

RAEPUHALLUKSEN VAIKUTUS KUUMAVALSSATTUJEN LEVYTUOTTEIDEN SÄRMÄTTÄVYYTEEN

Niko Tulkki

Opinnäytetyö
Kone- ja tuotantotekniikka
Tuotantotekniikka
Insinööri (AMK)

2015

Tekniikka ja liikenne
Kone- ja tuotantotekniikka
Insinööri (AMK)

Tekijä	Niko Tulkki	Vuosi	2015
Ohjaaja	TkL Timo Kauppi		
Toimeksiantaja	Jani Alila SSAB Europe Oy		
Työn nimi	Raepuhalluksen vaikutus särmättävyyteen		
Sivu- ja liitemäärä	56		

Opinnäytetyön aiheena oli tutkia raepuhalluksen vaikutusta särmättävyyteen. Työ oli jatkoa Henri Heikkalan aiemmin tekemälle työlle, jossa Heikkala tutki raepuhalluksen vaikutusta terästen mekaanisiin ominaisuuksiin. Heikkala totesi työsään raepuhalluksen muokkauslujittavan teräksen pintaa. Muokkauslujittuneen pintakerroksen oletettiin huonontavan materiaalien särmättävyyttä ja tämä oli oleellinen asia selvittää SSAB:lle.

Koemateriaaleja oli kolme: S355, Raex 400 ja S700. Materiaaleille tehtiin käytännön särmäyskokeita. Koekappaleet olivat raepuhallettuja, joille oli vertailunäytteinä puhaltamattomat. Jokaista raepuhallettua kohden särmättiin samoilla parametreilla yksi puhaltamaton. Särmätyt näytteet arvosteltiin ja tulokset kirjattiin särmäyspöytäkirjaan. Tuloksille tehtiin tilastollinen tarkastelu, sekä laskettiin keskiarvoja mm. takaisinjouston eroavaisuuksista raepuhalletun ja puhaltamattoman välillä.

Työn tuloksena todettiin, että raepuhallus huonontaa särmättävyyttä S700- sekä Raex 400-materiaaleilla. Raepuhalluksen huonontava vaikutus tuli kuitenkin esiin vasta kun särmättiin SSAB:n lupaamia minimitaivutussäteitä pienemmillä arvoilla. S355-materiaalin särmättävyyteen raepuhalluksella ei ollut vaikutusta. Työn tärkeimpänä tuloksena todettiin, että raepuhallus ei tuota ongelmia mikäli pysytään materiaalin valmistajan suositteluissa arvoissa särmättäessä.

Avainsanat: raepuhallus, särmäys, muokkauslujittuminen, S355, Raex 400, S700

Technology and transport
Mechanical and Production
Engineering

Author	Niko Tulkki	Year	2015
Supervisor(s)	Lic. (Tech) Timo Kauppi		
Commissioned by	Jani Alila SSAB Europe Oy		
Subject of thesis	Effect of shot blasting on bendability of steel		
Number of pages	56		

The subject of this bachelor's thesis was to study the effect of shot blasting on the bendability of steel. This thesis was a continuation of Henri Heikkala's thesis: Effect of Shot-blasting on the Mechanical Properties of Steel. Heikkala found out that shot blasting has strengthening effects on the surface layer of steel. The hardened layer of steel was expected to have worsening effects on bendability, and it was essential for SSAB to find out if this was true.

Three different materials were used in this research: S355, Raex 400 and S700. The materials went through bending tests. The test samples were shot-blasted and for comparison non-shot-blasted. For each of the shot-blasted samples, there was a non-shot-blasted one, which was bent using the same parameters. The samples were reviewed, and the results were recorded. The results were analysed statistically, and values such as the difference of springback between the shot-blasted and the non-shot-blasted samples were calculated.

The final results revealed that shot blasting had worsening effects to the bendability of S700 and Raex 400 materials. Worsening effects of shot blasting came out when the parameter was more critical than what SSAB promised. Shot blasting had no effect to the S355 material. The most important result was that, if the manufacturer's minimum parameters were used, shot blasting had no effect to the bendability.

Key words: shot blasting, bending, hardening, S355, Raex 400, S700

SISÄLLYS

ALKUSANAT	6
1 JOHDANTO	7
1.1 Työn tavoitteet	8
1.2 Työn rajausta	8
2 SSAB	9
2.1 Raahen tehdas	9
2.2 Levyvalssaamo ja EKT-linja	10
3 TERÄSLAJEJA	12
3.1 Rakenneteräs	12
3.2 Kulutusteräs	13
3.3 Ultraluja rakenneteräs	14
4 TAIVUTUS- JA SÄRMÄYSMENETELMÄT	16
4.1 Yleisimmät menetelmät	16
4.2 Särnäittävyys	19
4.3 Työkaluvalinnat	20
4.4 Takaisinjousto	21
4.5 Taivutusvoima	23
5 KOEMATERIAALIT JA MENETELMÄT	25
5.1 Koemateriaalit	25
5.1.1 S355	25
5.1.2 Raex 400	27
5.1.3 S700	30
5.2 Särnäyskokeet	32
5.3 Särnäien arvostelu	35
5.4 Tulosten käsittely	37
6 TULOKSET	39
6.1 S355	39
6.2 Raex 400	39
6.3 S700	39
7 TULOSTEN TARKASTELU	40
7.1 Särnäyskoe	40
7.2 Raepuhalluksen vaikutus särnäittävyteen	42

7.3	Taivutuskokeen ja särmättävyyden välinen yhteys	49
8	JOHTOPÄÄTÖKSET	53
9	POHDINTA	54
10	LÄHTEET	56

ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö tehtiin SSAB:n Raahen terästehtaalle kesän ja syksyn aikana vuonna 2015. Haluan kiittää kehitysinsinööri Jani Alilaa työn valvonnasta. Kiitokset myös ohjaajalle Timo Kaupille jolta sain tukea ja neuvoja prosessin aikana.

Iso kiitos myös kotiväelle joka on jaksanut ymmärtää ja tukea opinnäytetyöprosessin, sekä koko koulun ajan.

Torniossa 30.11.2015

Niko Tulkki

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan raepuhalluksen vaikutusta kuumavalssattujen levytuotteiden särmättävyyteen. Raepuhallus on mekaaninen menetelmä, jolla puhdistetaan valssausprosessissa teräksen pintaan muodostunut oksidikerros eli valssaushilse.

Tämän työn toimeksiantajana toimi SSAB Europe Oy:n Raahen terästehtas, jonka levyvalssaamalla tehdään kuumavalssattuja kvarttolevyjä eri teräslaa-
duista asiakastoimituksiin. Levyjen pinnassa oleva valssaushilse aiheuttaa tiet-
tyjä ongelmia (mm. pölyämistä) terästen ominaisuuksien testauksessa (vetokoe,
taivutuskoe, iskukoe, jne.), jota tehdään tuotannon yhteydessä sijaitsevassa ai-
neenkoetuslaboratoriossa. Ajatuksena on ollutkin puhdistaa terästen pinta raepu-
halluksella ennen testauksen tekemistä.

Työ on jatkoa Henri Heikkalan keväällä 2015 tekemälle opinnäytetyölle, jossa
tutkittiin raepuhalluksen vaikutusta eri teräslaatujen mekaanisiin ominaisuuksiin.
Heikkalan työssä havaittiin raepuhalluksen muokkauslujittavan joidenkin teräste-
räslaatujen pintaa ja tällä oli vaikutusta teräksen mekaanisiin ominaisuuksiin. Vai-
kutuksen oli kuitenkin mekaanisten ominaisuuksien testaukseen käytettävässä veto-
kokeessa esiintyvää mittausvirhettä pienempi.

SSAB:n kuumavalssatut levytuotteet ovat suosittuja konepajateollisuudessa ja
omaavat hyvät kylmämuokkausominaisuudet. Jokaiselle Raahen tehtailta lähte-
välle tuote-erälle tehdään standardissa SFS-EN 7438 määritelty taivutuskoe. Tai-
vutuskokeen tuloksen ja särmättävyyden välinen yhteys ei kuitenkaan ole selvä,
joten raepuhalluksen vaikutusta särmättävyyteen pitää selvittää.

1.1 Työn tavoitteet

Tämän työn tarkoituksena oli tutkia teräksen pinnan puhdistamisen ja näyte-geometrian vaikutuksia sen ominaisuuksiin. Tähän liittyen tavoitteena oli:

1. selvittää onko raepuhalluksella vaikutusta särmättävyyteen.
2. tutkia onko näytelevyydellä vaikutusta särmäyskokeen tuloksiin.

1.2 Työn rajaus

Työ rajataan 248 särmättävään näytteeseen, jotka edustavat teräslaatuja S355, Raex 400 ja S700. Näytteille tehdään silmämääräinen arviointi, ilman optisia apuvälineitä. Tuloksille tehdään tilastollinen tarkastelu.

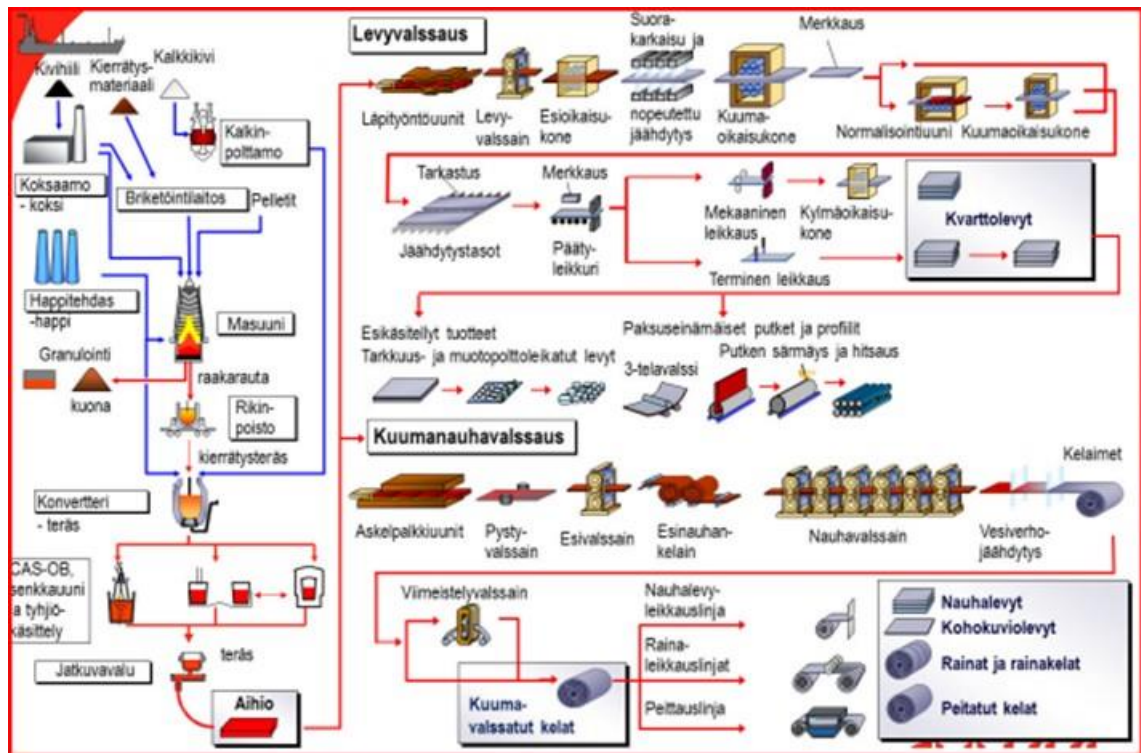
2 SSAB

SSAB on maailmanlaajuisesti toimiva pohjoismainen ja yhdysvaltalainen teräs-yhtiö, jolla on johtava asema pitkälle kehitettyjen lujien terästen ja nuorrutuste-rästen sekä nauha-, levy- ja putkituotteiden tuotannossa, sekä rakentamisen rat-kaisujen tarjoamisessa. Vuosittainen SSAB:n teräksen tuotantokapasiteetti on noin 8,8 miljoonaa tonnia, ja se työllistää maailmanlaajuisesti noin 17 300 työn-tekijää. Teräksentuotantolaitoksia SSAB:llä on Ruotsissa, Suomessa ja Yhdys-valloissa. Rakenteellisesti SSAB koostuu viidestä divisioonasta: SSAB Special Steels, SSAB Europe, SSAB Americas, Tibnor ja Ruukki Construction. SSAB:n pääkonttori sijaitsee Ruotsin Tukholmassa, ja sen osakkeet noteerataan Nasdaq OMX Tukholman pörssissä sekä toissijaisesti Helsingin pörssissä. (SSABa 2015)

Liikevaihdoltaan suurin SSAB:n divisioona on SSAB EUROPE noin 2,8 miljardin euron liikevaihdolla (2014). SSAB EUROPE on johtava pohjoismainen terästuot-taja, jonka tuotteita ovat nauha-, kvarttolevy- ja putkituotteet. Sen suurimmat poh-joismaiset tuotantolaitokset sijaitsevat Ruotsissa Luulajassa ja Borlängessä, sekä Suomessa Raahessa ja Hämeenlinnassa. Syksyllä vuonna 2014 SSAB osti osakevaihdolla Rautaruukki Oyj:n ja ne fuusioituivat nykyiseksi SSAB:ksi. (SSABb 2015)

2.1 Raahen tehdas

Raahen tehdas on työntekijämäärältään SSAB:n suurin tuotantolaitos, joka työl-listää noin 2 800 työntekijää ollen Suomen suurimpia tuotantolaitoksia. Sen toi-mialoja ovat teräksen valmistus, kvarttolevyt ja nauhatuotteet. Näin ollen tehtaalla valmistetaan teräsaihioita, kvarttolevyjä ja kuumavalssattuja keloja. Raahen teh-taalla näiden tuotanto on integroitu masuuniprosessiin. Kuvassa 1 nähdään Raa-hen tehtaan toimintaa havainnollistava prosessikaavio, ja kuvasta voidaan myös tarkastella valmistus- ja jatkojalostusprosessit. (SSABa 2015)

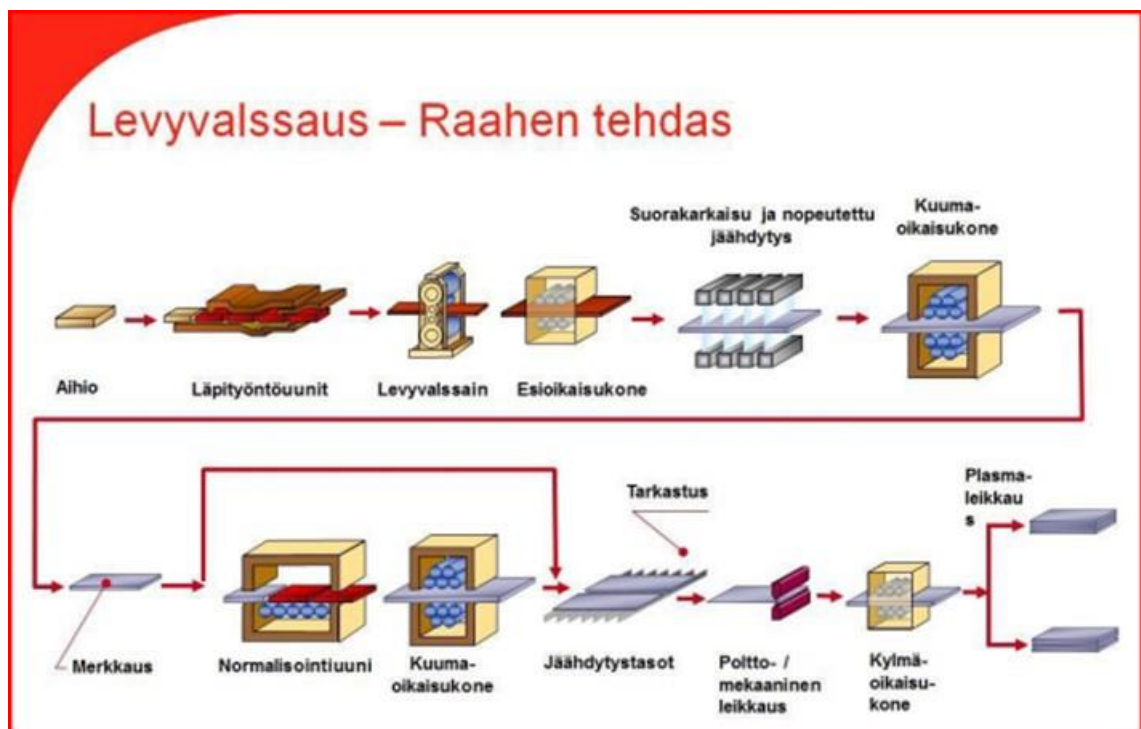


Kuva 1. SSAB EUROPE:n Raahen tehtaan prosessikaavio (Rautaruukki 2014).

