R_m tarkoittaa rajaa, jonka jälkeen vetokokeessa käytettävä koesauva alkaa kuroutua ja lopulta katkeaa. Myötösuhde $R_{p0.2}/R_m$ kuvaa usein aineen sitkeyttä. Joissakin käyttösovelluksissa arvoa 0.7 pidetään jo riittävänä sitkeytenä. Sitkeyden ilmaisemiseen voidaan käyttää myös murtovenymää A . Murtovenymä ilmoitetaan prosentteina alkuperäisestä mittapituudesta. Murtovenymä on helppo määrittää ja siksi hyvä tunnusluku sitkeyden vertaamiseen. Mekaaniset ominaisuudet voidaan määrittää vetokokeella. (Linke 2014, 11.)

Tasavenymä (A_g) on tärkein muovauksessa tarvittavaa sitkeyttä kuvaava vetokokeella määritettävä suure. Sillä tarkoitetaan sitä pysyvää venymää, joka koesauvaan on syntynyt ennen paikallisen kuroutumisen alkamista. Sitä voidaan käyttää mittana muodonmuutoskykyä arvioitaessa, eli mitä suurempi A_g :n arvo on sitä parempi muovattavuus. (Suni 2011, 19.)

3.2 Plastinen venymäsuhde r

Plastinen venymäsuhde r määritetään vetokokeessa tapahtuvan poikittais- ja paksuussuuntaisen venymän suhteeksi. Vetosauvaan piirretään venymäsuhteen määrittämistä varten venymämittausmerkit, joista pitkittäinen ja poikittainen venymä voidaan mitata. Venymämittausmerkkien avulla voidaan laskea plastinen venymäsuhde r . Arvon ollessa 1, venyy materiaali joka suuntaan saman verran ja sitä kutsutaan isotrooppiseksi. Levyn muokkauksen kannalta edullisinta kuitenkin on anisotrooppinen materiaali, jolla r -arvo on 1.6–1.9. Tällöin levyn paksuus voi muuttua veto- ja pidätinrenkaan välissä kupin seinämää liiaksi rasittamatta. Anisotrooppisesta materiaalista voidaan vetää syvempiä tuotteita. (Kivivuori 2011, 26.)

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 plastisen venymäsuhteen 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.

$$\bar{r} = \frac{r_{0/20} + 2r_{45/20} + r_{90/20}}{4} \quad (1)$$

missä

$r_{0/20}$ on plastinen venymäsuhde valssaussuunnan suuntaisesti työstetystä koesauvasta 20 % pysyvän venymän jälkeen määritettynä

$r_{45/20}$	on	plastinen venymäsuhde 45 asteen kulmassa valssaussuuntaan nähden työstetystä koesauvasta 20 % pysyvän venymän jälkeen määritettynä
$r_{90/20}$	on	plastinen venymäsuhde kohtisuoraan valssaussuuntaan nähden työstetystä koesauvasta 20 % pysyvän venymän jälkeen määritettynä.

(Juntunen 2010, 25.)

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

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

missä

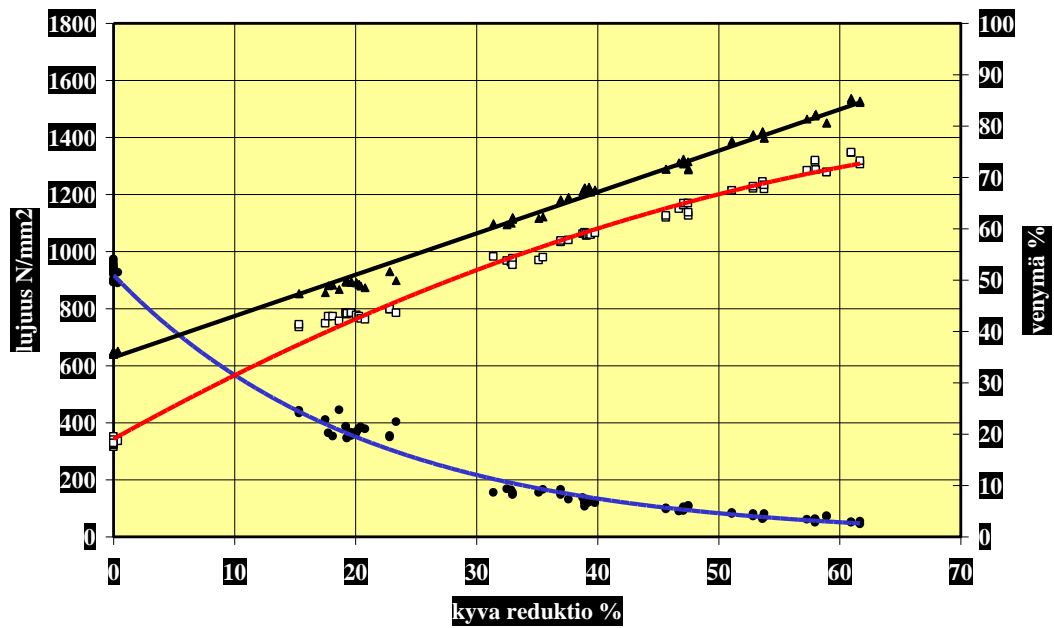
$r_{0/20}$	on	plastinen venymäsuhde valssaussuunnan suuntaisesti työstetystä koesauvasta
$r_{45/20}$	on	plastinen venymäsuhde 45 asteen kulmassa valssaussuuntaan työstetystä koesauvasta
$r_{90/20}$	on	plastinen venymäsuhde kohtisuoraan valssaussuuntaan nähden työstetystä koesauvasta.

(Juntunen 2010, 26.)

3.3 Muokkauslujittumiseksponentti n

Muokkauslujittumisella ymmärretään metallin kykyä vastustaa muokkautumista muodonmuutoksen kasvaessa lisääntyvän lujittumisen ansiosta. Metallin lujittuminen perustuu dislokaatioiden liikkeen vaikeutumiseen. Kylmämuokkauksessa dislokaatiotiheys kasvaa ja eri liukutasoilla etenevät dislokaatiot leikkaavat

toisiaan. Dislokaatiot takkuuntuvat ja muodostavat lukkiintuneita ryhmyksiä, joka saa aikaan metallin muokkauslujittumisen. Muokkauslujittuminen ilmenee kuvasta 12, jossa myötö- ja murtolujuus nousevat kylmävalssausraduktio kasvessa. Murtolujuus on esitetty mustalla viivalla ja myötölujuus punaisella viivalla. (Kauppi 2012.)



Kuva 12. Austenittisen ruostumattoman teräksen myötö- ja murtolujuuden riippuvuus kylmävalssausraduktioista (Kauppi 2012, 32)

Teräksen muokkauslujittumista voidaan kuvata Hollomonin (kaava 3) ja Ludwigin (kaava 4) yhtälöillä:

$$\sigma = k\varepsilon^n \quad (3)$$

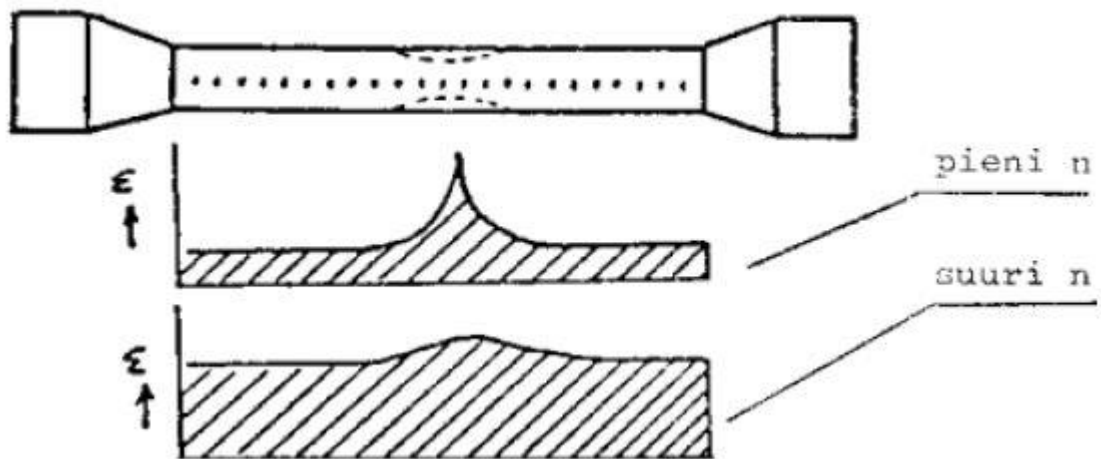
$$\sigma = \sigma_0 + k\varepsilon^n \quad (4)$$

missä

σ	on	jännitys
k	on	muokkauslujittumiskerroin
ε	on	todellinen venymä
n	on	muokkauslujittumiseksponentti.

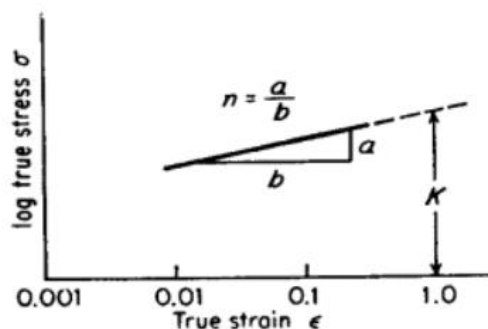
(Kauppi 2012, 29.)

Muokkauslujittumiseksponentti n kuvaa hyvin materiaalin venytysmuovattavuutta. Mitä isompi n -arvo on, sitä suurempi lujittuminen ja näin ollen sitä ohuemaksi voi tuotteen venyttää sen murtumatta. Hyvän n -arvon omaavissa materiaaleissa venyminen laajenee isommalle alueelle, kun taas huonomman n -arvon omaavissa venyminen tapahtuu enemmän yhdessä paikassa ja murtumisen vaara on isompi (ks. kuva 13). (Vierelä 2012, 10.)