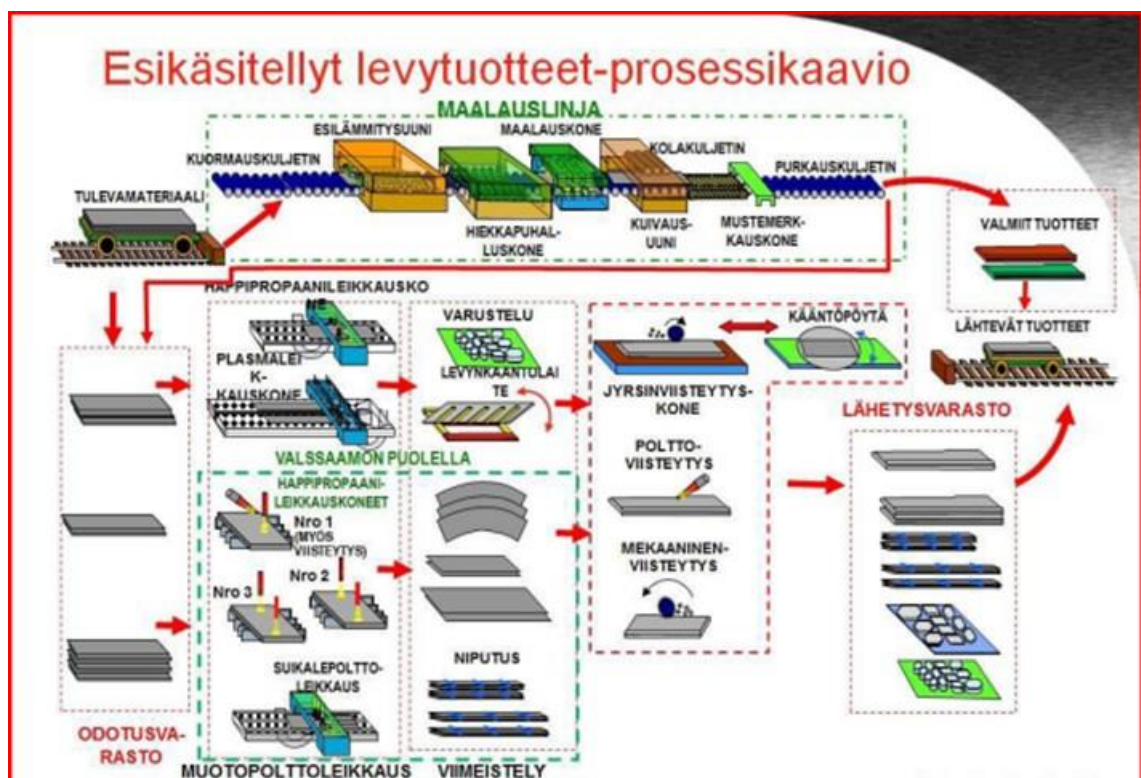
2.2 Levyvalssaamo ja EKT-linja

Raahen tehtaan levytuotannossa teräslevyt valmistetaan sen tuottamista teräsaihioista. Kuvassa 2 on havainnollistettu levyvalssauksen periaate. Valssauksen pääprosessit ovat aihion lämmitys haluttuun valssauslämpötilaan, aihion valssaus levyksi edestakaisin toimivalla nelitelavalssaimella, jäähdytys ja lämpökäsittely, levyjen oikaisu, sekä mekaaninen- tai terminenleikkaus haluttuun levykoon. Tuotettujen levyjen mekaaniset ominaisuudet riippuvat pääasiassa teräksen kemiallisesta koostumuksesta, ja levyvalssauksessa tapahtuvasta käsitte-lystä. (Rautaruukki 2014)

EKT (esikäsittelyt levytuotteet) jatkojalostaa valssattuja kvarttolevyjä asiakkaiden tarpeiden mukaisesti. Sen tarjoamiin palveluihin kuuluvat pinnan puhdistus raepuhalluksella ja suojamaalaus, muoto- ja tarkkuusleikkaus, taivutus, viisteytys sekä suikalointi. EKT:llä voidaan tehdä tuotettujen levyjen myyntiarvon parantamiseksi myös koneistusta, hitsausta, karkaisua ja särmäystä (ks. kuva 3). (Rautaruukki 2014)



Kuva 2. Levyvalssaamon prosessikaavio (Rautaruukki 2014).



Kuva 3. EKT:n prosessikaavio (Rautaruukki 2014).

3 TERÄSLAJEJA

Seuraavissa osioissa käsitellään tutkittuja teräslajeja, sekä esitellään materiaalien käyttökohteita yleisellä tasolla.

3.1 Rakenneteräs

Rakenneteräs on seostamaton tai niukkaseosteinen, hiilipitoisuuden ollessa 0.2..0.8 % . Sitä valmistetaan yleensä massatuotantona. Tavanomaisen rakenneteräksen myötölujuus on 235- 355 N/mm² eikä ylitä 500 N/mm²:ä, tätä lujempia teräksiä sanotaan ultralujiksi rakenneteräksiksi. Rakenneteräkset soveltuvat yleisesti konepajakäsittelyyn hyvin ja niiden muovaaminen, leikkaaminen sekä hitsaaminen ovat suhteellisen helppoa. Rakenneteräksiä toimitetaan levytuotteina, erilaisina palkkiprofiileina sekä putkituotteina. Rakenneterästen yleisiä käyttökohteita ovat koneiden osat, rakennusten sekä ajoneuvojen rungot, sekä laivat.

Esimerkiksi rakenneteräksen merkinnässä S355JR, S tarkoittaa rakenneterästä (Structural steel). 355 kertoo minimi myötölujuuden N/mm². Numeroiden jälkeiset kirjaimet kertovat iskutheyden, sekä lämpötilan iskukokeessa. Vuoteen 1993 asti numero-osa kertoi materiaalin minimi murtolujuuden, mutta standardin muutosten mukaan tämä muuttui. Standardin SFS-EN 10027-1 mukainen merkintä esitettynä nähdään kuvassa 4. Kuumavalssattujen rakenneterästen tekniset toimitusehdot on määritelty eurooppalaisessa standardissa SFS-EN 10025-2:2004.

Päätunnukset		Teräksen lisätunnukset		Terästuotteen lisätunnukset			
G	S	n	n	n	an +an + an		
Päätunnukset		Lisätunnukset					
Kirjain	Mekaaniset ominaisuudet	Teräkselle			Terästuotteelle		
		Ryhmä 1 ^b		Ryhmä 2 ^{c,d}			
G = teräsvalu (tarvittaessa) S = rakenne-teräs	nnn = vähimmäismyötölujuus ^e MPa ^f ohuimman paksuusalueen mukaan	Iskusitkeys		C = Erikoiskylmämuokkaus D = Kuumaupotuspinnoitus E = Emalointi F = Tae H = Putkipalkki L = Matala käyttölämpötila M = Termomekaanisesti valssattu N = Normalisoitu tai normalisointivalssattu P = Paalutuslevy Q = Nuorrutettu S = Laivanrakennus T = Putki W = Säännestävä an = Spesifioitun lisäseosaineen kemiallinen merkki, esim. Cu, tarvittaessa yhdessä numeron kanssa, joka on 10 x alkuaineen vaatimusalueen keskipitoisuus (pyöristettynä 0,1 %-iin)	Taulukot 16, 17 ja 18		
		Iskuenergia jouleina (J)					
		27J	40J			60J	°C
		JR	KR			LR	20
		J0	K0			L0	0
		J2	K2			L2	-20
		J3	K3			L3	-30
		J4	K4			L4	-40
		J5	K5			L5	-50
		J6	K6			L6	-60
		A = Erkautuskarkaistu M = Termomekaanisesti valssattu N = Normalisoitu tai normalisointivalssattu Q = Nuorrutettu G = Muut ominaisuudet lisättyinä tarvittaessa 1 tai 2 numerolla					

^a n = numerotunnus, a = kirjaintunnus, an = kirjain- ja numerotunnus.
^b Tunnukset A, M, N ja Q ryhmässä 1 koskevat hienoraeteräksiä.
^c Ryhmän 2, muihin kuin kemiallisiin tunnuksiin, voidaan liittää yksi tai kaksi merkkiä erottelemaan tuotestandardin mukaiset eri laatuluokat.
^d Mikäli tässä ryhmässä tarvitaan kahta tunnusta, viimeisen on oltava kemiallinen merkki.
^e Termi "myötölujuus" viittaa ylempään (R_{eH}) tai alempaan myötörajaan (R_{eL}) tai venymisrajaan (R_p), tai kokonaisvenymään perustuvaan venymisrajaan (R_f) riippuen tuotestandardissa esitetystä vaatimuksista.
^f 1 MPa = 1 N/mm².

Kuva 4. Materiaalimerkintöjen selitykset (SFS-EN 10027-1).

3.2 Kulutusteräs

Kulutusteräs on nimensä mukaan hyvin kulutusta kestävä, matalaseosteista, karkaistua hiiliterästä. Kulutusteräksille ominaiset kovuus ja lujuus saadaan aikaan hehkuttamalla terästä austeniittialueella, jonka jälkeen teräs sammutetaan joko öljyyn tai veteen. Karkaisussa saadaan teräkseen luja martensiittinen mikrorakenne. Kulutusterästen nimissä oleva numerosarja (esimerkiksi Raex 450) tarkoittaa pinnan kovuutta Brinellin-asteikolla mitattuna. Kulutusterästen lujuudet ovat erittäin korkeat myötölujuuksien ollessa 1000–1250 MPa, kun tavallisella rakenne-teräksellä ne ovat noin 250–450 MPa:n luokkaa. Kovuudet kulutusteräksillä ovat noin 300–550 HBW:N luokkaa.

Kulutusteräket ovat ominaisuuksistaan johtuen rakenneteräksiä hankalampia muokattavia ja lastuttavia. Kulutusterästen hitsattavuus on suhteellisen hyvä, mutta valmistajan suositukset tulee ottaa huomioon niin kylmämuokkauksessa, lastuttaessa, kuin hitsatessakin. Tyypillisiä käyttökohteita kulutusteräksille ovat teollisuuden siilot, suppilot, säiliöt, kauhat, huulilevyt, kaivosteollisuuden kohteet tai melkein mikä kohde tahansa, jossa tarvitaan kulutuksenkestävyyttä tai halutaan pienentää aineenvahvuuksia käyttämällä lujempaa materiaalia. Kulutusteräket eivät ole standardoituja.

3.3 Ultraluja rakenneteräs

Kun rakenneteräksen myötölujuus ylittää 500 MPa, puhutaan yleisesti ultralujasta teräksestä. Ultralujat teräket ovat myös kohtuullisen kulumista kestäviä. Materiaali omaa hyvät kylmämuokkaus ominaisuudet ja on helppo työstettävä konepajaympäristössä. Materiaalia käytetään erityisesti sovelluksissa, joissa on tärkeää saavuttaa suuri lujuus lisäämättä aineenvahvuuksia, tällä siis saadaan tuotteista huomattavasti keveämpiä. Tavanomaisia käyttökohteita ovat nostolaitteet, nostoapuvälineet, ajoneuvojen rungot, koneen osat ja teräsrakenteet. Kuvassa 5 nähdään käyttösovelluksia ruukin [www-sivuilta](http://www.sivuilta.fi). Standardi SFS-EN 10025-6:2009 määrittää kuumavalssattujen nuorrutettujen ja lujien rakenneteräslevytuotteiden tekniset toimitusehdot.



Kuva 5. Tavanomaisia sovelluksia (Ruukki 2015).

4 TAIVUTUS- JA SÄRMÄYSMENETELMÄT

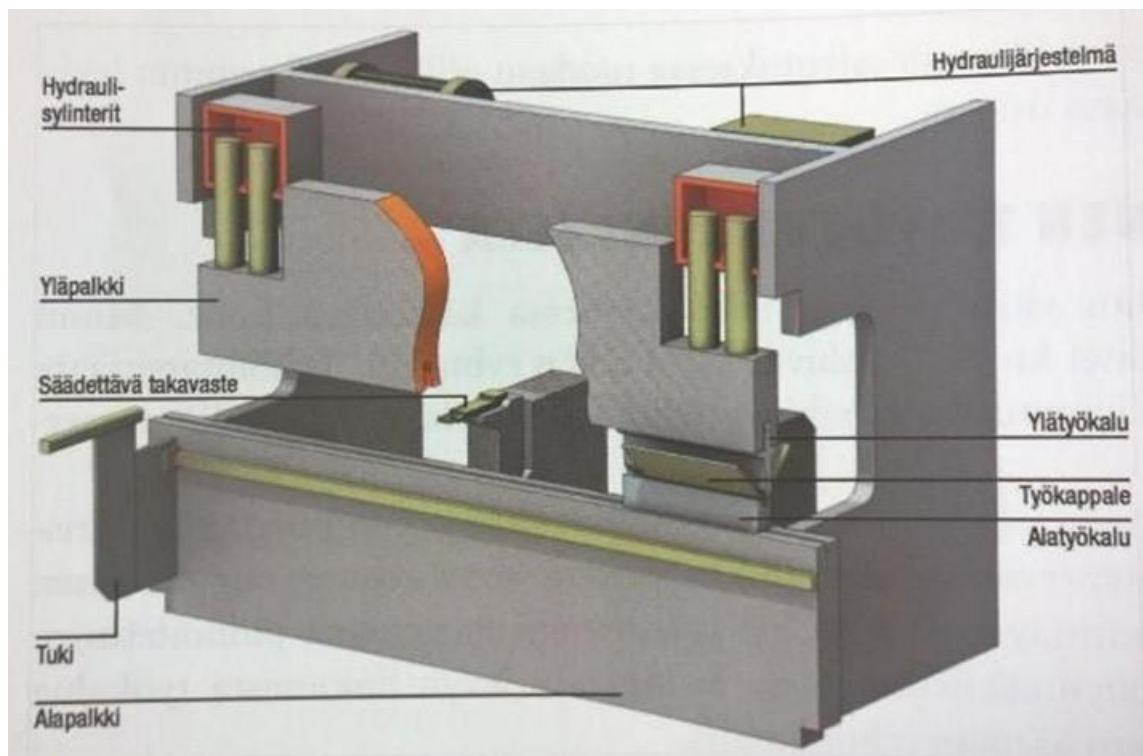
Levyateriaali vaatii tuotteiden valmistuksessa usein muokkaamista kohteen vaatimusten mukaisesti. Muokkauksen yhteydessä levyn muoto muuttuu, mutta paksuus pysyy likimain vakiona. Suuremmat muutokset tapahtuvat lähinnä raaka-aineen mittamuutoksina leveyssuunnassa, poikittain särmään nähden. Pyrittäessä pysyvään muodonmuutokseen on raaka-aineen myötöraja ylitettävä, jolloin materiaali ei palaudu takaisin entiseen tilaan vaan jää haluttuun muotoon. (Lepola & Makkonen 2008).

Onnistuneessa särmäyksessä täytyy hallita taivutusvoima, takaisinjousto, sekä aihion mittamuutokset. Lisäksi taivutuskohdan tulee kestää murtumatta taivutus-tapahtuman jälkeen. Taivutusvoimaa voidaan hallita suunnitteluvaiheessa valitsemalla särmälle sopiva pituus ja materiaalille sopiva paksuus sekä vetomurtolujuus. Lisäksi oikeanlaiseen taivutusvoimaan vaikuttavat käytetyt työkalut sekä taivutuskulma. Työkalujen valintaan ja taivutuskulmaan voidaan vaikuttaa suunnitteluvaiheessa huomioimalla v-aukon leveys. (Matilainen, Parviainen, Havas, Hiihtelä & Hultin 2011).

4.1 Yleisimmät menetelmät

Särmäminen suoritetaan särmäyspuristimeksi kutsutulla koneella. Särmäyspuristimia on saatavilla hyvin erikokoisia ja – tehoisia eri käyttötarkoituksiin. Puristimen työleveydet voivat vaihdella 1 ja 10 metrin välillä, mutta ne ovat yleisimmin 2- 4 metriä. Leveys ilmoitetaan useimmiten työkalupalkin mukaan ja nimellisleveys on muutamia kymmeniä millimetrejä yli tasaluvun, kuten 2040 mm. Nimellisleveydestä pystytään suoraan päättelemään pisimmän mahdollisen taivutuksen pituus. Tarvittaessa koneita voidaan liittää sarjaan, jolloin voidaan särmätä myös pitempiä kappaleita kuin yhdellä koneella olisi mahdollista. Särmäyspuristimen puristusvoimat voivat vaihdella 100-25 000 kN (kiloNewton). Vaadittava puristusvoima riippuu särmättävän levyn materiaalista ja paksuudesta. (Matilainen ym. 2011).

Särmäyspuristin on yksi yleisimmistä ohutlevyteollisuuden koneista ja sen toiminta voi olla toteutettu mekaanisesti, hydraulisesti tai pneumaattisesti. Suuritehoisten koneiden voimatuotto on toteutettu hydraulisesti. Pneumaattisesti toimivat koneet ovat hyvin harvinaisia. Hydraulisessa särmäyspuristimessa hydraulisylinterit sijaitsevat yleensä yläpalkin päissä, jolloin yläpalkin työiskun syvyyttä on mahdollista säätää ja voima jakautuu suhteellisen tasaisesti koko palkin pituudelle. Tarkkaliikkeisten särmäyspuristimien toiminta on toteutettu servomootoreiden avulla. Särmäyspuristimen periaatekuva on esitetty kuvassa 6. (Matilainen ym. 2011).

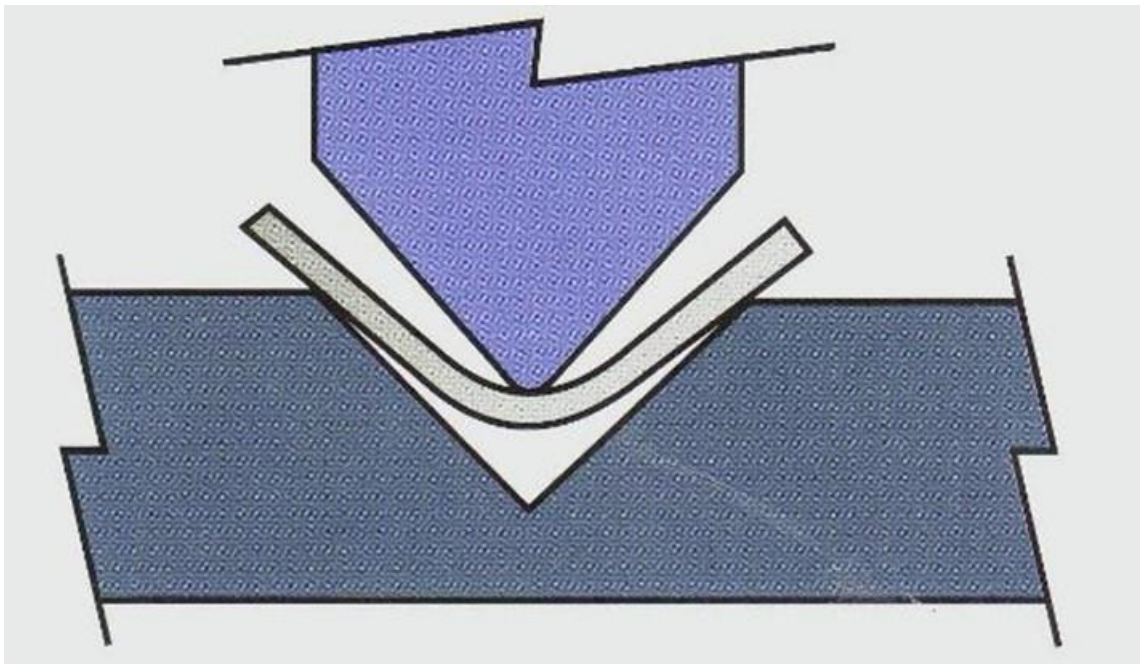


Kuva 6. Periaatekuva särmäyspuristimesta. (Matilainen ym. 2011, 240).

Vapaataivutuksessa levyä taivutetaan kolmipistetaivutuksena alatyökalun v-aukon kulmien ja ylätyökalun suhteen, mutta työkalun isku lopetetaan ennen kuin levy osuu alatyökalun pohjaan. Tavoiteltavaa kulmaa voidaan muuttaa säätämällä ylätyökalun iskun pituutta ja tämän vuoksi vapaataivutuksessa käytetään yleensä työkaluja, joiden kulmat ovat alle 90°. Menetelmän etuna on se, että työkalun muoto ei vaikuta levyyn syntyvään muotoon, vaan levyn geometria riippuu työkalujen keskinäisestä etäisyydestä, materiaalin lujuusominaisuuksista ja levyn

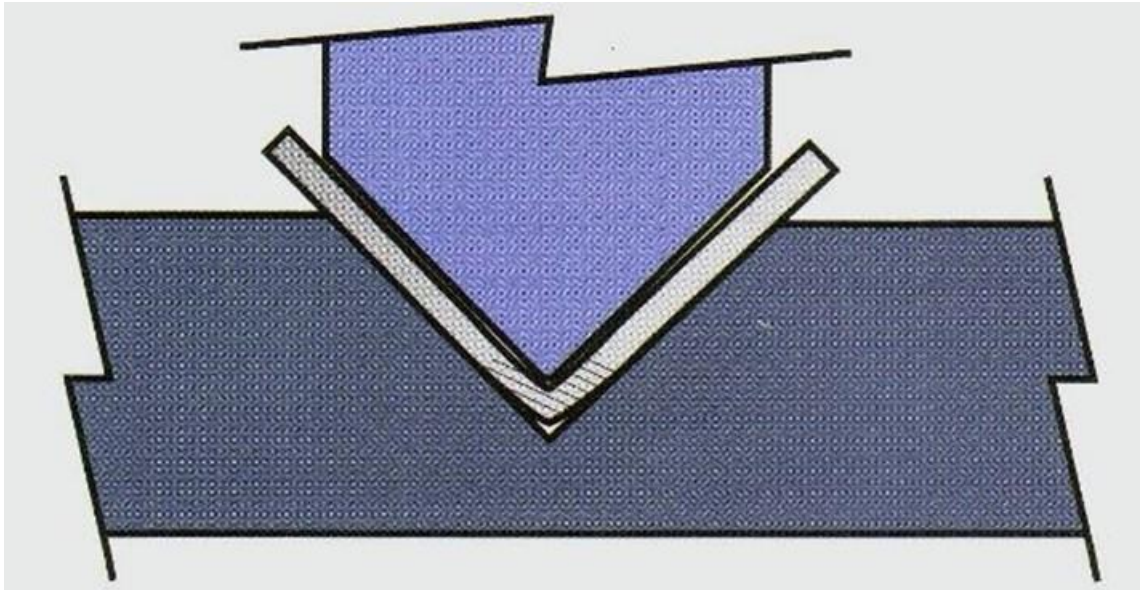
paksuudesta. Yleisimmin käytettävien työkalujen muodot ovat yksinkertaisia ja prosessi helppo automatisoida. (Matilainen ym. 2011).

Vapaataivutus on yleisin levyn taivutusmenetelmä konepajateollisuudessa. Vapaataivutusta sanotaan ”kansankielellä” yleisesti särmäämisenä. Kuvassa 7 nähdään vapaataivutuksen periaatekuva.



Kuva 7. Periaatekuva vapaataivutuksesta. (Matilainen ym. 2011, 241).

Pohjaaniskutaivutuksessa iskun pituus on säädetty niin, että ylätyökalu painuu kokonaan alatyökäluä vasten ja välissä oleva levy muotoutuu tarkasti ala- ja ylätyökalun muotojen mukaan. Pohjaaniskutaivutus vaatii jopa 3-5 kertaa enemmän puristusvoimaa kuin vapaataivutus, mutta tällä menetelmällä voidaan levyyn saada aikaiseksi pysyvä muodonmuutos, joka onnistuessaan saattaa eliminoida takaisinjouston lähes kokonaan. Pohjaaniskutaivutuksella pyritään hyvin tarkkaan ja jäykkään muotoon. Koska pohjaaniskutaivutuksessa tarvitaan suuria voimia ja työkalujen mittatarkkuudella on suuri merkitys, pohjaaniskutaivutusta suositellaan käytettäväksi vain alle 2 mm:n levypaksuuksille. (Matilainen ym. 2011). Kuvassa 8 nähdään pohjaaniskutaivutuksen periaate. Pohjaaniskutaivutus on konepajateollisuudessa hieman harvinaisempi taivutusmenetelmä. Yleisemmin pohjaaniskutaivutusta käytetään suurten sarjojen ohutlevytuotannossa.



Kuva 8. Periaatekuva pohjaaniskutaivutuksesta (Matilainen ym. 2011, 241).

4.2 Särmättävyys

Levyn taivutettavuutta nimitetään särmättävyydeksi, joka ei ole määriteltävissä esimerkiksi lujuuden tapaan yksikäsitteisesti. Särmäyksessä, joka ei muovattavuuden suhteen ole läheskään yhtä vaativa menetelmä kuin syvävetäminen, vaikuttavat materiaaliominaisuudet ja paksuus lähinnä takaisinjouston suuruuteen ja siihen, miten pieneen säteeseen levy on mahdollista taivuttaa eli minimitaivutussäteeseen. (Aaltonen, Andersson & Kauppinen, 1997).

Särmättävyyteen vaikuttavat mm. mikrorakenteesta ja koostumuksesta riippuva perusmateriaalin muodonmuutoskyky, levyn pinnanmateriaali, levyn valssaus-suunta, taivutusmenetelmä ja työkalujen kunto. Taipuneen levyn venynyt ulkopinta on erityisen herkkä vaurioille, jotka saavat helposti alkunsa pinnan erilaisista vioista ja muista epätasaisuuksista. Materiaalin pintavikojen ohella tällaisia ovat kovettunut leikkausreuna, leikkausjäyste ja myös raepuhallus, joka saattaa heikentää levyn särmättävyyttä puhaltamattomaan levyyn verrattuna. Kriittisissä tapauksissa raepuhallusta suositellaan vasta särmäyksen jälkeen. (Aaltonen ym. 1997). Materiaalien kylmämuovattavuus ilmoitetaan C-kirjaimella standardin SFS-EN 10149-1 teknisten toimitusehtojen mukaisesti.

4.3 Työkaluvalinnat

Työkaluvalintoihin vaikuttavia asioita ovat materiaalin mekaaniset ominaisuudet, särmän muoto ja pituus, sekä särmäyspuristimen mitat ja särmäysvoima. Ohutlevytuotteet särmätään yleisesti kiinnittämättä taivutussäteisiin huomiota, mutta kun materiaali on paksumpaa ja/tai lujempaa on työkaluvalinnoilla suuri merkitys särmäyksen onnistumiseen.

Ylätyökalun valinnassa tulee ottaa huomioon materiaalin valmistajan lupaamat minimitaivutussäteet. Alatyökalun v-aukon valintaan on olemassa erilaisia ”nyrkisääntöjä” kuten alla olevassa kuvassa 9 on esitetty.

V-aukon leveys	Rajoitukset
$8 \times s_0$	Aineenpaksuus $s_0 < 12 \text{ mm}$ Murtolujuus $R_m < 400 \text{ MPa}$
$10 \times s_0$	Aineenpaksuus $s_0 > 12 \text{ mm}$
$10\text{--}12 \times s_0$	Murtolujuus $R_m > 400 \text{ MPa}$

Kuva 9. V-aukon valinta (Matilainen ym. 2011, 243).

Nämä säännöt eivät kuitenkaan päde erikoisteräksille, koska niiden minimitaivutussäde voi olla moninkertainen tavalliseen rakenneteräkseen verrattuna. Erikoisterästen särmäyksessä painimen säteen määrittämisen jälkeen voidaan alatyökalun v-aukon leveys määrittää esimerkiksi kaavalla:

$$V > D + 2 \times T \quad (1)$$

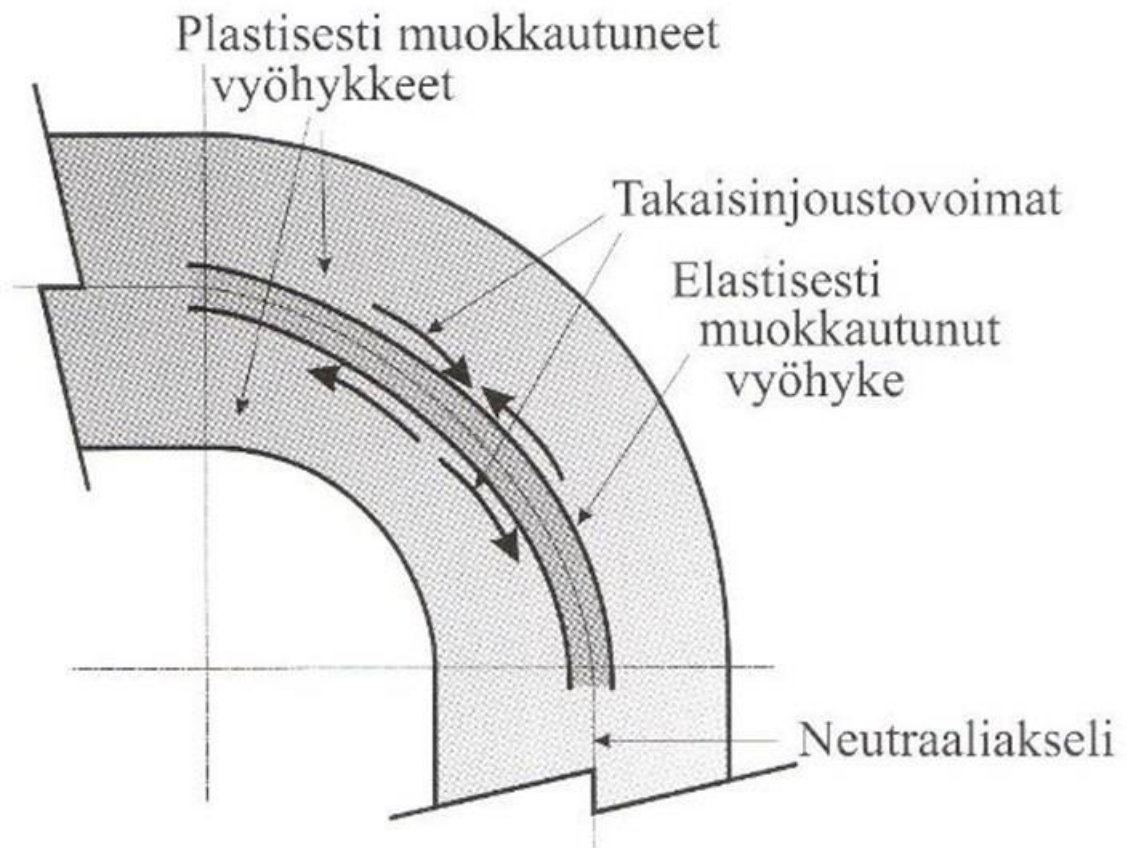
Missä:

V	on	V-aukon leveys
D	on	ylätyökalun painimen halkaisija
T	on	aineenvahvuus

Mitä lähemmäksi yhtä $D + 2 \times T / V$ menee, sitä suuremmaksi voiman tarve kasvaa ja tämä on myös huomioitava työkalu valinnoissa.