Kuva 13. Muokkauslujittumisen vaikutus materiaalin venymään (Vierelä 2010, 10)

Levy- ja nauhatuotteille muokkauslujittumiseksponentin n määrittäminen on esitetty kansallisessa standardissa SFS-EN ISO 10275:2014. Sen mukaan arvo määritetään lineaarisella regressiolla jännitys-venymäkäyrän arvoista logaritmisella todellisen venymän (ϵ) ja logaritmisella todellisen jännityksen (σ) avulla. Esimerkki tuloksesta on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. Muokkauslujittumiseksponentin määrittämiseen käytettävä $\log \epsilon$ - $\log \sigma$ -käyrä (Total Materia 2010)

Lineaarisessa regression tekemiseen käytettävä venymäalue on ilmoitettava tuloksissa.

- n_{4-6} : lineaarinen regressio $\lg(\sigma) = n \times \lg(\varepsilon) + \lg C$, 4 – 6% pysyvän muodonmuutoksen alueella,
- n_{10-15} : lineaarinen regressio $\lg(\sigma) = n \times \lg(\varepsilon) + \lg C$, 10 – 15% pysyvän muodonmuutoksen alueella,
- n_{10-20} : lineaarinen regressio $\lg(\sigma) = n \times \lg(\varepsilon) + \lg C$, 10 – 20% pysyvän muodonmuutoksen alueella,
- n_{2-20} : lineaarinen regressio $\lg(\sigma) = n \times \lg(\varepsilon) + \lg C$, 2 – 20% pysyvän muodonmuutoksen alueella. (SFS-EN ISO 10275:2007.)

3.4 Rajavetosuhde LDR

Rajavetosuhdetta pidetään käytännössä syvävedettävyyden mittana. Rajavetosuhde riippuu huomattavasti materiaalin r-arvosta. Mitä suurempi r-arvo materiaalilla on, sitä suurempi rajavetosuhdekin on. Korkeilla r-arvoilla ja siten suurilla rajavetosuhteilla voidaan valmistaa syvempiä tai vaikeampimuotoisia tuotteita. (Kivivuori 2011, 26.)

Rajavetosuhde voidaan määrittää syvävetokokeilla, joissa määritetään suurimman levyaihion halkaisija D:n suhde syvävedetyn ehjän kupin halkaisijaan d (kuva 15). (Kivivuori 2011, 26.)



Kuva 15. Vasemmalla suurin aihio, joka on vedetty oikealla olevaksi kupiksi (Kivivuori 2011, 26)

Syvävedolla muovattujen kuppien helmoihin muodostuu usein harjanteita, joita kutsutaan korviksi. Korvia muodostuu kaksi, neljä tai kuusi riippuen materiaalin anisotrooppisuudesta. Korvien korkeus ja sijainti valssaussuuntaan nähden (0° , 45° tai 90°) liittyy suoraan materiaalin Δr -arvoon. Mikäli Δr -arvo on suurempi, kuin nolla, muodostuvat korvat 0° :n ja 90° :n kohdalle. Δr -arvon ollessa pienempi, kuin nolla muodostuvat korvat 45° :n kohdalle. (Juntunen 2010, 19.)

4 AINEENKOETUS

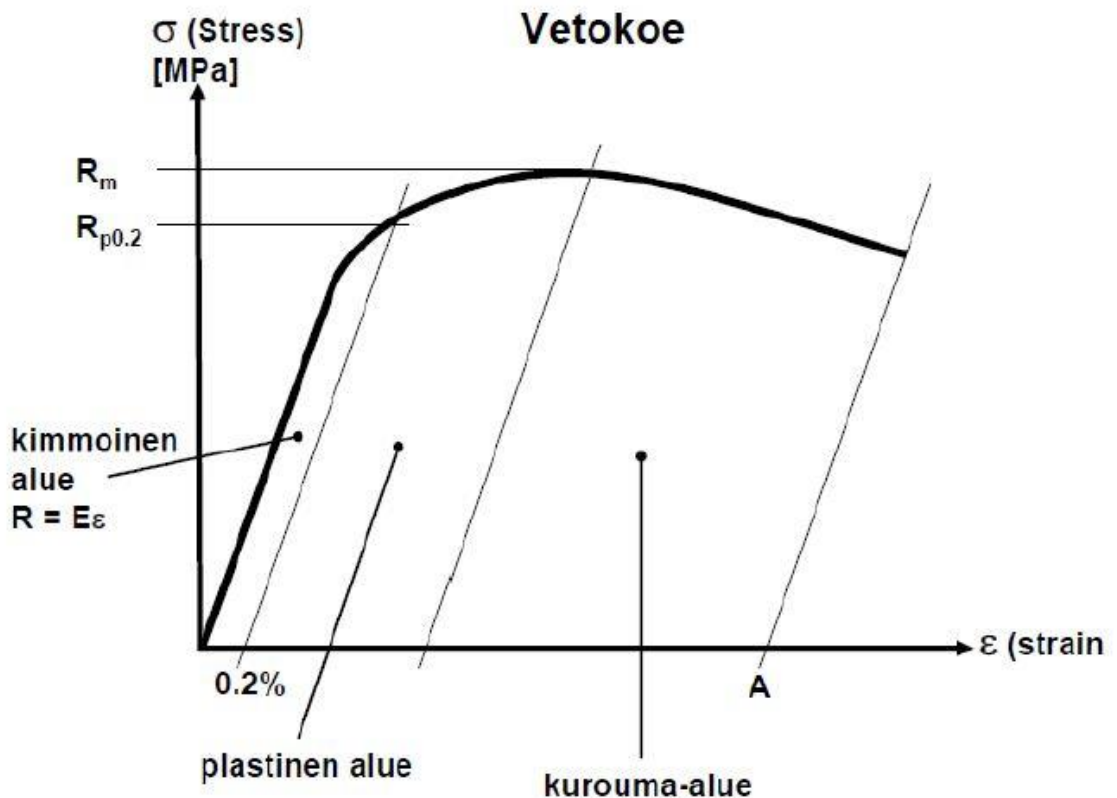
Erilaisilla materiaalin aineenkoetusmenetelmillä tutkitaan materiaalin käyttäytymistä ja ominaisuuksia. Aineenkoetusmenetelmiä hyödynnetään mm. uusien materiaalien T&K-toiminnassa, valmistusmenetelmien kehittämisessä, laadun- ja kunnonvalvonnassa, materiaalivalinnassa sekä vauriotutkimuksessa. Rikko- vassa aineenkoetuksessa pieni materiaalinäyte (koesauva) irrotetaan levystä, putkesta tai tuotantokappaleesta, jolloin tarkastuksen kohde rikotaan. Tässä työssä aineenkoetusmenetelminä käytettiin vetokoetta sekä reiänlaajennustes- tiä. (Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys ry. 2004.)

4.1 Vetokoe

Teräksen lujuus määritetään standardisoidun vetokokeen avulla. Vetokokeen suorituksen periaate on yksinkertainen: tunnetun poikkipinta-alan omaavaa koisauvaa vedetään kasvavalla voimalla, kunnes se katkeaa. Kokeen aikana rekisteröidään voima (F) ja sen vaikutuksesta syntyvä pysyvä muodonmuutos eli venymä (e). Kokeen tuloksena saadaan määritettyä kullekin materiaalille ominainen jännitys-venymäkäyrä (ks. kuva 16). (Kauppi, Kyröläinen & Lukkari.)

Vetokokeen merkitys muovattavuutta tutkittaessa on myös hyvin tärkeä, sillä sen avulla saadaan selville materiaalin mekaaniset ominaisuudet (ks. luku 3.1) ja näin ollen materiaalin soveltuvuus muovaukseen ylipäätään. Tärkeimmät me- tallien perusominaisuudet ovat lujuus ja sitkeys, jotka saadaan määritettyä ve- tokokeen avulla. Vetokokeen avulla määritetään myös muovattavuuden kannal- ta tärkeät r - ja n -arvot (ks. luvut 3.2 ja 3.3). Nykyaikaisilla vetokoneilla, jotka ovat tietokoneohjattuja ja joissa venymänmittaus tehdään ekstensiometrillä, saadaan tulokset suoraan esim. MS Excelissä käsiteltäviksi. Standardi vetoko- keen suorittaminen huoneenlämpötilassa on määritelty kansallisessa standar- dissä SFS-EN ISO 6892–1:2009. Samassa standardissa on myös suositukset tietokoneohjattujen vetokoneiden käyttöä varten. (Vierelä 2012, 25.)

Kuvassa 16 on esitetty periaatteellinen jännitys-venymäpiirros. Siitä voidaan erottaa kolme erilaista aluetta. Kimmoisella alueella on voimassa Hooken laki ($\sigma = E\varepsilon$), ja jos jännitys tässä vaiheessa poistetaan, koesauva palautuu alkuperäiseen muotoonsa. Seuraavalla alueella, jossa muodonmuutos on pysyvää eli plastista, sauva venyy tasaisesti ja sitä kutsutaan tasavenymäalueeksi. Tällä alueella tapahtuu materiaalin muokkauslujittuminen. Viimeisellä alueella, kurouma-alueella, sauva venyy paikallisesti ja ohenee venymäkohdassaan, kunnes lopulta murtuu. (Suni 2011, 18.)