4.4 Takaisinjousto

Takaisinjousto on ilmiö, joka on jossain määrin läsnä kaikissa levynmuovautöissä, eli muovauksessa ja taivutuksessa. Plastisesti muovautuneiden puristus- ja vetojännitysvyöhykkeiden väliin levyn keskelle muodostuu kapea vyöhyke, jossa tapahtuu vain elastista muodonmuutosta ja tämä vyöhyke aiheuttaa sen, että sisäistä voimatasapainoa ei saavuteta ulkoisten voimien poistuessa. Tästä syntyneet sisäiset jännitykset pyrkivät palauttamaan kappaleen alkuperäiseen muotoonsa, mikä ilmenee taivutuksessa takaisinjoustona. Plastisesti muovautuneet vyöhykkeet levyn pintaosissa pyrkivät estämään takaisinjoustoa, mutta ilmiö tapahtuu aina riippumatta kappaleen geometriasta. Kuvassa 10 on esitetty takaisinjouston synty ja kappaleeseen syntyvät erilaiset vyöhykkeet. (Matilainen ym. 2011).



Kuva 10. Särmän vyöhykkeet (Matilainen ym. 2011, 246).

Takaisinjousto on vaikuttavat niin taivutettava levy kuin taivutuslaitteistokin. Yksittäisten tekijöiden vaikutuksen suuruutta takaisinjoustoilmiössä on vaikea arvioida, sillä ilmiö on hyvin monitahoinen. (Matilainen ym. 2008). Takaisinjousto on vaikuttavia tekijöitä ovat taivutettavan materiaalin mekaaniset ominaisuudet, taivutettavan levyn paksuus, työkaluvalinnat sekä käytössä oleva taivutuskoneisto.

Takaisinjouston arvioiminen etukäteen ja sen täydellinen hallitseminen on hankalaa. Lujilla materiaaleilla takaisinjousto on voimakkaampaa kuin normaalilujuisilla materiaaleilla. Koska takaisinjouston arviointi on laskennallisesti hankalaa, hallitaan takaisinjousto yleensä koetaivutusten avulla. Koetaivutuksissa kappale taivutetaan ensin vaadittuun kulmaan. Tämän jälkeen suoritetaan mittaus, josta selvää, kuinka paljon vaadittua pienempi kulma on. Kun takaisin jouston suuruus tiedetään, voidaan kappaleella suorittaa ns. ylitaivutus, eli kappaletta taivutetaan takaisinjouston verran yli tavoitellun kulman. (Matilainen ym. 2011). Taivutustyötä tekevät ihmiset osaavat yleensä arvioida takaisinjouston suuruuden materiaalin sekä aineenpaksuuksien mukaan. Konepajateollisuudessa harvemmin edes pyritään täydelliseen kulmaan, vaan $\pm 2-5^\circ$ kulmat ovat monessakin tapauksessa riittäviä. Täten takaisinjouston täydellinen hallinta ei ole tarpeellista.

Kuvassa 11 nähdään takaisinjousto ja taivutukseen liittyviä suureita.

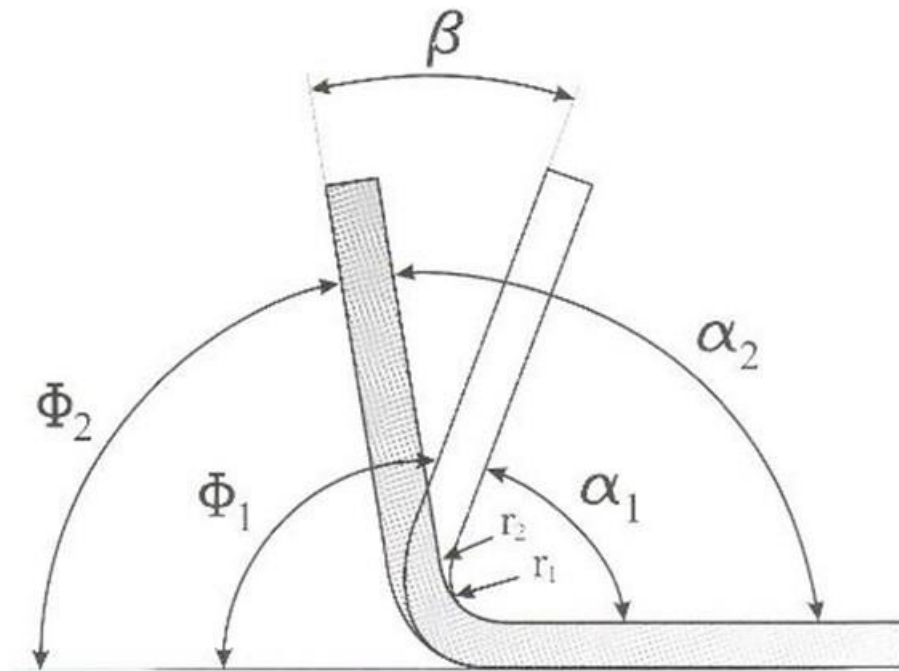
α_1 = Taivutuskulma taivutuksessa

α_2 = taivutuskulma taivutuksen jälkeen

β = takaisinjoustokulma

Φ_1 = kaarikulma taivutuksessa

Φ_2 = kaarikulma taivutuksen jälkeen.



Kuva 11. Takaisinjousto- ja taivutukseen liittyviä suureita (Matilainen ym. 2011, 247).

4.5 Taivutusvoima

Levyn taipuminen tapahtuu vaiheittain. Taipumisen edistymisestä ja levyn taipumaviivasta ym. taivutukseen liittyvistä seikoista esitetään alan kirjallisuudessa matemaattisia malleja. Taivutusvoiman tarve vaihtelee taivutuksen edetessä siten, että voima ensin kasvaa tasaisesti ja vähenee sen jälkeen. Vapaataivutuksessa suurimman taivutusvoiman tarkkaan laskemiseen ovat tutkijat kehittäneet yhtälöitä, joista käsikirjoissa yleisesti annettu yksinkertaistettu kaava on:

$$F = C \cdot R_m \cdot b \cdot s^2 / w \quad \text{tai sama muodossa} \quad (2)$$

$$F = C \cdot R_m \cdot b \cdot s \cdot (s/w) \quad (3)$$

F	on	tarvittava voima
C	on	vakio, jonka esimerkiksi SSAB antaa ultralujille rakenneteräksilleen 1.6–1.8 ja normaali rakenneteräksilleen 1.2-1.5
R _m	on	levyn murtolujuus N/mm ² (MPa)

b	on	taivutusleveys
s	on	aineenpaksuus
w	on	alatyökalun v-aukon leveys

(Aaltonen ym. 1997).

Taivutusvoiman tarkkaa suuruutta ei käytännössä tarvitse tuntea. Riittää kun osaa arvioida sen suuruusluokan, mihin esimerkki vakiolla $C=1.5$ laskenta tai yleisesti saatavilla olevista taulukoista arvioitu tarkkuus on riittävä. Taivutusvoima annetaan taulukoissa usein metrin taivutusleveyttä kohti, joka on siis vielä kerrottava kulloisellakin taivutusleveydellä. (Aaltonen ym. 1997).

5 KOEMATERIAALIT JA MENETELMÄT

5.1 Koemateriaalit

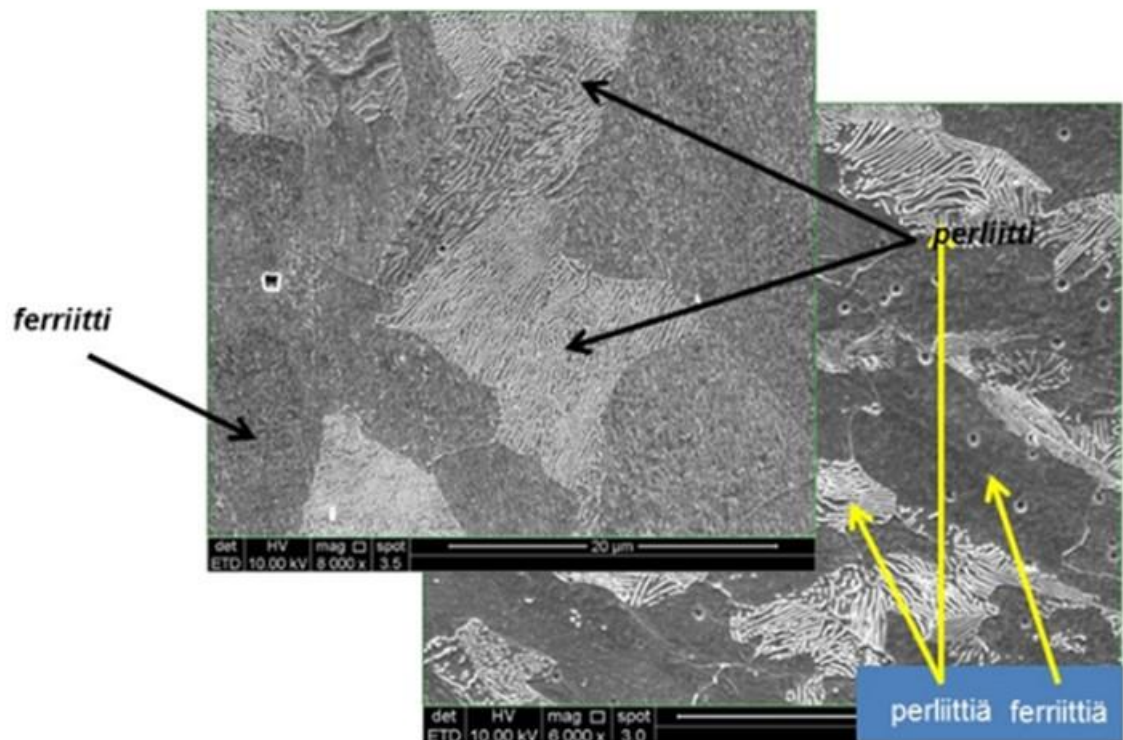
Särmäyskokeissa testattiin kolmea eri teräslaatuja: S355, Raex 400 sekä S700. Näytteitä oli pinnanlaadultaan kahdenlaisia: raepuhallettu ja verrokkina puhaltamaton. Kuvassa 12 nähdään esimerkki näytteistä ja niiden merkkauksesta. Näytteisiin oli kuvan mukaisesti merkattu teräslaatu ja valssaussuunta. Näytteisiin merkattiin myös juokseva numero tunnistuksen ja jäljitettävyyden varmistamiseksi.



Kuva 12. Esimerkki raepuhalletuista ja puhaltamattomista näytteistä.

5.1.1 S355

S355 on mikrorakenteeltaan ferriittis-perliittinen (kuva 13) rakenneteräs. Se on pehmeä ja hyvin kylmämuokattava teräsmateriaali. Teräksen kemiallinen koostumus on annettu taulukossa 1 ja mekaaniset ominaisuudet taulukossa 2.



Kuva 13. Ferriittis-perliittinen mikrorakenne (Kauppi 2015).

Taulukko 1. S355 kemiallinen koostumus (Ruukki 2015).

S355 KEMIALLINEN KOOSTUMUS (enimmäispitoisuudet)					
C	Si	Mn	P	S	Nb
0.18	0.5	1.6	0.025	0.02	0.05

Taulukko 2. S355 mekaaniset ominaisuudet (Ruukki 2015).

S355 MEKAANISET OMINAISUUDET			
ReH MPa (paksuus mm)	Rm Mpa (paksuus mm)	Murtovenymä A ₅ % Poikittainen vähintään (paksuus mm)	Iskusitkeys Pitkittäinen vähintään -20 °C Charpy V 40 J (paksuus mm)
355 (5-16)	470-630 (5-100)	22 (5-63)	(5-100)
345 (16-40)		21 (63-100)	

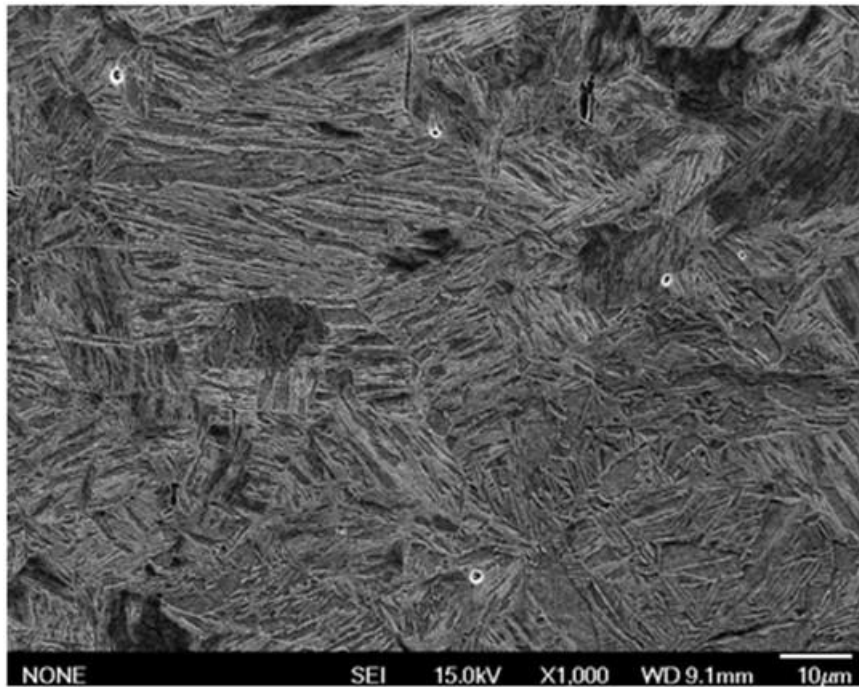
Taulukossa 3 on annettu teräslaadun S355-särmäystestien koematriisi. Kaikkien näytteiden paksuus oli $t = 20\text{mm}$ ja leveys $b = 120\text{mm}$. Näytteet oli irrotettu valssaussuuntaan (PI) tai poikittain sitä vastaan (PO). Särmät (4 kpl / näyte) arvoiteltiin kaksipuolaisella asteikolla (hyväksytty/hylätty).

Taulukko 3. S355 koematriisi.

S355					
Paksuus mm	Leveys mm	Valssaussuunta	Raepuhallettu	Arvostelu	Toistoja
20	120	PI	kyllä	Hyv/Hyl	4
20	120	PI	ei	Hyv/Hyl	4
20	120	PO	kyllä	Hyv/Hyl	4
20	120	PO	ei	Hyv/Hyl	4
				$\Sigma =$	16

5.1.2 Raex 400

Raex 400 -teräs on suorasammutusmenetelmällä karkaistua. Nopeassa jäähtymyksessä austeniitti hajaantuu martensiitiksi. Sälemartensiittisestä mikrorakenteesta johtuen teräs on erittäin kovaa ja lujaa. Kuvassa 14 nähdään martensiittistä mikrorakennetta. Kovuus ja lujuus luovat omat haasteensa kylmämuokkaukseen. Valmistajan lupaama minimitaivutussäde (r) riippuu ainespaksuudesta t ja särmäyssuunnasta. Ne ovat $R = 3t$ valssaussuuntaan nähden poikittain sekä $R = 4t$ valssaussuuntaan nähden pitkittäin.



Kuva 14. Raex 400 mikrorakenne martensiittia, sekä hieman itsepäässyttä martensiittia. (Kesti 2015).

Raex 400 kemiallinen koostumus annettu taulukossa 4 sekä mekaaniset ominaisuudet taulukossa 5. Teräkseen on seostettu karkenevuutta parantavia seosaineita, kuten kromia, molybdeeniä ja booria.

Taulukko 4. Raex 400 kemiallinen koostumus. (Ruukki 2015).

RAEX400 KEMIALLINEN KOOSTUMUS								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
0.23	0.8	1.7	0.025	0.015	1.5	1	0.5	0.005

Taulukko 5. Raex 400 mekaaniset ominaisuudet. (Ruukki 2015).

RAEX400 MEKAANISET OMINAISUUDET Paksuudet 6-80mm				
Kovuus (HBW)	Rp0,2 tai ReH min. MPa	Rm MPa	Murtovenymä A % vähintään	Iskusitkeys Charpy V `30 J
360-440	1000	1250	10	`-40°C

Raex 400 -laadun särmäystestien koematriisi on annettu taulukossa 6. Särmätävien näytteiden määrät poikkesivat hieman suunnitelluista. Tämä johtui siitä,

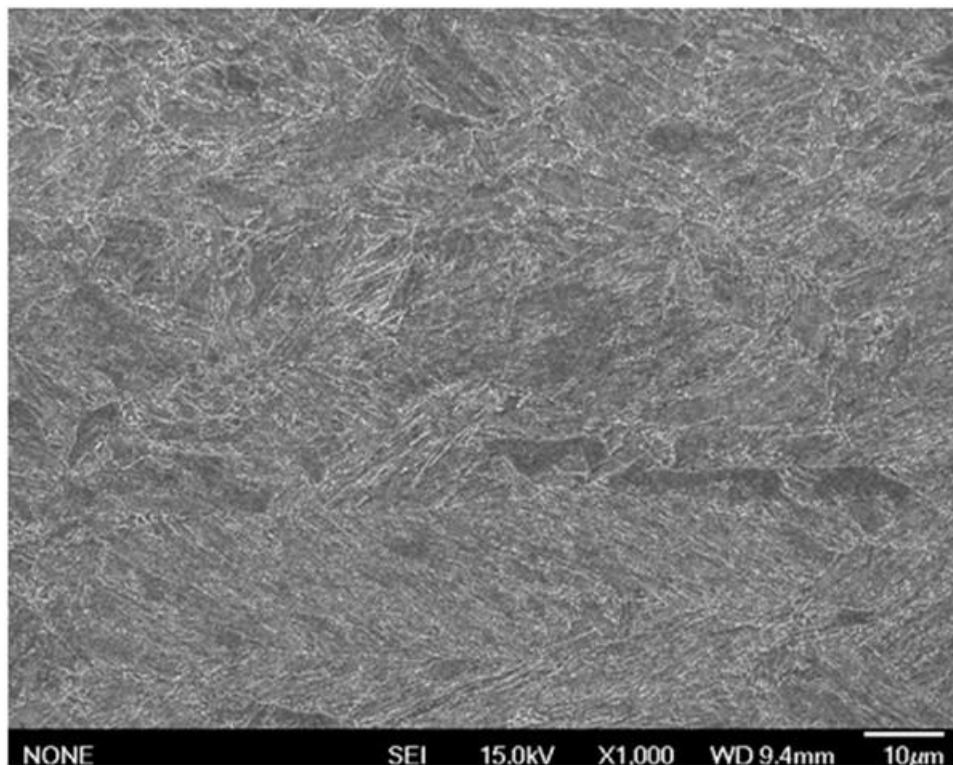
että koemateriaali loppui kesken eikä sitä ollut tilattu lisää, koska tiedettiin käytettävissä olevan määrän riittävän tarvittaviin särmäystesteihin. Levynpaksuudeltaan $t = 20$ mm näytteiden kohdalla jouduttiin $R = 4t$ särmäys jättämään tekemättä, koska kulman mittaaminen käytetyillä välineillä säteen suuruudesta johtuen olisi ollut mahdotonta. Tätä ei myöskään katsottu tarpeelliseksi, koska $R = 3t$ särmäyssäteellä saatiin riittävät tulokset. Raex 400 -teräslaadulla toteutunut koemäärä oli 124 kpl, josta levynpaksuudeltaan $t = 6$ mm oli 44 kpl, $t = 12$ mm 40 kpl ja $t = 20$ mm 40 kpl. Särmän arvostelussa käytettiin joko 2- tai 7-portaista asteikkoa.

Taulukko 6. Raex 400 -särmäystestien koematriisi.

Raex 400					
Paksuus mm	Leveys mm	Valssausuunta	Raepuhallettu	Arvostelu	Toistoja
6	120	PI	kyllä	Hyv/Hyl	6
6	120	PI	ei	Hyv/Hyl	6
6	120	PO	kyllä	Hyv/Hyl	6
6	120	PO	ei	Hyv/Hyl	6
6	300	PI	kyllä	Hyv/Hyl	6
6	300	PI	ei	Hyv/Hyl	6
6	300	PO	kyllä	Hyv/Hyl	6
6	300	PO	ei	Hyv/Hyl	6
12	120	PI	kyllä	1-7	6
12	120	PI	ei	1-7	6
12	120	PO	kyllä	1-7	6
12	120	PO	ei	1-7	6
12	300	PI	kyllä	1-7	6
12	300	PI	ei	1-7	6
12	300	PO	kyllä	1-7	6
12	300	PO	ei	1-7	6
20	120	PI	kyllä	Hyv/Hyl	6
20	120	PI	ei	Hyv/Hyl	6
20	120	PO	kyllä	Hyv/Hyl	6
20	120	PO	ei	Hyv/Hyl	6
20	300	PI	kyllä	Hyv/Hyl	6
20	300	PI	ei	Hyv/Hyl	6
20	300	PO	kyllä	Hyv/Hyl	6
20	300	PO	ei	Hyv/Hyl	6
				Σ=	144

5.1.3 S700

Ultraluja rakenneteräs S700 on hienorakeinen, nuorrutettu teräs, joka omaa suhteellisen hyvät kylmämuokkausominaisuudet. Se on mikrorakenteeltaan päästömartensiittinen (kuva 15). S700-materiaalin ohjeellinen kemiallinen koostumus on annettu taulukossa 7 ja mekaaniset ominaisuudet taulukossa 8. Valmistajan lupaama minimaivutussäde särmäyksessä tälle teräslaadulle on $R = 2.5t$, sekä pitkittäin että poikittain valssaussuuntaan nähden.



Kuva 15. S700 Päästömartensiittinen mikrorakenne. (Kesti 2015).

Taulukko 7. S700 kemiallinen koostumus (Ruukki 2015).

S700 KEMIALLINEN KOOSTUMUS									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni	Mo	B
0,20	0,80	1,70	0,020	0,010	1,50	0,50	2,00	0,70	0,005

Taulukko 8. S700 mekaaniset ominaisuudet (Ruukki 2015).

PAKSUUDET (mm)	S700 MEKAANISET OMINAISUUDET			
	Rp0,2 tai ReH Mpa vähintään	Rm Mpa	Murtovenymä % A vähintään	Iskusitkeys 10x10mm
6-50	690	770-940	14	≤-40°C vähin- tään 30 J
50.01-60	650	760-930	14	

S700-laadun särmäystestien koematriisi on annettu taulukossa 9. Koematriisiin särmäykset toteutettiin kokonaisuudessaan. S700-teräslaadulla toteutunut koemäärä oli 88 kpl, josta levynpaksuudeltaan $t = 8$ mm oli 44 kpl joista leveyksiä 70 mm 10 kpl, 120 mm 24 kpl, 300 mm 10 kpl ja $t = 12$ mm 44 kpl joista leveyksiä 70 mm 10 kpl, 120 mm 24 kpl, 300 mm 10 kpl. Särmäyskokeita tehtiin valssausuuntaan nähden pitkittäin, sekä poikittain. Särmän arvostelussa käytettiin 7-portaista asteikkoa.

Taulukko 9. S700 koematriisi.

S700					
Aineenvahvuus mm	Leveys mm	Valssausuunta	Raepuhallettu	Arvostelu	Toistoja
8	70	PI	kyllä	1-7	5
8	70	PI	ei	1-7	5
8	120	PI	kyllä	1-7	6
8	120	PI	ei	1-7	6
8	120	PO	kyllä	1-7	6
8	120	PO	ei	1-7	6
8	300	PI	kyllä	1-7	5
8	300	PI	ei	1-7	5
12	70	PI	kyllä	1-7	5
12	70	PI	ei	1-7	5
12	120	PI	kyllä	1-7	6
12	120	PI	ei	1-7	6
12	120	PO	kyllä	1-7	6
12	120	PO	ei	1-7	6
12	300	PI	kyllä	1-7	3
12	300	PI	ei	1-7	3
12	300	PO	kyllä	1-7	2
12	300	PO	ei	1-7	2
				Σ=	88

5.2 Särmäyskokeet

Opinnäytetyössä tehtävät särmäyskokeet suoritettiin ammattiopisto Lappian Kemin tekniikan koulutusalan Aliko 220–3000 tyyppisellä CNC-ohjatulla hydraulisella särmäyspuristimella. Särmäyspuristin nähdään kuvassa 16.

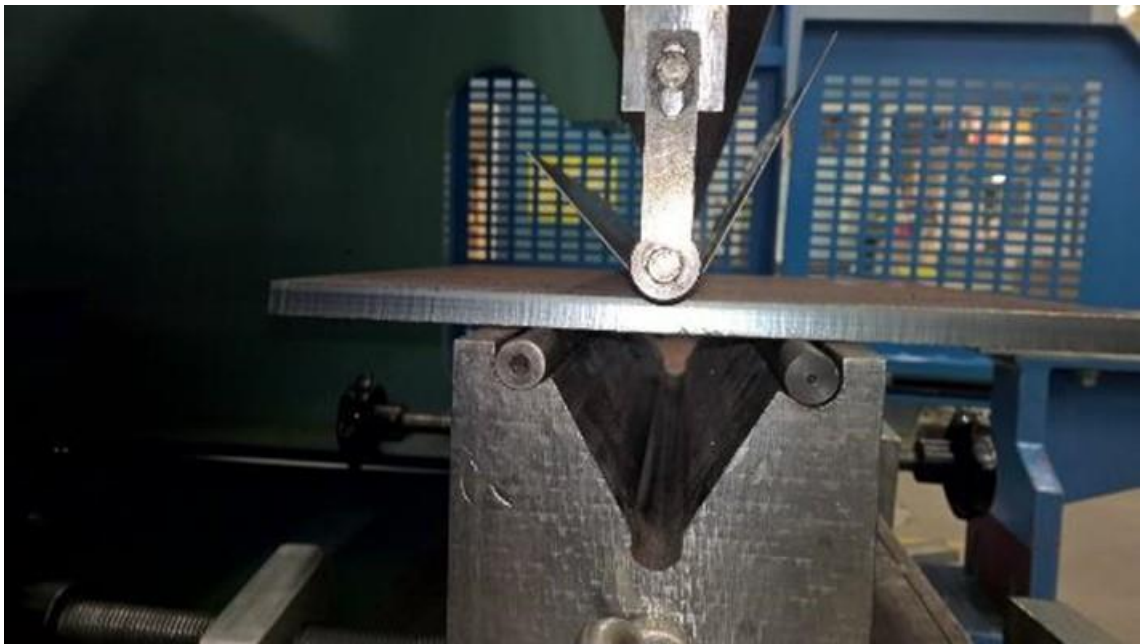


Kuva 16. Aliko 220–3000.

Särmäyspuristimen ohjelmoinnissa annettiin särmittävän kappaleen mitat, materiaali sekä haluttu kulma. Koneessa on olemassa takavaste, joka siirtyy särmäysjärjestyksen mukaan oikealle etäisyydelle painimesta, tämän käyttö on kuitenkin tarpeetonta kun särmitään yksinkertaisia koekappaleita. Takavaste ajettiin pois edestä ohjelmoimalla taipteen mitaksi 1000 mm kohtisuoraan särmään nähden.

Koneeseen ohjelmoitiin kappaleen paksuus sekä särmän pituus. Työlakuvalinnat tehtiin halutun sisäsäteen mukaan. Mikäli halutulla säteellä ei ollut valmista paininta, laitettiin painimen ja kappaleen väliin niin sanottua fyllilevyä kuten kuvassa 17. Esimerkiksi jos haluttu säde oli R13, ja painin oli R11, lisättiin kappaleen ja painimen väliin $t = 2$ mm vahva levy. Tämä menetelmä mahdollistaa sen, että

painimen sädettä R voidaan kasvattaa esimerkiksi 1 mm välein ilman, että jokaiselle R :lle on oma työkalu. Kun fyllilevyä käytetään, pitää se ottaa huomioon konetta ohjelmoitaessa niin, että kun materiaali vahvuus on esimerkiksi 8 mm ja halutaan käyttää $t = 2$ mm fylliä, niin materiaalin vahvuudeksi ohjelmoidaan $t = 6$ mm. Mikäli fyllilevyn vahvuutta ei huomioida aineenvahvuudessa, painaa kone kulman yli tavoitteen.



Kuva 17. Sisäsäteen kasvattaminen fyllilevyä käyttämällä.

Särmäyksen jälkeen kappaleelle tehtiin kulman mittaus Mitutoyo merkkisellä digitaalisella kulmamittarilla (kuva 18). Särmäyspuristin arvioi takaisinjouaston ohjelmoitujen parametrien mukaan, mutta tekee sen normaalilujuiselle rakenneteräkselle. Ultralujien terästen takaisinjousto on selvästi suurempi kuin koneen oletama ja tästä aiheutuu virhettä. Mikäli kulma ei ollut tavoitteessa tehtiin koneelle korjaus. Tavoitekulman ollessa 90° saatiin esimerkiksi 94° , voitiin ohjelmoida koneelle antamalla särmäyksessä saatu kulma, jonka mukaan kone muutti parametreja siten, että tavoitekulma toteutui. Korjaus pystyttiin myös tekemään ohjelmomalla suoraan korjauksen suuruus, eli kuinka paljon syvemmälle ylätyökalu painetaan.



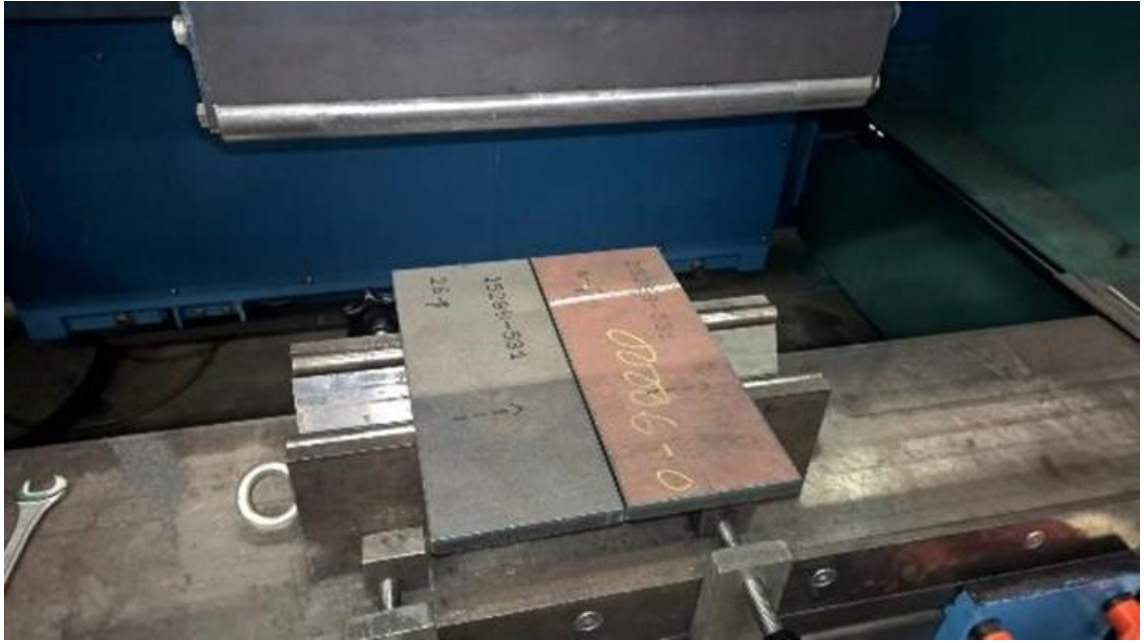
Kuva 18. Kulman mittaus.

Jokaisesta särmäyksestä kirjattiin käytetyt parametrit ja mittaustulokset särmäyspöytäkirjaan. Siihen kirjattiin seuraavat tiedot:

- särmäyspäivämäärä
- näytteen numero
- materiaali
- onko kappale raepuhallettu vai puhaltamaton
- näytekappaleen mitat
- käytetyt työkalut, sekä sisäsäteen suhde aineen vahvuuteen (R/t)
- särmän suunta valssaussuuntaan nähden
- korjauksen suuruus, sekä saavutettu kulma
- särmän virhe asteikolla 1-7 tai hyväksytty/ hylätty.