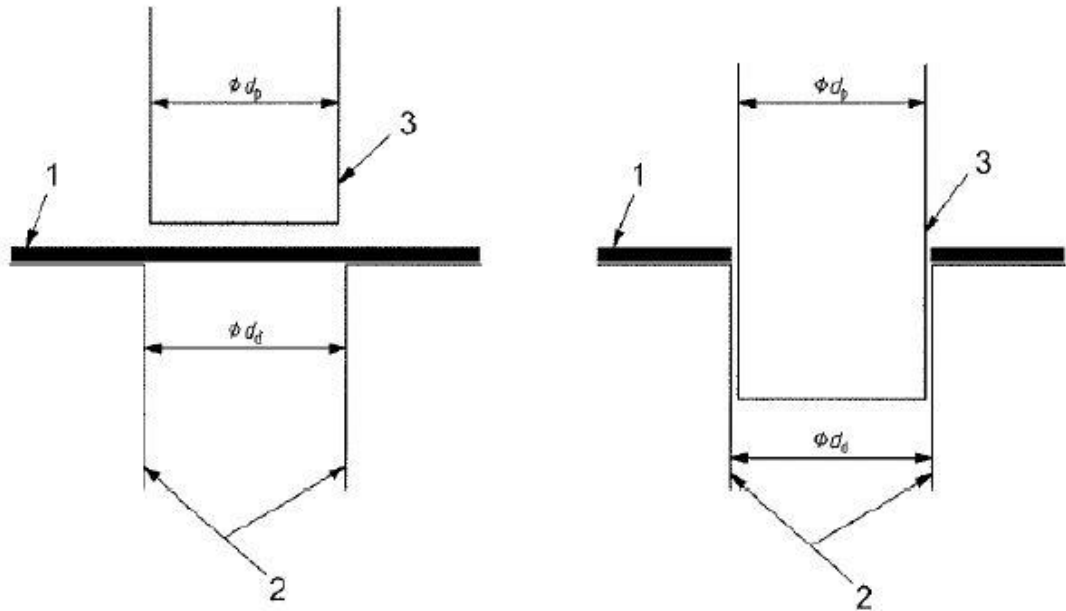


Kuva 16. Jännitys-venymäkäyrä metallille (Vierelä 2012, 26)

4.2 Reiänlaajennustesti

Reiänlaajennustestillä selvitetään, miten kappaleen ominaisuudet käyttäytyvät reikää tehdessä. Reiänlaajennustesti on määritelty kansainvälisessä standardissa ISO 16630, ja sitä voidaan käyttää 1,2–6 mm vahvuisten metallinauhojen ja levyjen testauksessa, joiden leveys on vähintään 90mm. Reiänlaajennustesti

suoritetaan kahdessa vaiheessa, ensimmäisessä vaiheessa suoritetaan reiänlävistys standardin mukaisen työkalun avulla (kuva 17). (Vierelä 2011, 23.)



Kuva 17. Reiänlävistyksen periaatekuva ennen lävistystä ja sen jälkeen. 1=koekappale, 2=tyyny, 3=lävistin, d_p =lävistimen halkaisija, d_d =tyynyn sisähalkaisija (Vierelä 2012, 24)

Toisessa vaiheessa reikää laajennetaan kartionmuotoisella painimella (kuva 18). Pidätinvoiman pitää olla tarpeeksi suuri, jotta saadaan estettyä materiaalin virtaaminen. Kartion liike tulee pysäyttää heti, kun havaitaan murtuma, joka on edennyt levyn paksuuden läpi. Koekappaleen reiän halkaisija D_h mitataan kahdesta eri kohdasta ja niiden keskiarvolla lasketaan reiänlaajennussuhde kaavalla 3.

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

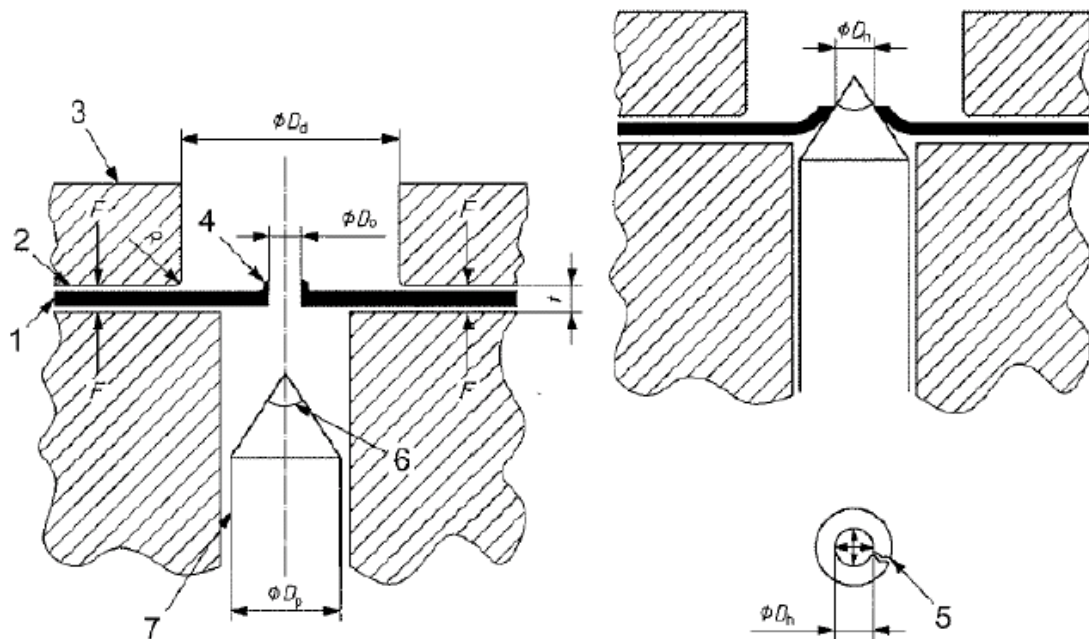
(3)

missä

λ on reiänlaajennussuhde [%]

D_h on reiän halkaisija laajennuksen jälkeen [mm]

D_0 on reiän halkaisija ennen koetta [mm]. (Vierelä 2012, 24.)



Kuva 18. Reiänlaajennuksen periaatekuva ennen ja jälkeen testin. 1=koekappale, 2=vetorengas, 3=vetorengaan vastinpinta, 4=lävistys, 5=murtuma, 6=purse, D_d =vetorengaan sisähalkaisija, D_p =lävistimen alahalkaisija, D_h =reiän halkaisija murtuman jälkeen (Vierelä 2012, 25)

5 KUUMAVALSSATUT TERÄKSET

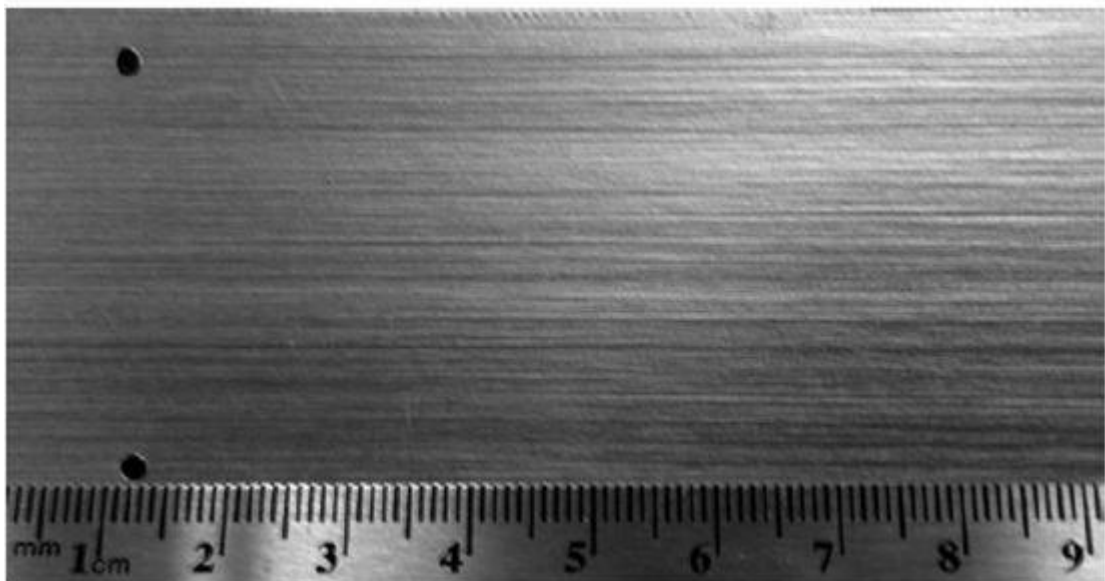
Kuumavalssatut teräkset eroavat kylmävalssatuista laaduista mm. pinnanlaadultaan. Kuumavalssattujen laatujen suurempi pinnankarheus ja pienempi heijastavuus rajoittavat niiden käyttöä kohteisiin, joissa pinnanlaadulla ei ole suurta merkitystä. Kylmävalssaamalla saadaan tehtyä myös ohuempia materiaaleja. (Kauppi 2015.)

Sulattoprosessissa jatkuvavalussa teräkselle syntyy karkea jähmettymisrakenne ja siinä tapahtuu seosaineiden suotautumista. Ennen kuumavalssausta teräsaihiolle tehdään nk. tasaushehkutus, jossa suotautumisesta johtuvat seosainepitoisuuserot saadaan tasoittumaan mahdollisimman hyvin. Hehkutus tehdään askelpalkkiuunissa, jossa aihion lämpötila nostetaan mahdollisimman korkealle seosaineiden diffuusion varmistamiseksi, mikä puolestaan aikaansaa paikallisten pitoisuuserojen tasoittumisen. Hehkutuslämpötila austeniittisilla teräslaaduilla on 1250 °C ja ferriittisellä 1100 °C. (Kauppi 2015.)

Aihion paksuus on n. 175–185 mm ja kuumavalssatun nauhan loppupaksuus vaihtelee 2.4–12.7 mm välillä, mikä tarkoittaa, että kokonaisreduktio kuumavalssauksessa voi olla yli 98 %. Näin suuren reduktion aikaansaamiseksi tarvitaan kolme valssausvaihetta: 1. esivalssaus, 2. Steckel-valssaus ja 3. tandem-valssaus. Valssausvaiheet selostettiin tarkemmin luvussa 2.1. (Kauppi 2015.)

Rekristallisaatio aikaansaa sen, että pysyvään muodonmuutokseen vaadittava valssausvoima ei kasva olennaisesti valssauksen edetessä, eli muokkauslujittuminen 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 karkearaakeiseen rakenteeseen liiallisen rakeenkasvun johdosta. (Kauppi 2015.)