Kaikki särmäykset tehtiin niin sanotulle A-puolelle, eli puolelle jossa näytteiden merkkaukset olivat.

Kappaleet särmättiin pareina siten, että aina yksi raepuhallettu ja puhaltamaton särmättiin samoilla asetusarvoilla. Kapeilla näytelevyksillä pystyttiin särmäämään kumpikin näyte samanaikaisesti kuten kuvassa 19 on esitetty.



Kuva 19. Kapeiden näytteiden yhtäaikaista särmäystä.

5.3 Särmien arvostelu

Särmät arvosteltiin ennalta sovitusti, joko hyväksytty/hylätty tai käyttämällä SSAB:n 1-7 portaista referenssisarjaa. Referenssisarjan näyte 1 edustaa virheetöntä särmää ja virheluokka kasvaa asteittain virhe 7:ään saakka, joka on avomurtuma. Hyväksytty/hylätty arvosteltavia näytteitä verrattiin myös 1-7 portaiseen referenssinäytesarjaan siten, että virheluokka 3 oli hyväksytty ja virheluokka 4 hylätty. SSAB:n 1-7 portainen referenssisarja nähdään kuvassa 20. Äärimmäisenä vasemmalla oleva näyte edustaa virheluokkaa 7 ja äärimmäisenä oikealla oleva virheluokkaa 1.



Kuva 20. SSAB:n 1-7 portainen referenssisarja.

Särmät arvosteltiin riittävässä valaistuksessa ilman optisia apulaitteita. Kuvassa 21 nähdään raepuhalletun S700-teräslaadun särmävirheen arvostelua.



Kuva 21. Särmävirheen arvostelua.

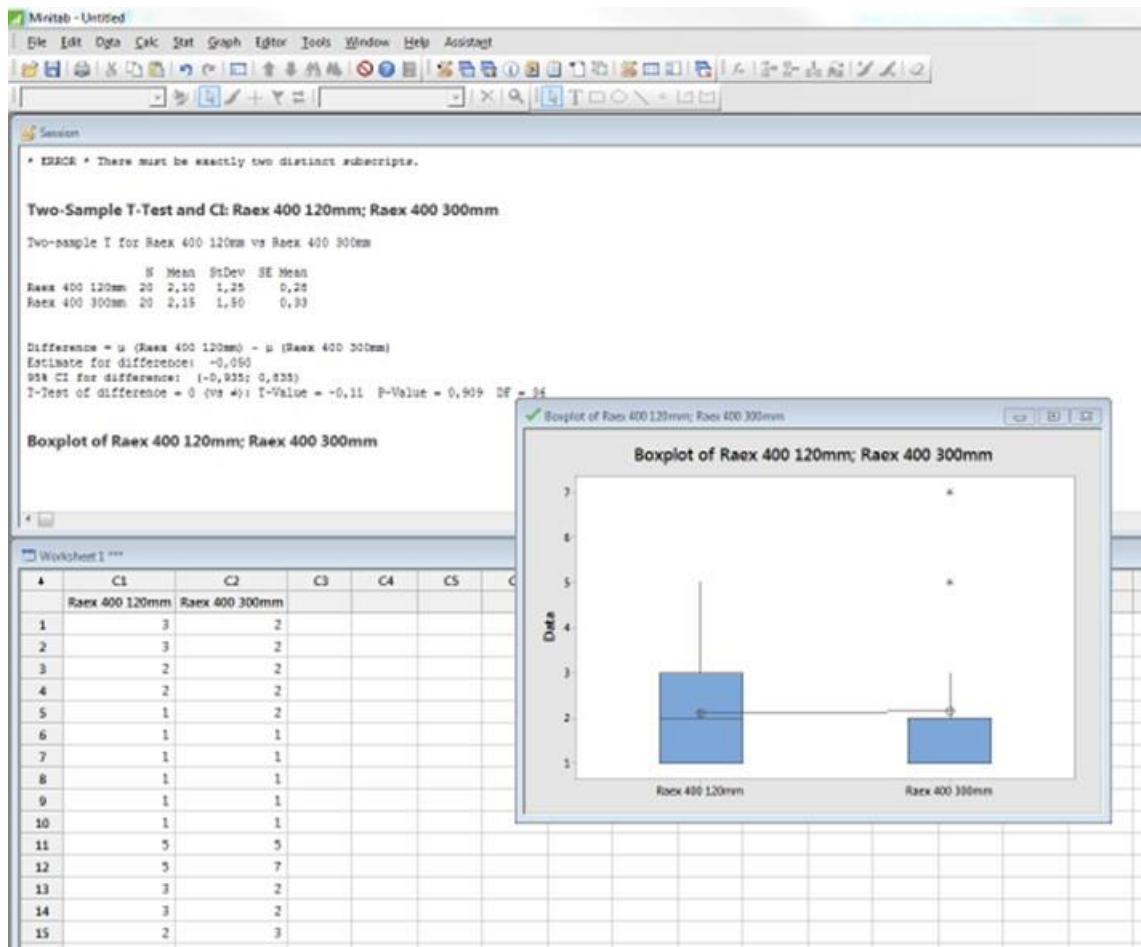
Mikäli särmävirheet olivat rajatapauksia siten, että oli vaikea sanoa onko virhe esimerkiksi 3- tai 4-tasoinen, tarkasteltiin puhalletun ja puhaltamattoman eroja. Mikäli vertailussa havaittiin eroja, niin tarkasteltiin olivatko erot niin suuria, että vakavampi virhe luokiteltaisiin esimerkiksi 4-luokkaan.

5.4 Tulosten käsittely

Excel-taulukkolaskentaohjelmaan täytetty särmäyspöytäkirja käsiteltiin muotoon, jossa tuloksien tarkastelu oli selvempää. Sievennetyt taulukot tehtiin siten, että jokainen materiaali laitettiin omaan taulukkoon ja raepuhallettu, sekä puhaltamaton eri sarakkeisiin.

Raepuhalletun ja puhaltamattoman eroavaisuuksia, kuten takaisinjouston suuruutta, hylkäysprosentteja sekä keskiarvoja laskettiin Excel-taulukkolaskentaohjelmalla.

Minitab17 tilastomatematiikkasovelluksella tehtiin t-testejä datalle, jota haluttiin vertailla. T-testillä pystytään vertailemaan kahden erillisen otoksen keskiarvojen eroavaisuutta. Otokset tässä työssä olivat raepuhallettu ja puhaltamaton, sekä muuttujana esimerkiksi särmäyssäteen ja levynpaksuuden suhteen R/t -arvo, jonka suhteen eroavaisuuksia haettiin. T-testi tehtiin myös särmäysleveyden tarkastelussa, koska ennakko-oletus oli se, että leveä näyte olisi kriittisempi särmätävä. Kuvassa 22 nähdään esimerkki Minitab17 sovellusohjelmalla tehdystä t-testistä.



Kuva 22. Minitab17 ohjelmalla tulosten tarkastelua.

Tuloksena t-testistä saadaan graafisen ruutu- ja janakaavion (boxplot tästä eteenpäin) lisäksi P-arvo, joka kertoo otosten tilastollisesta erosta. Mikäli $P < 0.05$ on nollahypoteesi voimassa eli otosten keskiarvot poikkeavat tilastollisesti toisistaan. Kun taas P-arvo on 0.001 tai pienempi on otosten keskiarvojen tilastollinen eroavaisuus merkittävä.

6 TULOKSET

Seuraavassa käydään läpi eri teräslaatuja särmäystestien välittömät tulokset.

6.1 S355

Teräslaadulle S355 tehtiin 16 särmäyskoetta, joista kaikki olivat hyväksytyjä. Raepuhallettujen näytteiden takaisinjousto oli keskimäärin 0.2° suurempi kuin puhaltamattomien. Työssä ei havaittu S355-materiaalilla muita eroavaisuuksia raepuhallettujen ja puhaltamattomien välillä.

6.2 Raex 400

Teräslaadun Raex 400 osalta takaisinjousto oli raepuhalletuissa näytteissä keskimäärin 0.5° suurempi. Hyväksytty/hylätty arvostelussa raepuhalletuissa näytteissä tuloksena saatiin 17 kpl hylättyjä kaikkiaan 40:stä särmästä. Puhaltamattomissa näytteissä suhde oli 5/40. Kaikki $R/t = 3-4$ suhteella tehdyt särmäykset olivat hyväksytyjä.

Tarkemmalla 7-portaisella asteikolla arvosteltujen raepuhallettujen näytteiden särmävirheen keskiarvo oli 2.6 ja puhaltamattoman 1.5. Taivutussäteen ja ainespaksuuden suhteella $R/t = 4$ kaikki särmätyt kappaleet edustivat virheluokkaa 1. Pienemmällä arvolla $R/t = 3$ kaikki raepuhalletut edustivat virheluokkaa 2 ja puhaltamattomat virheluokkaa 1.

6.3 S700

Teräslaadun S700 osalta takaisinjousto oli raepuhalletuissa näytteissä keskimäärin 0.52° suurempi kuin puhaltamattomassa. Virheluokkien keskiarvot koko koematriisissa olivat raepuhalletulla 3.5, sekä puhaltamattomalla 1.9.

7 TULOSTEN TARKASTELU

7.1 Särmäyskoe

S355-särmäyskokeita suorittaessa havaittiin suurempi takaisinjousto raepuhalletussa näytteessä. Takaisinjousto oli raepuhalletussa keskimäärin 0.2° suurempi. S355-teräslaadulla ei särmäyskokeissa havaittu muita ilmiöitä.

Raex 400 -särmäyskokeissa havaittiin takaisinjouston olevan raepuhalletussa keskimäärin 0.5° suurempi kuin puhaltamattomalla. Takaisinjousto on kulutusteräksillä huomattavasti suurempi kuin rakenneteräksillä ja 0.5° lisäys takaisinjousto on ei hankaloita särmäämistä. Kulutusteräksiä särmättäessä takaisinjouston suuruus joudutaan yleensä arvioimaan kokemuksen perusteella, sekä tekemään koesärmäyksiä. Särmättäessä harvoin päästään alle 1° :teen tarkkuuteen konepajaympäristössä, joten 0.5° virhe on verrattain varsin vähäinen vaikka särmätäisiin raepuhallettuja ja puhaltamattomia samoilla parametreilla.

Raex 400 -teräslaadun kohdalla havaittiin ilmiö, joka ei näy tilastollisessa tarkastelussa. Paksuilla $t = 20$ mm ja $b = 300$ mm leveillä näytteillä valssaussuuntaan nähden poikittain särmätyn näytteen pinta oli huomattavasti huonompi, kuin valssaussuuntaan nähden pitkittäisen. Valssaussuuntaan nähden pitkittäinen särmäys on oletusarvoltaan kriittisempi ja valmistaja lupaakin poikittaiselle särmäykselle minimi taivutussäteeksi 3xt ja pitkittäiselle 4xt. Kuvassa 23 a on esitetty valssaussuuntaan nähden pitkittäin sekä kuvassa 23 b valssaussuuntaan nähden poikittain särmätty näyte. Kyseinen laatu aineenvahvuudella $t = 20$ mm arvosteltiin hyväksytty/hylätty asteikolla ja molemmat, sekä pitkittäin ja poikittain valssaussuuntaan nähden särmätyt näytteet olivat hylättyjä.



Kuva 23. Raex 400 20 mm x 300 mm a) pitkittäinen ja b) poikittainen.

S700-särmäyskokeissa havaittiin takaisinjouston olevan keskimäärin 0.52° suurempi reapuhalletuilla näytteillä. Samoin kuten Raex 400:lla on ultralujalla S700-teräslaadulla takaisinjousto huomattavasti suurempi kuin rakenneteräksillä. Särmitessä takaisinjousto joudutaan ultralujilla materiaaleilla arvioimaan ja tehdään koesärmäys, joten 0.52° suuruinen ero raepuhalletun ja puhaltamattoman välillä on monessa tapauksessa merkityksellinen.

S700-materiaalin kohdalla havaittiin myös ilmiö, joka ei näy tilastollisessa tarkastelussa. Ainespaksuudeltaan $t = 12$ mm ja $b = 120$ mm leveiden kohdalla havaittiin raepuhalletussa voimakkaampaa särmänkarkaamista. Näytteet olivat särmätty taivutussäteen ja ainespaksuuden suhteella $R/t = 1.25$ ja virheluokat olivat reapuhalletussa 3 ja puhaltamattomassa 1. Kuvassa 24 nähdään esimerkki ilmiöstä. Raepuhallettu on kuvan ylempi näyte. Tämä ilmiö esiintyi erityisesti $b = 120$ mm leveän näytteen kohdalla ja oli S700-materiaalilla huomattava. Särmien sisäsäteitä ei mitattu.



Kuva 24. S700 b = 120 mm leveiden näytteiden ero.

R/t suhteen pienentämisen havaittiin kasvattavan raepuhalletun ja puhaltamattoman välisiä eroja teräslaatuojen Raex 400 ja S700 kohdalla. Kummankin teräslaadulla erot tulivat esiin kun särmäysparametrit olivat kriittisemmät kuin materiaalin valmistaja lupaa. Kriittisemmillä arvoilla särmättäessä puhaltamattomassakin oli monessa tapauksessa virheitä, joten R/t suhteen pienentämisen vaikutukset särmättävyyteen ovat suuremmat kuin raepuhalluksen.

7.2 Raepuhalluksen vaikutus särmättävyyteen

Raex 400 -teräslaadun $R/t = 2-4$ suhteella särmättyjen kappaleiden t-testin tulokset nähdään kuvassa 25 sekä boxplot-kuvaaja kuvassa 26. P – arvo on 0.001, joten ero puhalletun ja puhaltamattoman näytteen välillä on merkittävä. Tämä nähdään selvästi boxplot-kuvaajasta.

Two-Sample T-Test and CI: R/T=2-4 EI puh; R/T=2-4 Puh

Two-sample T for R/T=2-4 EI puh vs R/T=2-4 Puh

	N	Mean	StDev	SE Mean
R/T=2-4 EI puh	18	1,278	0,461	0,11
R/T=2-4 Puh	18	2,000	0,686	0,16

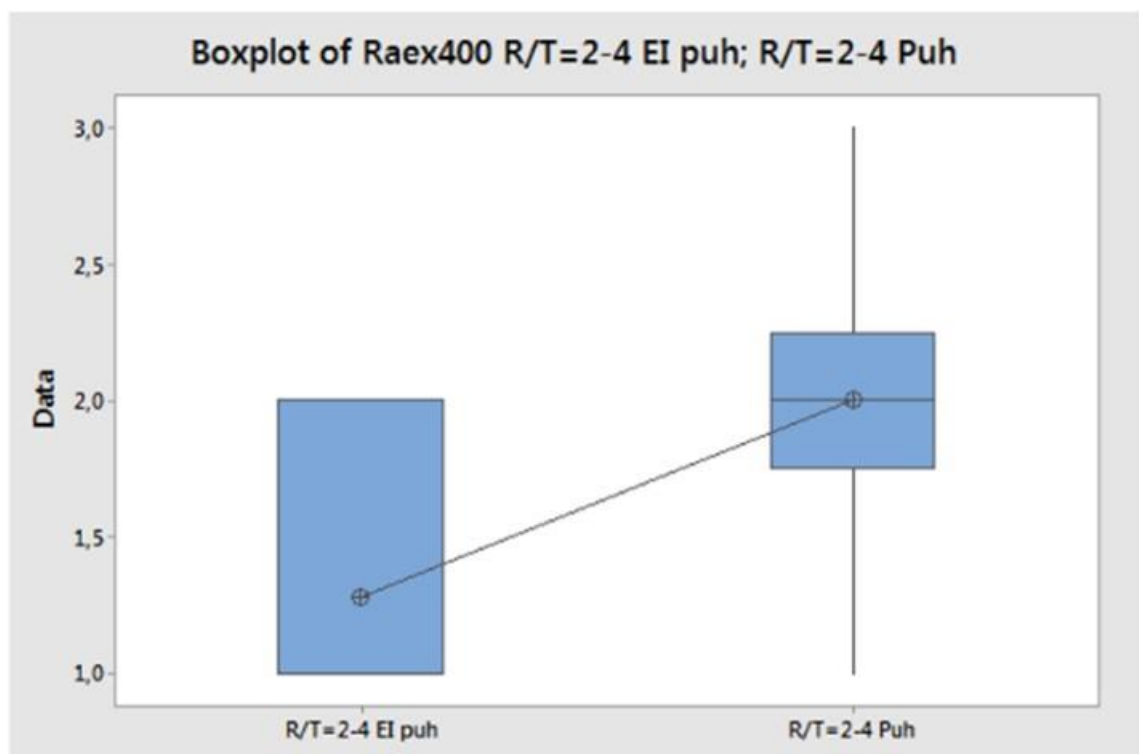
Difference = μ (R/T=2-4 EI puh) - μ (R/T=2-4 Puh)

Estimate for difference: -0,722

95% CI for difference: (-1,121; -0,324)

T-Test of difference = 0 (vs \neq): T-Value = -3,71 P-Value = 0,001 DF = 29

Kuva 25. Raex 400 R/t=2-4 t-testi.