Valssauksen jälkeen kuumanauha jäädytetään mahdollisimman nopeasti n.600–650 °C:een. Jäähtyminen ei vaikuta teräksen ominaisuuksiin juurikaan, koska sen aikana ei tapahdu faasimuutoksia hiiliterästen tapaan. Monilla teräksillä lopputuotteen mekaanisiin ominaisuuksiin ja erityisesti muovattavuuteen vaikuttaa kuumavalssauksessa syntyvä suuntautuneisuus eli tekstuuri. Austeniittisten ja täysin ferriittisten teräslaatuojen kohdalla valssaus ei vaikuta nauhaan syntyvään tekstuuriin kovinkaan paljon. Sen sijaan sellaisiin ferriittisiin laatuoihin, joiden rakenteessa on korkeissa lämpötiloissa austeniittia (esim. EN 1.4016 ja EN 1.4003) ferriittiin ja austeniittiin syntyy erilainen tekstuuri kuumavalssauksessa. Kun austeniitti hajaantuu lämpötilan laskiessa, syntyvään ferriittiin muodostuu erilainen tekstuuri ja näihin alueisiin erkautuu myös paljon kromikarbideja. Varsinkin EN 1.4016 teräksessä tällainen valssausuunnassa esiintyvä voimakas tekstuuri aiheuttaa muovauksessa 10–25 % reduktiolla pintavikaa, jota kutsutaan roppingiksi (ks. kuva 19). (Kauppi 2015.)



Kuva 19. Roppingia AISI 430 -tyyppisessä teräksessä (Kauppi 2015, 28)

6 KOEMATERIAALIT JA MENETELMÄT

Koemateriaalien EN 1.4307 ja EN 1.4404 muovattavuusominaisuuksia tutkittiin Lapin Ammattikorkeakoulun Kemian yksikön rikkovan aineenkoetuksen laboratoriossa. Muovattavuuden kannalta olennaisia mekaanisia ominaisuuksia selvitettiin vetokokeen avulla. Lisäksi teräkselle EN 1.4404 tehtiin reiänlaajennustestit.

6.1 Koemateriaalit

Tutkimusmateriaalit olivat Outokumpu Stainless Oy:n toimittamia austeniittisia kuumavalssattuja teräksiä EN 1.4307 (teräs A tästä eteenpäin) ja EN 1.4404 (teräs B tästä eteenpäin). Teräs A on matalahiilinen yleisteräs, ns. 18/8-teräs ja teräs B on matalahiilinen 'haponkestävä' teräslaatu. Outokummun notaatiossa A-terästä merkitään Polarit-koodilla P720-1 ja B-terästä P750-2. Terästen standardin SFS-EN 10088–2:2014 mukaiset kemialliset koostumukset ja mekaaniset ominaisuudet on annettu taulukoissa 1 ja 2.

Taulukko 1. Terästen ohjeelliset kemialliset koostumukset (SFS-EN 10088–2:2014)

Teräslaji	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	N	Cu
A	0.03	1.00	2.00	0.045	0.015	17.5-19.5	-	8.0-10.5	0.10	-
B	0.03	1.00	2.00	0.045	0.015	16.5-18.5	2.00-2.50	10.0-13.0	0.10	-

Taulukko 2. Tutkittujen terästen mekaaniset ominaisuudet (SFS-EN 10088–2:2014)

Teräs	Rp 0.2 [Mpa]	Rm [Mpa]	A min. [%]
A	200	520 - 700	45
B	220	530 - 680	40

Outokummulla näyteaihiot leikattiin tuotantokuumanauhoista. Teräksen A tapauksessa näyteaihiota leikattiin 10 eri kuumanauhasta ja teräksen B tapauksessa 12 eri kuumanauhasta. Muutamassa tapauksessa näyteaihiota leikattiin sa-

man kuumanauhan molemmista päistä. Näyteaihioiden kokonaismäärät olivat siten teräksen A tapauksessa 11 kpl ja teräksen B 18 kpl.

6.2 Vetokokeet

Vetokokeet tehtiin standardin SFS-EN ISO 6892 -1:2009 mukaan Lapin ammattikorkeakoulun ainetta rikkovan aineenkoetuslaboratorion Zwick Allround-floor 250 kN vetokoneella. Vetosauvat toimitettiin Outokummulta valmiiksi koneistettuina. Sauvoja oli leikattu näyteaihioista 0° , 45° ja 90° kulmissa valssaussuuntaan nähden ja samasta emolevystä toimitettiin aina kolme kpl vetosauvoja/valssaussuunta.

Jokaisesta vetosauvasta mitattiin standardin mukaisesti niiden paksuudet ja leveydet kolmesta kohtaa mikrometrillä ja niiden keskiarvot syötettiin ohjelmaan. Venymän mittauksessa käytettiin pitkittäistä ja poikittaista ekstensometriä, mikä mahdollisti myös r-arvojen määrittämisen vetokokeessa. Vetokokeen tuloksena saatiin näytteiden myötö- ja murtolujuudet, venymäarvot, muokkauslujittumiseksponentti sekä r- ja Δr -arvot. Keskimääräiset r- ja Δr -arvot laskettiin kaavoilla 1 ja 2.

Vetosauvat merkattiin siten, että jokaiselle näytesarjalle annettiin teräksen tunnus (A tai B), juokseva näytenumero (1...n) ja vetosauvan leikkaussuunnan ilmaiseva tunnus ($\pi = 0^\circ$, $45 = 45^\circ$ ja $p_0 = 90^\circ$).

6.3 Reiänlaajennussuhteen määrittäminen

Reiänlaajennustesti tehtiin Lapin ammattikorkeakoulun ainetta rikkovan aineenkoetuslaboratorion Erichsenin 145-60 ohutlevyjen muovattavuustutkimuslaitteella standardin ISO 16630 mukaisesti. Tämä testi tehtiin ainoastaan B-teräkselle. Tavoitteena oli yksinkertaisesti saada testituloksia, koska ruostumattomien terästen reiänlaajennuskykyä ei ole paljoa testattu.

Testiä varten toimitettiin kolme $150 \times 500 \text{ mm}^2$:n kokoista näyteaihiota, joihin jokaiseen lävistettiin viisi $\varnothing 10 \text{ mm}$:n reikää 100 mm :n etäisyydelle toisistaan. Levyn paksuudesta johtuen reikien lävistykset jouduttiin tekemään Jaloteräs-studiolla pylväsporakoneella. Levyn pidinvoimana käytettiin kahdelle ensimmäiselle reiänlaajennukselle 50 kN , minkä jälkeen voimaa nostettiin 300 kN . Lastuamisnopeus oli 15 mm/min .

6.4 Grubbsin testi

Mittaustuloksien muista selvästi poikkeavat arvot (harha-arvot, engl. outlier) pyrittiin havaitsemaan ja poistamaan, koska ne eivät kuulu mittaustulosten muodostamaan jakaumaan. Jos nämä arvot otetaan datan tilastollisessa analysoinnissa huomioon, lasketut tulokset (keskiarvo, hajonta, jne.) vääristyvät.

Liikaa normaalijakaumasta poikkeavat arvot on helppo määrittää Grubbsin testillä. Siinä käytetään alla esitetty kaavaa:

$$G = \frac{|x_{\text{poikkeama}} - \bar{x}|}{s}$$

missä \bar{x} = mittaustulosten keskiarvo, s = keskihajonta ja $x_{\text{poikkeama}}$ = muista poikkeava mittaustulos, jonka epäillään olevan sarjan ulkopuolella. (Eklund 2007, 26.)

Grubbsin testi on helppo tehdä esim. Minitab – tilastomatematiikkaohjelmistolla. Tässä työssä käytettiin sitä testin tekemiseen.

7 TULOKSET

7.1 Vetokoetulokset

Teräksen A vetokoetuloksista näytekohtaisesti lasketut keskiarvot on annettu taulukossa 3. Taulukon alla on laskettu aineistolle kokonaiskeskiarvo ja hajonta sekä vaihteluväli (min, max).

Tulosten perusteella teräksen myötölujuus vaihteli keskimäärin välillä 260–288MPa, murtolujuus välillä 600–618MPa, murtovenymä välillä 51.7–57.4 %, r-arvo välillä 0.89–1.08, Δr -arvo välillä -0.28–0.11 ja muokkauslujittumiseksponentin n arvo välillä 0.22–0.36. Näytteen A10 arvot on poistettu, koska r-arvojen määrittäminen oli virheellinen.

Taulukko 3. Teräksen A vetokokeiden tulokset.

Teräs	N:o	pk	Rp0.2	Rm	A5	Ag	r	Δr	n _{4-6/Ag}	n _{10-15/Ag}	n _{10-20/Ag}	n _{2-20/Ag}
		mm	Mpa	Mpa	%	%						
A1	1	4.85	260	607	57.3	50.1	0.92	-0.22	0.22	0.34	0.36	0.28
A1	2	4.85	260	607	57.0	49.8	0.91	-0.20	0.23	0.34	0.36	0.28
A1	3	4.86	263	608	57.4	50.0	0.93	-0.23	0.22	0.34	0.36	0.28
A2	1	4.47	278	607	54.3	47.1	0.92	-0.24	0.23	0.34	0.36	0.28
A2	2	4.47	278	604	54.4	47.0	0.93	-0.21	0.23	0.35	0.36	0.28
A2	3	4.47	274	601	53.6	46.6	0.94	-0.25	0.23	0.35	0.36	0.28
A3	1	4.63	263	603	56.4	48.9	1.08	-0.24	0.23	0.35	0.36	0.28
A3	2	4.64	272	602	56.7	48.9	1.05	-0.22	0.23	0.34	0.36	0.28
A3	3	4.63	272	600	56.0	48.2	0.99	-0.03	0.23	0.34	0.36	0.28
A4	1	5.48	282	614	52.5	46.1	0.91	-0.18	0.22	0.33	0.35	0.27
A4	2	5.48	280	612	53.0	46.2	0.92	-0.22	0.22	0.33	0.35	0.27
A4	3	5.48	281	611	53.9	46.4	0.91	-0.21	0.22	0.34	0.35	0.27
A5	1	5.61	280	608	54.0	47.4	0.99	-0.28	0.22	0.33	0.35	0.27
A5	2	5.60	280	607	53.9	47.2	0.99	-0.26	0.22	0.33	0.35	0.27
A5	3	5.60	278	605	54.5	47.5	0.95	-0.18	0.22	0.33	0.35	0.27
A6	1	5.47	280	608	53.2	46.5	0.90	-0.17	0.22	0.34	0.35	0.27
A6	2	5.45	280	609	53.8	47.0	0.89	-0.16	0.22	0.34	0.35	0.27
A6	3	5.46	281	610	54.0	46.6	0.91	-0.17	0.22	0.34	0.35	0.27
A7	1	5.48	284	611	53.0	46.1	1.08	0.11	0.22	0.34	0.35	0.27
A7	2	5.47	284	610	52.6	46.0	1.03	0.07	0.22	0.33	0.35	0.27
A7	3	5.46	284	611	51.7	45.4	0.93	-0.19	0.22	0.33	0.35	0.27
A8	1	5.09	287	614	53.3	46.1	0.93	-0.24	0.22	0.34	0.35	0.27
A8	2	5.07	287	613	53.1	46.0	0.94	-0.23	0.22	0.34	0.35	0.27
A8	3	5.08	288	613	53.0	45.9	0.93	-0.23	0.22	0.34	0.35	0.27
A9	1	4.91	283	618	54.4	46.9	0.91	-0.17	0.22	0.34	0.35	0.28
A9	2	4.90	283	617	54.2	46.6	0.90	-0.17	0.23	0.34	0.36	0.28
A9	3	4.91	284	616	54.5	46.8	0.91	-0.18	0.22	0.34	0.36	0.28
A11	1	4.62	265	608	55.6	49.8	0.94	-0.27	0.22	0.33	0.35	0.27
A11	2	4.63	263	606	56.1	49.9	0.93	-0.28	0.22	0.33	0.35	0.27
A11	3	4.63	263	603	55.8	49.8	0.95	-0.26	0.22	0.33	0.36	0.27
	keskiarvo	5.06	277	609	54.4	47.4	0.95	-0.19	0.22	0.34	0.35	0.27
	hajonta	0.40	9	5	1.5	1.5	0.05	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00
	min	4.47	260	600	51.7	45.4	0.89	-0.28	0.22	0.33	0.35	0.27
	max	5.61	288	618	57.4	50.1	1.08	0.11	0.23	0.35	0.36	0.28

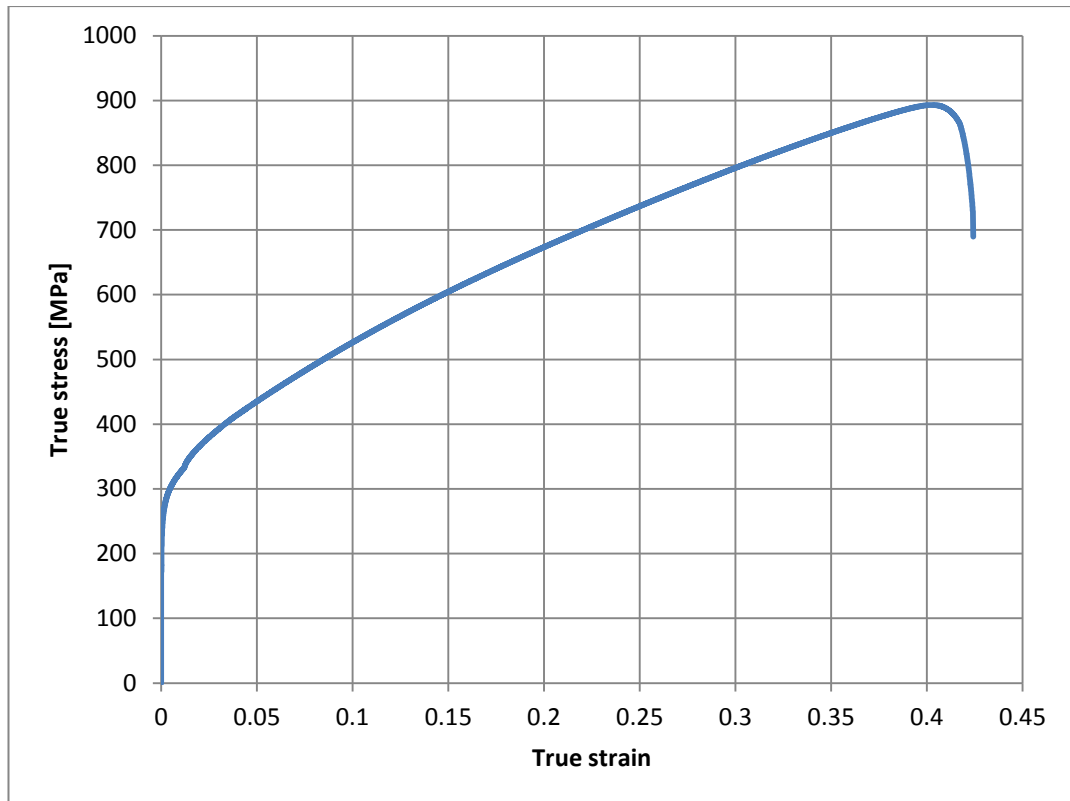
Teräksen B vetokoetuloksista näytekohtaisesti lasketut keskiarvot on annettu taulukossa 4. Taulukon alla on laskettu aineistolle kokonaiskeskiarvo ja hajonta sekä vaihteluväli (min, max).

Tulosten perusteella keskimääräinen myötölujuus vaihteli välillä 258–306MPa, murtolujuus välillä 555–620MPa, murtovenymä välillä 49.1–57.5 %, r-arvo välillä 0.85–1.02, Δr -arvo välillä -0.45--0.16 ja muokkauslujittumiseksponentin n arvo välillä 0.21–0.36. Näytteen B6 arvot on poistettu, koska r-arvojen määrittäminen oli virheellinen.

Taulukko 4. Teräksen B vetokokeiden tulokset

Teräs	n:o	pkS	Rp0.2	Rm	A5	Ag	r	Δr	n _{4-6/Ag}	n _{10-15/Ag}	n _{10-20/Ag}	n _{2-20/Ag}
		mm	Mpa	Mpa	%	%						
B1	1	4.99	306	602	50.8	39.9	0.93	-0.29	0.21	0.34	0.35	0.27
B1	2	5.00	303	599	50.8	40.5	0.92	-0.25	0.21	0.34	0.35	0.27
B1	3	4.98	304	600	49.1	39.5	0.97	-0.32	0.21	0.34	0.35	0.27
B2	1	4.96	304	595	51.3	40.8	1.01	-0.43	0.21	0.34	0.35	0.27
B2	2	4.95	303	597	51.6	41.0	0.94	-0.30	0.21	0.34	0.35	0.27
B2	3	4.96	302	594	51.7	41.1	0.99	-0.43	0.21	0.34	0.35	0.27
B3	1	4.98	293	590	51.0	40.8	0.96	-0.32	0.22	0.34	0.36	0.27
B3	2	4.98	294	592	51.8	40.8	0.96	-0.31	0.22	0.34	0.35	0.27
B3	3	4.97	292	590	51.7	41.1	0.96	-0.33	0.22	0.34	0.35	0.27
B4	1	4.94	293	587	53.2	53.0	0.96	-0.30	0.22	0.34	0.35	0.27
B4	2	4.94	293	587	53.1	52.6	0.96	-0.33	0.22	0.34	0.35	0.27
B4	3	4.94	293	587	52.8	52.8	0.94	-0.28	0.21	0.34	0.35	0.27
B5	1	5.13	283	589	52.1	41.4	0.85	-0.18	0.22	0.35	0.36	0.28
B5	2	5.13	286	589	53.6	41.4	0.85	-0.19	0.22	0.35	0.36	0.28
B5	3	5.14	277	587	52.2	41.1	0.87	-0.23	0.22	0.35	0.36	0.28
B7	1	4.93	267	572	56.7	45.1	0.92	-0.35	0.22	0.34	0.35	0.28
B7	2	4.92	261	571	55.6	45.0	0.93	-0.36	0.22	0.34	0.36	0.28
B7	3	4.91	265	571	57.5	45.3	0.93	-0.38	0.22	0.34	0.36	0.28
B8	1	5.55	296	620	53.2	42.1	0.93	-0.29	0.22	0.35	0.36	0.28
B8	2	5.55	290	605	53.2	41.9	0.91	-0.28	0.22	0.35	0.36	0.28
B8	3	5.55	285	603	53.5	45.1	0.89	-0.23	0.22	0.34	0.35	0.27
B9	1	5.49	279	589	54.7	42.7	0.88	-0.16	0.22	0.34	0.36	0.28
B9	2	5.48	277	588	55.6	42.9	0.90	-0.21	0.22	0.35	0.36	0.28
B9	3	5.49	278	586	54.2	42.9	0.89	-0.20	0.22	0.35	0.36	0.28
B10	1	4.93	275	582	56.8	43.2	1.02	-0.29	0.22	0.35	0.36	0.28
B10	2	4.92	274	582	55.0	43.0	0.96	-0.33	0.23	0.35	0.36	0.28
B10	3	4.92	274	581	55.3	43.1	0.97	-0.26	0.23	0.35	0.36	0.28
B11	1	4.47	286	583	55.5	42.0	1.00	-0.45	0.22	0.34	0.35	0.27
B11	2	4.47	286	583	55.7	42.1	1.02	-0.45	0.22	0.34	0.35	0.27
B11	3	4.47	287	582	54.4	41.8	0.98	-0.35	0.21	0.34	0.35	0.27
B12	1	5.49	295	583	51.8	40.8	0.96	-0.21	0.22	0.34	0.35	0.27
B12	2	5.49	287	583	53.0	40.9	0.95	-0.16	0.22	0.34	0.35	0.27
B12	3	5.49	290	583	51.9	41.3	0.96	-0.18	0.22	0.34	0.35	0.27
B13	1	5.49	286	585	54.3	42.0	0.92	-0.23	0.22	0.34	0.35	0.27
B13	2	5.49	283	584	53.0	41.5	0.91	-0.21	0.22	0.34	0.35	0.27
B13	3	5.49	285	584	52.9	41.4	0.92	-0.24	0.22	0.34	0.35	0.27
B14	1	5.44	280	578	55.7	44.0	0.91	-0.31	0.22	0.34	0.36	0.28
B14	2	5.43	277	578	54.7	43.5	0.93	-0.30	0.22	0.34	0.35	0.28
B14	3	5.44	278	576	55.2	43.8	0.92	-0.30	0.22	0.35	0.36	0.28
B15	1	5.39	279	576	54.2	42.9	0.98	-0.28	0.22	0.34	0.35	0.27
B15	2	5.38	276	575	55.5	43.5	0.96	-0.31	0.22	0.35	0.35	0.28
B15	3	5.38	277	575	55.3	43.4	0.96	-0.32	0.22	0.34	0.35	0.28
B16	1	4.93	258	555	55.7	42.1	0.92	-0.27	0.22	0.35	0.36	0.28
B16	2	4.93	272	576	54.6	41.9	0.97	-0.34	0.22	0.34	0.35	0.28
B16	3	4.93	273	575	54.4	42.0	0.92	-0.29	0.22	0.35	0.35	0.28
B17	1	4.89	275	579	53.1	42.1	0.95	-0.19	0.22	0.35	0.36	0.28
B17	2	4.88	276	581	53.5	42.1	0.92	-0.23	0.22	0.35	0.36	0.28
B17	3	4.88	276	580	53.6	42.1	0.93	-0.27	0.22	0.35	0.36	0.28
B18	1	5.22	276	575	56.6	45.2	0.92	-0.37	0.22	0.34	0.36	0.28
B18	2	5.22	275	575	56.7	45.6	0.94	-0.40	0.22	0.34	0.36	0.28
B18	3	5.22	275	574	56.4	45.4	0.92	-0.35	0.22	0.34	0.36	0.28
	keskiarvo	5.13	283	585	53.8	43.0	0.94	-0.29	0.22	0.34	0.35	0.27
	hajonta	0.30	11	11	1.9	2.9	0.04	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00
	Min	4.47	258	555	49.1	39.5	0.85	-0.45	0.21	0.34	0.35	0.27
	Max	5.55	306	620	57.5	53.0	1.02	-0.16	0.23	0.35	0.36	0.28