Kuva 26. Boxplot-kuvaaja Raex 400 R/t=2-4.

Kuvassa 27 nähdään Raex 400 -materiaalin koko koematriisin t-testi ja boxplot-kuvaaja kuvassa 28. Kuvan 27 mukaan t-testin P-arvo on hieman suurempi koko aineistoa tarkasteltaessa eli tilastollisesti tarkasteltaessa raepuhalluksella ei ole niin suurta vaikutusta.

Two-Sample T-Test and CI: Raex 400 Ei Puh; Raex 400 Puh

Two-sample T for Raex 400 Ei Puh vs Raex 400 Puh

	N	Mean	StDev	SE Mean
Raex 400 Ei Puh	22	1,500	0,673	0,14
Raex 400 Puh	22	2,64	1,56	0,33

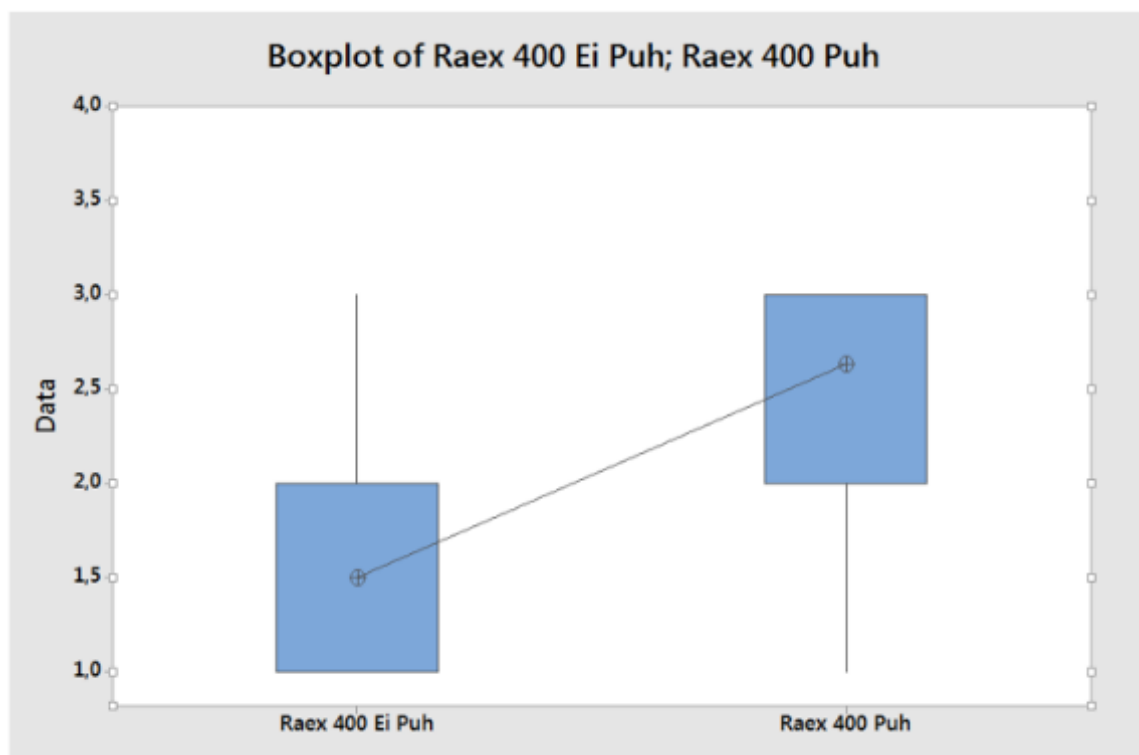
Difference = μ (Raex 400 Ei Puh) - μ (Raex 400 Puh)

Estimate for difference: -1,136

95% CI for difference: (-1,878; -0,395)

T-Test of difference = 0 (vs \neq): T-Value = -3,14 P-Value = 0,004 DF = 28

Kuva 27. Raex 400 koko koematriisiin t-testi.



Kuva 28. Boxplot-kuvaaja Raex 400 koko matriisista.

Hyväksytty/hylätty arvostelluista R/t=3-4 kaikki olivat hyväksytyjä. Hyväksytty/hylätty arvostelulla saaduilla tuloksilla Raex 400 -materiaalin kohdalla eroavaisuuksia syntyi, kun särmäysparametrit olivat alle valmistajan antaman minimiarvon.

Seitsemän (7) portaisella arvostelulla kaikki näytteet arvosteltiin virheettömäksi R/t:n ollessa 4, jota voidaan pitää hyvänä tuloksena. R/t:n ollessa 3 havaittiin

eroavaisuuksia, kun kaikki raepuhalletut olivat virheluokkaa 2 ja puhaltamattomat virheettömiä. R/t ollessa 2-4 tehtiin t-testi, josta havaittiin merkittävä eroavaisuus raepuhalletun ja puhaltamattoman välillä, P-arvon ollessa 0.01.

Koko koematriisin tuloksista voidaan nähdä raepuhallettujen ja puhaltamattomien keskiarvojen välillä olevan tilastollinen eroavaisuus P-arvon ollessa 0.004. Huomioitavaa tässä on että suurin osa kokeista on tehty särmäysparametrien ollessa alle valmistajan lupaaman minimiarvon.

Raex 400 -materiaalin tärkeimpinä tuloksina voidaan pitää sitä, että R/t:n ollessa 4 ei käsittelyllä ei ole merkitystä, kun taas R/t:n ollessa 3 raepuhalletun virheet olivat luokkaa 2, joka on hyväksytty/hylätty asteikolle muunnettuna hyväksytty. Tässä on huomioitava, että R/t:n ollessa 3 on valssaussuuntaan nähden pitkittäinen särmäys alle valmistajan lupaaman minimiarvon. Raepuhalluksessa tulevan muokkauslujittuneen pintakerroksen särmäystä huonontavat vaikutukset tulevat esiin kun käytetään pienempiä sisäsäteitä mitä valmistaja tälle teräslaadulle suosittelee.

Kuvassa 29 nähdään S700-teräslaadun R/t=1 tehty t-testi, sekä kuvassa 30 boxplot-kuvaaja. Kuvan 29 mukaan t-testin P-arvo on 0.00, joten eroavaisuus on merkittävä, tämä nähdään myös kuvan 30 boxplot-kuvaajasta.

Two-Sample T-Test and CI: S700 Ei puh R/T=1; S700 Puh R/T=1

Two-sample T for S700 Ei puh R/T=1 vs S700 Puh R/T=1

	N	Mean	StDev	SE Mean
S700 Ei puh R/T=1	14	3,07	1,27	0,34
S700 Puh R/T=1	14	5,357	0,842	0,23

Difference = μ (S700 Ei puh R/T=1) - μ (S700 Puh R/T=1)

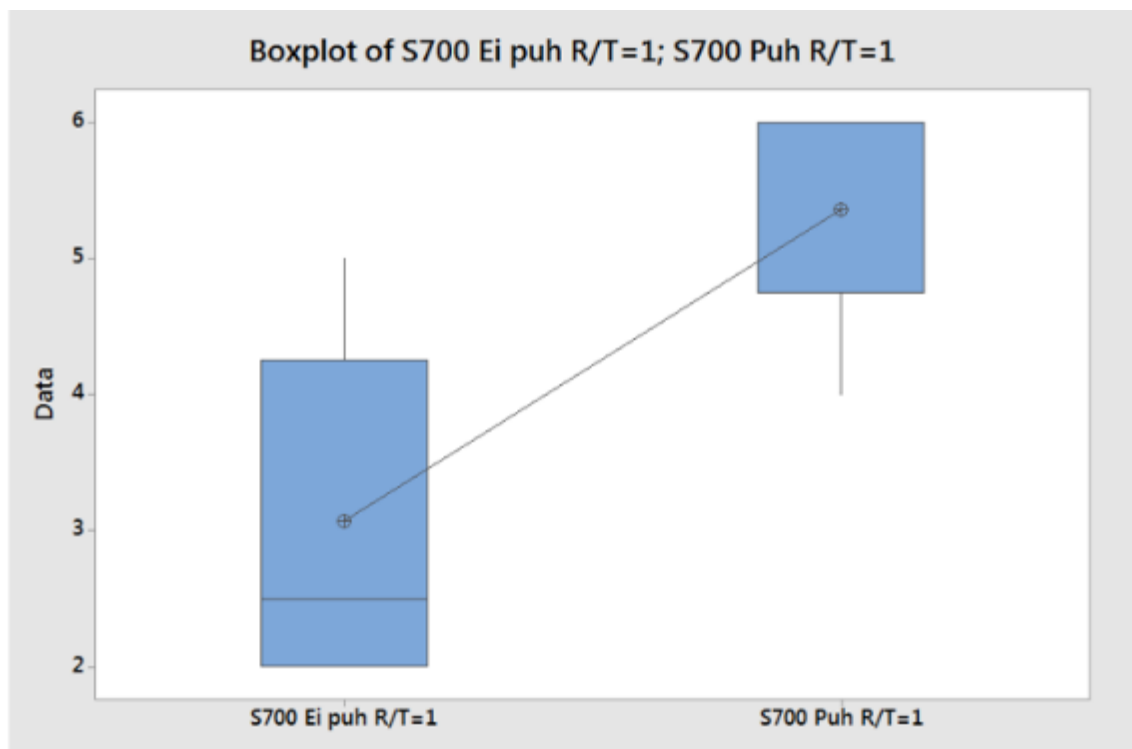
Estimate for difference: -2,286

95% CI for difference: (-3,122; -1,449)

T-Test of difference = 0 (vs \neq): T-Value = -5,62 P-Value = 0,000 DF = 26

Both use Pooled StDev = 1,0767

Kuva 29. S700 R/t=1 t-testi.



Kuva 30. S700 R/T=1 boxplot-kuvaaja.

Kuvassa 31 nähdään t-testi $R/t=1.5$ ja boxplot-kuvaaja kuvassa 32. Kuvan 31 t-testin mukaan P-arvo on 0.00, joten särmäyssäteen kasvattaminen ei ole pienentänyt eroavaisuutta.

Two-Sample T-Test and CI: S700 Ei puh R/T=1.5; S700 Puh R/T=1.5

Two-sample T for S700 Ei puh R/T=1.5 vs S700 Puh R/T=1.5

	N	Mean	StDev	SE Mean
S700 Ei puh R/T=1.5	14	1,143	0,363	0,097
S700 Puh R/T=1.5	14	2,571	0,756	0,20

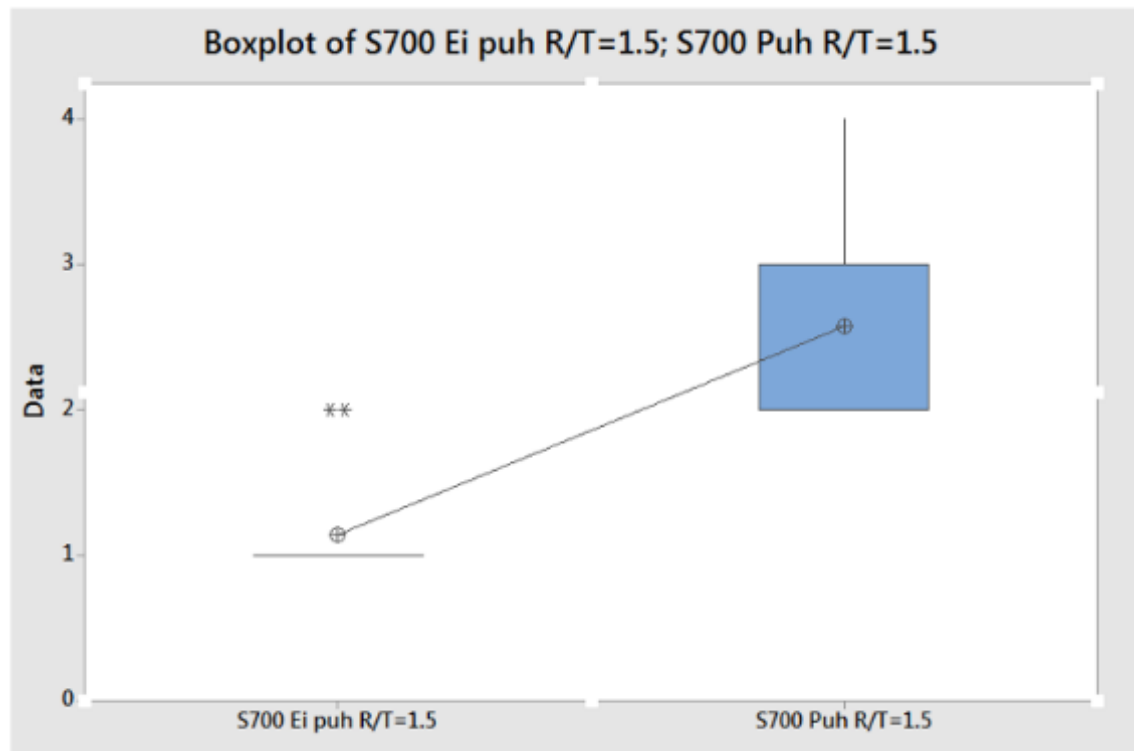
Difference = μ (S700 Ei puh R/T=1.5) - μ (S700 Puh R/T=1.5)

Estimate for difference: -1,429

95% CI for difference: (-1,889; -0,968)

T-Test of difference = 0 (vs \neq): T-Value = -6,37 P-Value = 0,000 DF = 26

Kuva 31. S700 t-testi $R/t=1$.



Kuva 32. Boxplot-kuvaaja R/T=1.

Kuvassa 33 nähdään koko koematriisin t-testi ja boxplot-kuvaaja kuvassa 34. Kuvan 33 t-testin mukaan P-arvo on edelleen 0.00, joten koko koematriisia tarkastellessa on raepuhalletun ja puhaltamattoman välillä merkittävä eroavaisuus.