Kuvassa 20 on esitetty teräkselle A tyypillinen vetokokeessa syntynyt jännitys-venymäkäyrä. Siitä nähdään selvästi, kuinka myötäämiseen vaadittava jännitys kasvaa voimakkaasti venymän kasvaessa muokkauslujittumisen ansioista.



Kuva 20. Tyypillinen jännitys-venymäkäyrä A-teräkselle.

7.2 Reiänlaajennussuhde

Teräksen B reiänlaajennustestin tulokset on annettu taulukossa 5. Taulukon alla on laskettu aineistolle kokonaiskeskiarvo ja hajonta sekä vaihteluväli (min, max).

Tulosten perusteella reiänlaajennussuhde vaihteli välillä 103.2 - 159.2%. Testin 6 tulos hylättiin, sillä murtumaa ei havaittu.

8 TULOSTEN TARKASTELU

8.1 Tutkimusaineiston tilastollinen luotettavuus

Koetuloksia käsiteltiin Minitab-tilasto-ohjelmistolla. Aineistolle tehtiin Grubb'sin testi, jolla selvitetään, noudattaako tulosjoukko normaalijakaumaa ja onko siinä harha-arvoja (engl. outlier). Tulokset teräksen A osalta on annettu taulukossa 6. Mikäli P-arvo on alle 0.05, niin aineisto ei noudata normaalijakaumaa ja sisältää harha-arvoja. Taulukon perusteella Δr -arvoissa on harha-arvo, joka on ilmoitettu taulukon viimeisellä rivillä ($\Delta r = 0,111289$).

Taulukko 6. Grubbsin testin tulokset teräkselle A.

```
Null hypothesis      All data values come from the same normal population
Alternative hypothesis  Smallest or largest data value is an outlier
Significance level    $\alpha = 0,05$ 
```

Grubbs' Test

Variable	N	Mean	StDev	Min	Max	G	P
pks	30	5,0578	0,4048	4,4667	5,6067	1,46	1,000
Rp0.2	30	276,52	8,72	260,31	287,70	1,86	1,000
Rm	30	608,69	4,76	599,92	618,49	2,06	1,000
A5	30	54,437	1,541	51,655	57,407	1,93	1,000
Ag	30	47,422	1,489	45,394	50,058	1,77	1,000
r	30	0,94772	0,05258	0,89469	1,08380	2,59	0,184
Δr	30	-0,1902	0,0906	-0,2821	0,1113	3,33	0,006

Outlier

Variable	Row	Outlier
Δr	19	0,111289

Tekemällä Grubbsin testi riittävän monta kertaa saadaan aineistosta poistettua kaikki harha-arvot. Näitä oli teräkselle A seuraavia: $\Delta r = 0,11$ rivillä 19, $\Delta r = -0,03$ rivillä 9 ja $\Delta r = 0,07$ rivillä 20.

Teräksen B osalta tulosjoukosta poistettiin seuraavat arvot: $R_m = 620$ riviltä 19, $A_g = 52,98$ riviltä 10, $A_g = 52,8$ riviltä 12, $A_g = 52,6$ riviltä 11.

Lopulliset Grubbsin testin tulokset teräksille A ja B on annettu taulukoissa 6 + 1 ja 6 + 2. Taulukkojen P-arvojen perusteella aineisto noudattaa hyvin normaalijakaumaa.

Taulukko 6 + 1. Grubbsin testin tulokset teräkselle A, kun harha-arvot on poistettu.

Grubbs' Test

Variable	N	Mean	StDev	Min	Max	G	P
pks	30	5,0578	0,4048	4,4667	5,6067	1,46	1,000
Rp0.2	30	276,52	8,72	260,31	287,70	1,86	1,000
Rm	30	608,69	4,76	599,92	618,49	2,06	1,000
A5	30	54,437	1,541	51,655	57,407	1,93	1,000
Ag	30	47,422	1,489	45,394	50,058	1,77	1,000
r	30	0,94772	0,05258	0,89469	1,08380	2,59	0,184
Δr	27	-0,21695	0,03637	-0,28206	-0,15740	1,79	1,000

* NOTE * No outlier at the 5% level of significance

Taulukko 6 + 2. Grubbsin testin tulokset teräkselle B, kun harha-arvot on poistettu.

Grubbs' Test

Variable	N	Mean	StDev	Min	Max	G	P
pks	51	5,1282	0,2968	4,4667	5,5533	2,23	1,000
Rp0.2	51	283,44	11,29	258,45	305,65	2,21	1,000
Rm	50	583,88	9,50	554,87	604,85	3,05	0,068
A5	51	53,828	1,896	49,075	57,465	2,51	0,504
Ag	48	42,402	1,545	39,474	45,636	2,09	1,000
r	51	0,93814	0,03814	0,84558	1,02370	2,43	0,648
Δr	51	-0,2906	0,0733	-0,4528	-0,1623	2,21	1,000

* NOTE * No outlier at the 5% level of significance

Tämän tulosjoukon käsittelyn jälkeen voidaan sille suorittaa tilastollisia tarkasteluja.

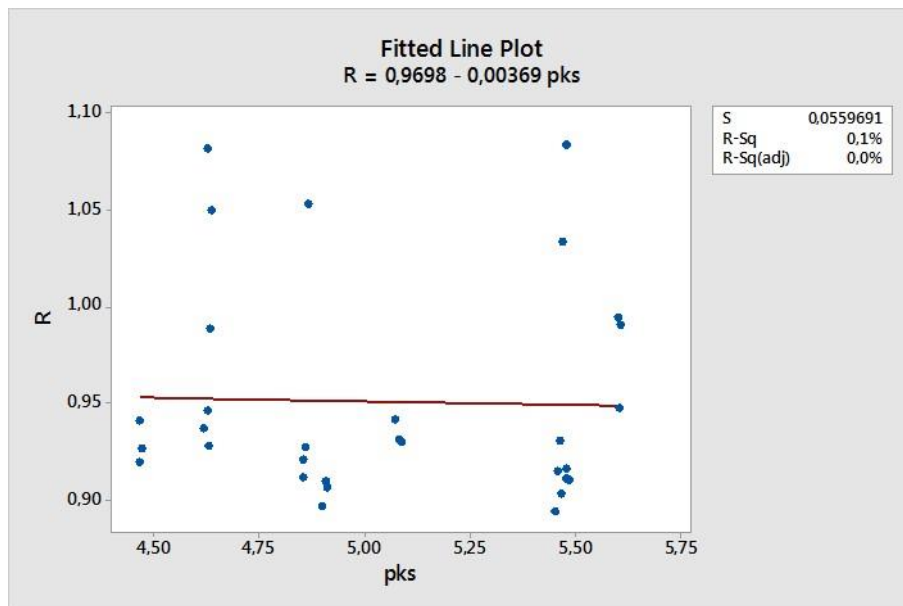
8.2 Mekaaniset ominaisuudet

Tulosten perusteella (ks. taulukot 6 + 1 ja 6 + 2) koeterästen myötö- ja murtolujuudet ovat standardien vaatimissa arvoissa. Molempien koeterästen myötölujuudet ylittävät reilusti niille vaadittavat minimiarvot. Standardin mukaan minimiarvot A ja B -terästen myötölujuudelle ovat 200MPa ja 220MPa ja koetuloksista saadut keskiarvot olivat 277MPa ja 283MPa. Standardin sallimat murtolujuudet A ja B -teräksille ovat 520–700MPa ja 530–680MPa, ja koetuloksien keskiarvot olivat 609MPa ja 584MPa.

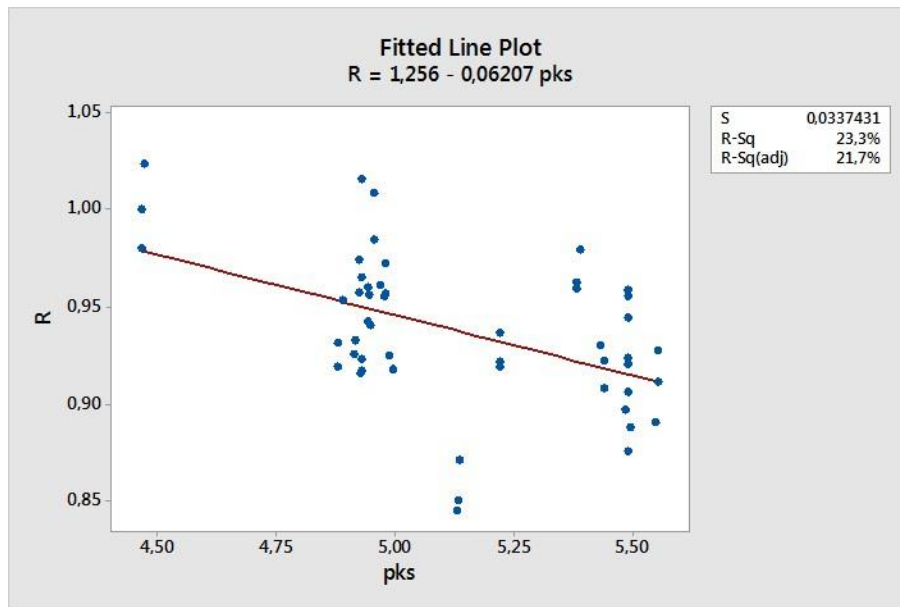
Koetuloksissa keskimääräinen murtovenymä A-teräkselle oli 54.4 % ja B-teräkselle 53.8 %. Tulokset ylittivät standardin vaatimat minimiarvot noin kymmenellä prosenttiyksiköllä.

8.3 Plastinen anisotropia

Kuvissa 21 ja 22 on esitetty terästen r-arvot paksuuden funktiona. Materiaalivahvuudet vaihtelevat enimmillään noin 1 mm verran kummassakin materiaalissa. Kuvista nähdään, että r-arvot pysyvät suunnilleen samoina materiaalin paksuudesta riippumatta. Regressiosuoran korrelaatiokertoimien R^2 perusteella paksuudella ei ole tilastollisesti tarkasteltuna vaikutusta r-arvoon ($R^2 \ll 0,85$).



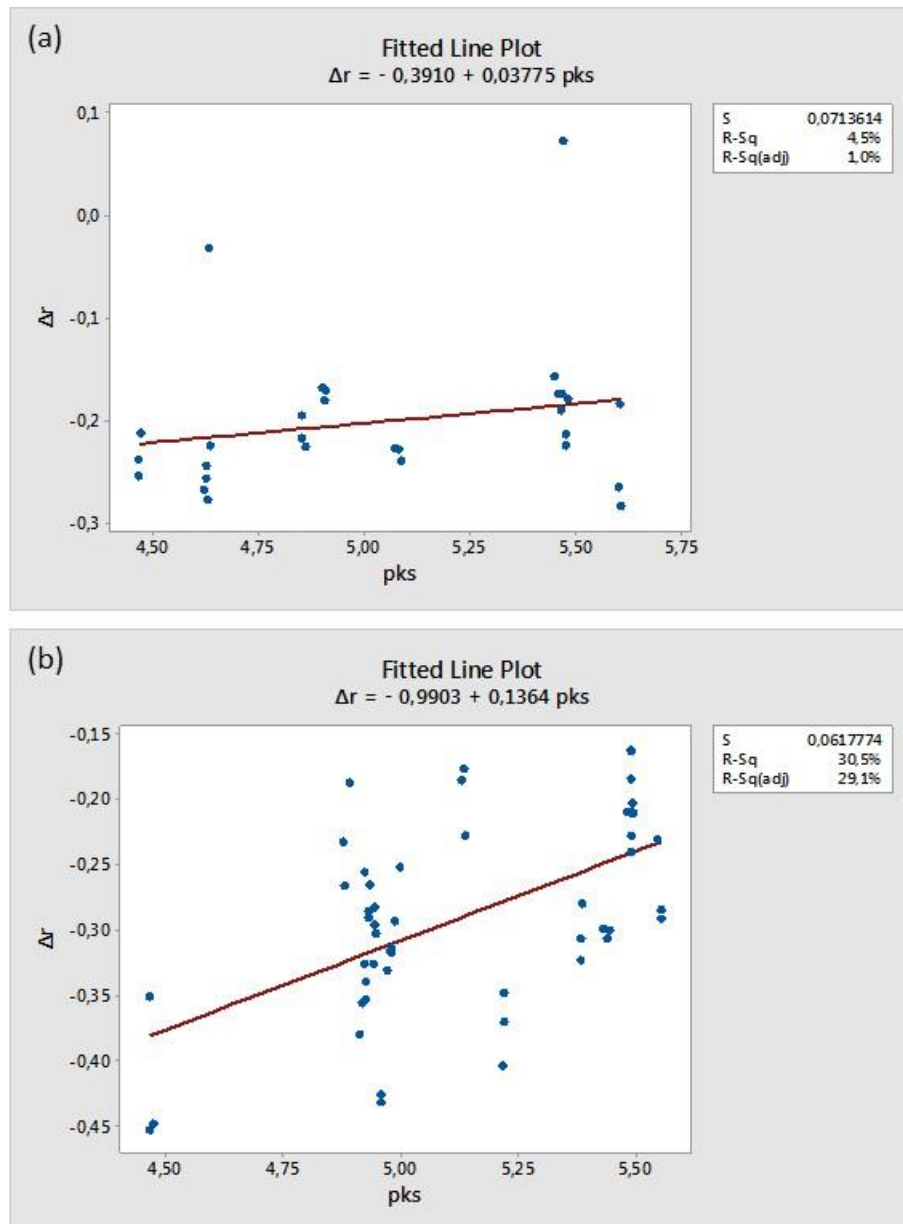
Kuva 21. A-teräksen r-arvojen riippuvuus kuumanauhan paksuudesta.



Kuva 22. B-teräksen r-arvojen riippuvuus kuumanauhan paksuudesta.

Kun tarkastellaan Δr -arvojen riippuvuutta paksuudesta tulos on samankaltainen.

Tämä nähdään alla olevista kuvista 23 a ja b.



Kuva 23. Koeterästen Δr -arvon riippuvuus kuumanauhan paksuudesta, a) teräs A ja b) teräs B.

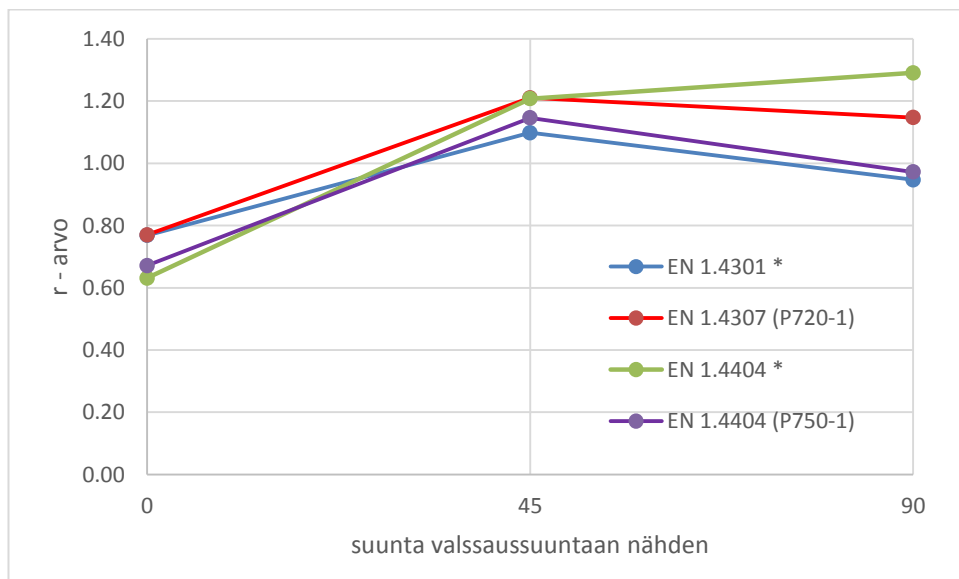
Vetokokeiden tuloksista määritetyt keskimääräiset r -arvot olivat teräkselle A 0.95 ja teräkselle B 0.94 (ks. taulukot 6 + 1 ja 6 + 2). Pkk-hilaisten, eli austeniittisten materiaalien, keskimääräiset r -arvot ovat yleensä pienempiä kuin 1, joten testien tulokset vastaavat tätä väittämää (Kleemola, Korhonen, Ranta-Eskola 1976, 4).

Kuvassa 24 on esitetty kylmävalssattujen EN 1.4301- ja EN 1.4404-terästen terästen r -arvoja verrokkina tässä työssä tutkituille teräksille. Tässä työssä tes-

tatut materiaalit eroavat verrokkimateriaaleista lähinnä vain siinä, että ne sisältävät vähemmän hiiltä. Verrokkimateriaalit on merkitty taulukossa tähdellä. Koeterästen keskimääräiset r-arvot eri suunnissa on esitetty tarkemmin taulukossa 7.

R-arvot ovat kaikilla teräksillä pitkittäisesti valssaussuuntaan (0°) nähden pienimmät ja suurimmat 45° valssaussuuntaan nähden lukuun ottamatta kylmävalssattua ”haponkestävää” 1.4404-terästä, jonka r-arvot ovat suurimmat 90° valssaussuuntaan.

Kaavoja 1 ja 2 käyttäen saatiin kuvan 24 arvojen perusteella laskettua verrokkimateriaalille 1.4301 r-arvoksi 0.98 ja Δr -arvoksi -0.24 ja materiaalille 1.4404 r-arvoksi 1.08 ja Δr -arvoksi -0.25. 1.4404-teräksen r-arvo on muita suurempi, mutta muuten arvot ovat samalla tasolla koeterästen kanssa.



Kuva 24. Terästen r-arvot valssaussuuntaan nähden (Outokumpu Oyj 2014, 7)

Taulukko 7. Koeterästen keskimääräiset r-arvot.

Teräs	0°	45°	90°	r	Δr
A	0.77	1.04	0.94	0.95	-0.22
B	0.64	1.08	0.95	0.94	-0.29

Taulukossa 8 on esitetty tyypillisiä r-arvoja kylmävalssatuille ruostumattomalle teräkselle 1.4307 ja 1.4404. Kyseessä ovat koeterästen kanssa täysin samaa laatua olevia teräksiä, joten tuloksia voidaan verrata suoraan keskenään. 1.4307-teräksellä ja A-teräksellä pitkittäin (0°) ja poikittain (90°) valssaussuuntaan nähden olevat arvot ovat samansuuruisia, mutta 45°:ssa kylmävalssatulla laadulla arvot ovat huomattavasti korkeammat. Tämä johtaa suurempaan r-arvoon kylmävalssatussa teräksessä.

Taulukko 8. R-arvoja kylmävalssatulle ruostumattomalle teräkselle (Manninen 11.5.2015)

Teräs	0°	45°	90°	r	Δr
1.4307	0.8	1.19	0.95	1.03	-0.32
1.4404	0.61	1.13	1.33	1.05	-0.16

Kuvan 24 ja taulukon 8 perusteella kylmävalssatuilla 1.4404-teräksillä r-arvot ovat korkeimmillaan poikittaissuunnassa (90°) valssaussuuntaan. Kuumavalssatulla B-teräksellä asia ei ole kuitenkaan näin vaikka kyseessä on sama laatu.

Kokonaisuudessaan r-arvot ovat jonkin verran korkeampia kylmävalssatuissa laaduissa, mikä tarkoittaa parempia syvävedettävyysominaisuuksia (luku 3.4).

Vertaillessa Δr -arvoja A-teräksen keskimääräinen arvo on lähempänä nollaa, kuin 1.4307-teräksellä. B-teräksen Δr -arvo on taas huomattavasti kylmävalssatua laatua 1.4404 korkeampi. Lähempänä nollaa olevat arvot ovat parempia syvävedon ja korvien muodostumisen kannalta (luvut 3.2 ja 3.4).

8.4 Reiänlaajennuskyky

Reiänlaajennustestin tulokset on esitetty taulukossa 5. Reiänlaajennustestissä murtuman havaittua levyn paksuuden läpi testilaite pysäytettiin manuaalisesti. Testin tuloksena syntynyt murtuma on esitetty kuvassa 25. Tuloksista ilmenee kohtalaisen suuri hajonta, joka johtuu osittain siitä, että murtuman havainnointi suoritettiin silmämääräisesti. Kyseisestä testausmenetelmästä ei ole myöskään

aiempaa kokemusta, joten tuloksissa voi tästäkin johtuen olla jonkin verran hajontaa. Yksi testi jouduttiin hylkäämään, sillä murtumaa ei ehtinyt syntyä koko materiaalin paksuuden läpi ennen testin pysäyttämistä. Muodostuneiden reikien sisähalkaisijat mitattiin kahdesta eri kohdasta, joiden keskiarvoista laskettiin reiänlaajennussuhde kaavaa 3 käyttäen.

Yhdeksän testin keskimääräiseksi reiänlaajennussuhteeksi saatiin 134.49. Kyseiselle materiaalille verrokkituloksia on vaikea löytää, mutta vertailun vuoksi kuumavalssatun Optim 650 MC-teräksen reiänlaajennussuhteeksi on saatu 77.74 (Vierelä 2010, 33) sekä L355- ja L420-terästen reiänlaajennussuhteiksi 73.8 ja 81.2 (Linke 2014, 50).



Kuva 25. Koeaiho reiänlaajennustestin jälkeen.

9 POHDINTA

Kuumavalssattujen terästen muovattavuustutkimus oli aiheena sopiva ja mielenkiintoinen, sillä opintojeni suuntautumisen ansiosta olen suorittanut useita materiaalien muovattavuuteen liittyviä kursseja, joten pohjatietoa löytyi jonkin verran. Myös opinnäytetyössä suoritettuihin testeihin oli tutustuttu aiemmissa opinnoissa.

Yleisesti muovattavuuteen liittyvää teoriaa löytyi helposti kirjallisuudesta ja muista aiheeseen liittyvistä opinnäytetyöstä, mikä auttoi työhön tutustumisessa. Kuitenkaan kuumavalssattujen terästen muovattavuutta ei ole juurikaan tutkittu, joten suoraa teoriaa aiheeseen ei löytynyt, mikä hankaloitti työn tekemistä. Teoriaa löytyi mm. painosorvaukseen liittyen ainoastaan englanninkielisenä, joten onneksi teknistä sanavarastoa oli kursseilla jonkin verran karttunut.

Testien suorittaminen onnistui pääpiirteittäin ongelmitta. Testaaminen keskittyikin pääosassa vetokokeiden tekemiseen, johon kului yllättävän paljon aikaa testikappaleiden runsaudesta johtuen. Vetokokeiden tuloksina saatiin määritettyä materiaalille kaikki tärkeimmät muovattavuusparametrit ja mekaaniset ominaisuudet, joiden perusteella voidaan päätellä, onko materiaalilla halutunlaisia ominaisuuksia. Kylmävalssattujen ruostumattomien terästen muovattavuusparametrejä, erityisesti r - ja Δr -arvoja, löytyi yllättävän niukasti kirjallisuudesta, mikä oli tämän opinnäytetyön kannalta huono asia, sillä tavoitteena oli verrata testattuja teräksiä vastaaviin kylmävalssattuihin laatuihin.

Kaikkiaan työ oli antoisaa siinä mielessä, että pääsi enemmän syventymään kursseilla oppimiin asioihin teräksen metallurgiasta ja etenkin ymmärrys metallien muovattavuudesta kasvoi. Oli myös hyvä, että sai itse suorittaa testit, jotta pääsi näkemään konkreettisesti, miten tulokset syntyvät. Testit ovat standardin mukaisesti suoritettuja, joten ne ovat hyödynnettävissä käytännössä.

LÄHTEET

- Eklund E. 2007. Jätevesimittausten kokonaismittausepävarmuuden määrittäminen. Tampereen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.
- Kauppi, T. 2012. 3K7310 Metallien lujuus ja sen hallinta – metallien lujuus, luentomateriaali luku 1.
- Kauppi, T. 2015. 3K7336 Ruostumattomat teräkset – johdanto ominaisuuksiin, valmistukseen ja metallurgiaan, opintomateriaali luku 10.
- Kauppi, T. Kyröläinen, A. Lukkari, J. Hitsauksen materiaalioppi. Julkaisematon käsikirjoitus.
- Kivivuori, S. 2011. Ohutlevy 1/2011. Viitattu 13.4.2015.
<http://www.e-julkaisu.fi/ohutlevy/2011/01/>.
- Kleemola, H. Korhonen, A. & Ranta-Eskola, A. 1976. Metallisten ohutlevyjen kylmämuovattavuus. Espoo: Otakustantamo.
- Kumar, U. 2013. A study on deep drawing and spinning process in sheet metal forming. Viitattu 18.2.2015.
<http://www.ijaiem.org/Volume2Issue2/IJAIEM-2013-02-27-041.pdf>.
- Juntunen, P. 2010. Tutkimus teräksen en 1.4512 rajamuovattavuudesta. Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.
- Linke, M. 2014. Tutkimus kuumavalssattujen 355 ja 420 MPa lujuusluokan terästen leikatun reunan pinnanlaadusta ja sen vaikutuksesta reiänlaajennuskykyyn. Lapin ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.
- Manninen, T. 2015. Kysymys opinnäytetyöhön.
Email joonas.leskinen@edu.lapinamk.fi. 11.5.2015.
- Outokumpu Oyj. 2014. Duplex Stainless Steel. Viitattu 12.4.2015.
<http://www.outokumpu.com/sitecollectiondocuments/datasheet-duplex-imperial-hpsa-outokumpu-en-americas.pdf>.
- Palmieri. Preciso. Ruzinov. Stark. & Kulik. 1995. Recent experience with the spinning of 1.5 GHz seamless copper monocells. Viitattu 18.2.2015.
<https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/SRF95/papers/srf95f08.pdf>.
- SFS-EN 10088–2:2014. Ruostumattomat teräkset. Osa 2: Yleiseen käyttöön tarkoitetut korroosionkestävät levyt ja nauhat. Tekniset toimitusehdot. Suomen standardisoimisliitto SFS.
- SFS-EN ISO 10275:2007. Metallic materials. Sheet and strip. Determination of tensile strain hardening exponent. Suomen standardisoimisliitto SFS.

Suni, A-P. 2011. Materiaalivalinnan vaikutus tuotteen konstruktion. Savonia ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.

Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys r.y. 2004. Hitsauksen materiaalioppi.

Teknolomiteollisuus. 2014. Kuumavalssaus. Viitattu 10.5.2015.
http://tech.teknolomiteollisuus.fi/file/7435/P_KUUMAVALLSSAUS.pdf.html

The Library of Manufacturing. Metal Rolling. Viitattu 10.5.2015.
http://thelibraryofmanufacturing.com/metal_rolling.html

Total Materia. 2010. True Stress-True Strain Curve:Part Four. Viitattu 10.5.2015.
<http://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=279>

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