Two-Sample T-Test and CI: S700 EI puh; S700 Puh

Two-sample T for S700 EI puh vs S700 Puh

	N	Mean	StDev	SE Mean
S700 EI puh	44	1,93	1,17	0,18
S700 Puh	44	3,52	1,52	0,23

Difference = μ (S700 EI puh) - μ (S700 Puh)

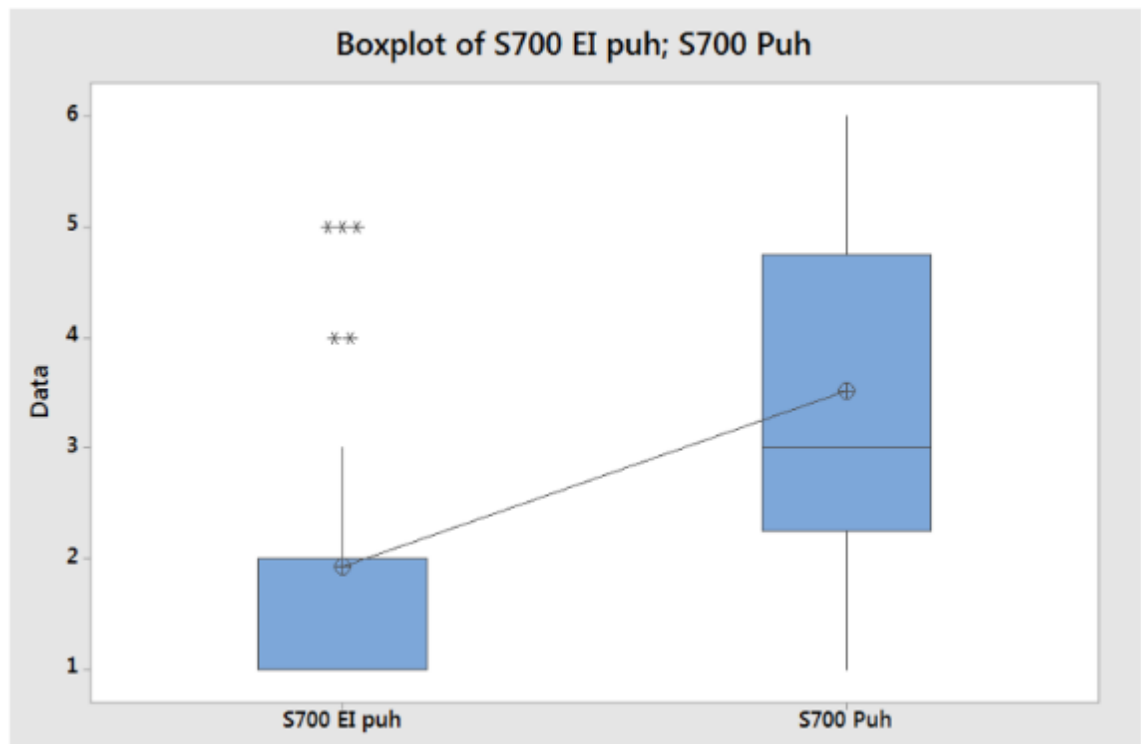
Estimate for difference: -1,591

95% CI for difference: (-2,165; -1,017)

T-Test of difference = 0 (vs \neq): T-Value = -5,51 P-Value = 0,000 DF = 86

Both use Pooled StDev = 1,3545

Kuva 33. S700 koko koematriisi.



Kuva 34. S700 koko koematriisi boxplot-kuvaaja.

Raepuhalletun ja puhaltamattoman välillä $R/t=1$ tuloksissa on merkittävä eroavaisuus, koska P-arvo on erittäin pieni (0.00). Tulosten tarkastelussa tulee huomioida, että $R/t:n$ ollessa 1, on ylätyökalun sisäsäde huomattavasti pienempi, kuin valmistajan lupaama minimiarvo.

Kun R/t suhdetta suurennetaan 1.5:een, ei raepuhalletun ja puhaltamattoman ero pienene vaan t-testin p-arvo on 0.00. Tässä tulee huomioida että $R/t=1.5$ on edelleen pienempi, kuin valmistajan tälle teräslaadulle lupaama minimi arvo.

Koko koematriisin t-testistä nähdään että raepuhalletun ja puhaltamattoman keskiarvojen eroavaisuus S700-teräslaadulla on merkittävä p-arvon ollessa 0.00.

S700-materiaalin tärkeimpänä tuloksena voidaan pitää sitä, että $R/t:n$ ollessa 1.75 sekä 2, olivat kaikki särmät virheettömiä. Tulosta voidaan pitää erittäin hyvänä koska valmistajan lupaama minimitaivutussäde on 2.5xt. Raepuhalluksessa tulevan muokkauslujittuneen pintakerroksen särmäystä huonontavat vaikutukset

tulevat esiin kun käytetään pienempiä sisäsäteitä mitä materiaalinvalmistaja tälle teräslaadulle suosittelee.

7.3 Taivutuskokeen ja särmättävyyden välinen yhteys

Kuvassa 35 nähdään Raex 400 t-testi 120 mm ja 300 mm särmäysleveyksien vertailusta ja boxplot-kuvaaja kuvassa 36. Kuvan 35 mukaan t-testin P-arvo on 0.909, joten 120 mm ja 300 mm leveiden näytteiden välillä eroavaisuuksia ei ole.

Two-Sample T-Test and CI: Raex 400 120mm; Raex 400 300mm

Two-sample T for Raex 400 120mm vs Raex 400 300mm

	N	Mean	StDev	SE Mean
Raex 400 120mm	20	2,10	1,25	0,28
Raex 400 300mm	20	2,15	1,50	0,33

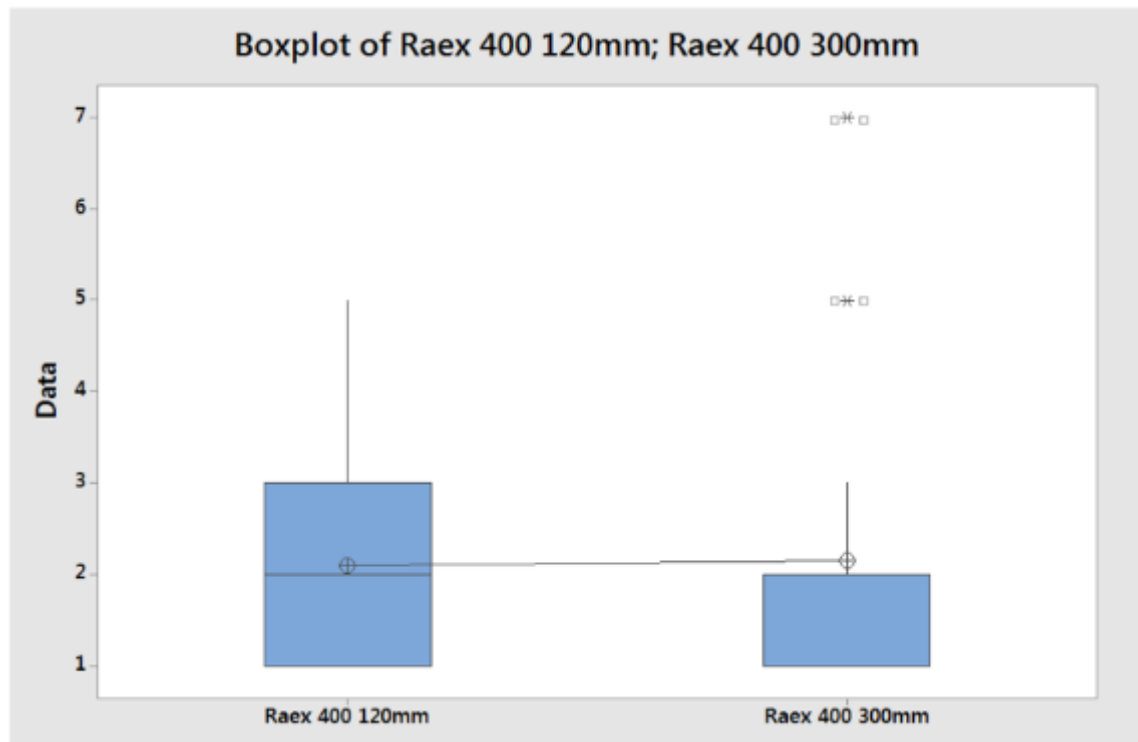
Difference = μ (Raex 400 120mm) - μ (Raex 400 300mm)

Estimate for difference: -0,050

95% CI for difference: (-0,935; 0,835)

T-Test of difference = 0 (vs \neq): T-Value = -0,11 P-Value = 0,909 DF = 36

Kuva 35. Raex 400 leveyden vaikutus.



Kuva 36. Raex 400 leveyden vaikutus boxplot-kuvaaja.

Koekappaleen leveyden vaikutusta särmättävyyteen tarkasteltiin t-testillä 120 mm ja 300 mm leveyden näytteiden välillä. Kokeiden perusteelle voidaan todeta että Raex 400 -materiaalille särmäysleveyden kasvattamisella ei ollut vaikutusta tuloksiin kun P-arvo on 0.909.

Kuvassa 37 nähdään S700 -teräslaadun näyteleveyden vertailun t-testi 120 mm ja 300 mm leveyksien välillä ja boxplot-kuvaaja kuvassa 38. Kuvan 37 t-testin mukaan P-arvo on 0.097, joten 120 mm ja 300 mm leveyden näytteiden välillä ei eroavaisuuksia ole.

Two-Sample T-Test and CI: S700 120x12 R/T=1 Ei puh; S700 300x12 R/T=1 Ei puh

Two-sample T for S700 120x12 R/T=1 Ei puh vs S700 300x12 R/T=1 Ei puh

	N	Mean	StDev	SE Mean
S700 120x12 R/T=1 Ei puh	4	3,00	1,15	0,58
S700 300x12 R/T=1 Ei puh	4	4,50	1,00	0,50

Difference = μ (S700 120x12 R/T=1 Ei puh) - μ (S700 300x12 R/T=1 Ei puh)

Estimate for difference: -1,500

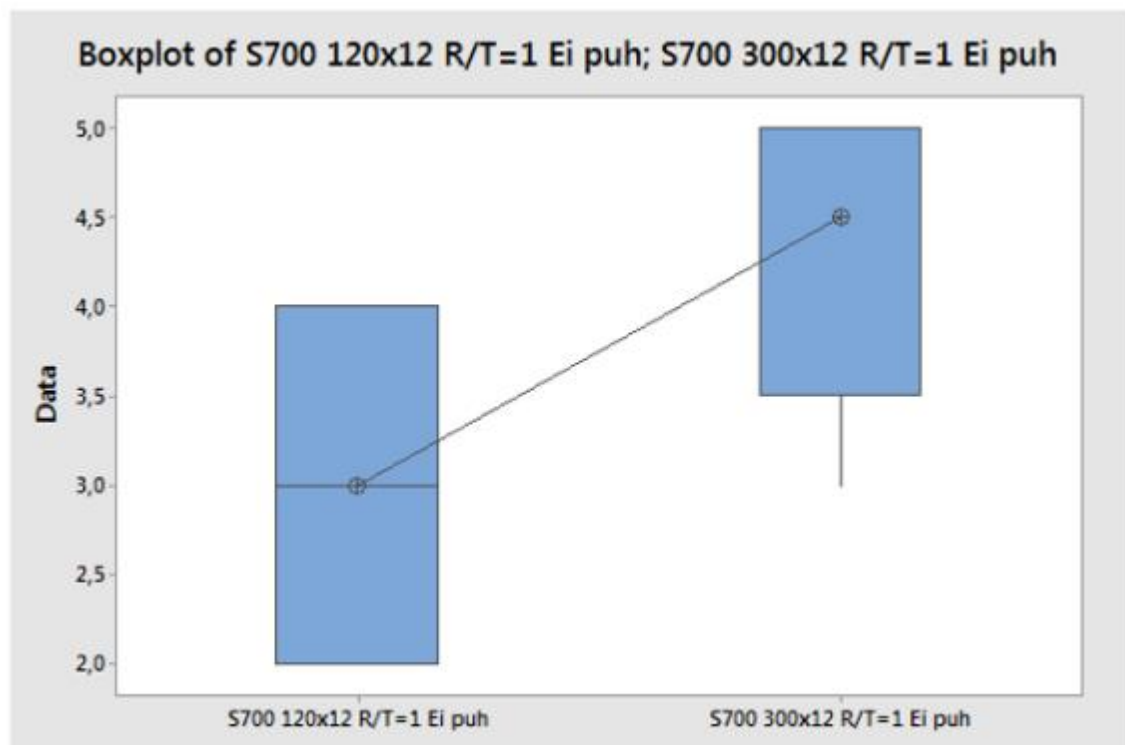
95% CI for difference: (-3,369; 0,369)

T-Test of difference = 0 (vs \neq): T-Value = -1,96 P-Value = 0,097 DF = 6

Both use Pooled StDev = 1,0801

Boxplot of S700 120x12 R/T=1 Ei puh; S700 300x12 R/T=1 Ei puh

Kuva 37. t-testi leveyden muutoksesta.



Kuva 38. Boxplot kuvaaja leveyden muutoksesta.

Särmäysleveyden muutoksen vaikutusta särmättävyyteen S700-teräslaadulla verrattiin 120 mm ja 300 mm leveiden näytteiden välillä 12 mm paksulla materiaalilla. Leveyden kasvamisella ei havaittu olevan yhteyttä särmättävyyteen P-arvon ollessa 0.097.

Näytelevyden kasvattamisen odotettiin huonontavan särmäyskokeen tulosta. Tätä ilmiötä ei havaittu kun näytelevyksiä vertailtiin Raex- ja S700-laaduilla 120 mm ja 300 mm leveiden näytteiden välillä. Otokset olivat S700-laadulla 4 kpl 120 mm leveitä ja 4 kpl 300 mm leveitä, sekä Raex-laadulla 20 kpl 120 mm leveitä ja 20 kpl 300 mm leveitä. Taivutuskokeessa käytetyn kapean näytteen voidaan olettaa tuovan samat virheet esiin, mitä särmäyksen, joten materiaaleille tehtävää taivutuskoetta voidaan pitää riittävänä.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn johtopäätöksenä voidaan todeta, että raepuhallus ei heikennä S355-teräslaadun särmättävyyttä. Raepuhallusta voidaan käyttää S355-teräksen pinnanpuhdistusmenetelmänä, eikä sillä ole vaikutusta materiaalin särmättävyyteen.

Raex 400 -teräslaadulla raepuhallus huonontaa materiaalin särmättävyyttä jonkin verran, mutta huonontavat vaikutukset tulevat esiin vasta, kun särmätään kriittisemmillä arvoilla kuin materiaalinvalmistaja lupaa. Raex 400 -teräkselle voidaan käyttää raepuhallusta pinnan puhdistukseen, eikä se vaikuta materiaalin särmättävyyteen mikäli pysytään SSAB:n lupaamissa minimitaivutussäteissä.

Kuten Raexilla, niin myös S700-teräslaadulla raepuhallus huonontaa särmättävyyttä. Raepuhalluksen särmättävyyttä huonontavat vaikutuksen tulevat esiin kun ei noudateta valmistajan antamia minimitaivutussäteitä, samoin kuin Raexilla. S700-teräslaatu pystytään raepuhaltamaan, eikä se vaikuta materiaalin särmättävyyteen mikäli pysytään SSAB:n lupaamissa minimitaivutussäteissä.

Särmäysleveyden kasvattaminen 120 mm:stä 300 mm:iin ei vaikuttanut heikentävästi särmättävyyteen. Leveyden osalta materiaalin taivutuskoetta voidaan pitää riittävänä.

9 POHDINTA

Raepuhalluksen vaikutus särmäyskokeisiin oli mielenkiintoinen aihe opinnäytetyölle. Työ syvensi jo aiempaa tietämystäni särmäyskokeista, sekä opin tilastollisesta tarkastelusta ja Minitab17 ohjelmistosta paljon uutta. Mielestäni työ oli hyvä esimerkki tutkimuksesta, jossa tehtiin käytännön työ sekä saatujen tuloksien analysointi.

Tuloksia voidaan pitää suuntaa antavina, koska otokset tilastollisessa tarkastelussa olivat niin pieniä, että satunnaisvirheellä saattaa olla vaikutusta tuloksiin. Tärkeä huomio on myös se, että tutkimus perustui silmämääräiseen tarkasteluun jossa näytteiden pinnat olivat täysin erilaisia.

Saaduista tuloksista kuitenkin saadaan selville, että raepuhallus huonontaa särmättävyyttä S700:lla, sekä Raex 400:n kohdalla. S355:n kohdalla raepuhalluksella ei ole vaikutusta särmättävyyteen, joskin S355:n koematriisi oli huomattavan suppea. Tärkein tuloksista on että raepuhalluksen huonontavat vaikutukset tulevat esiin vasta silloin, kun särmätään kriittisemmillä arvoilla jotka materiaalin valmistaja lupaa. Kun noudatetaan valmistajan lupaamia minimitaivutussäteitä, ei raepuhalluksella ole vaikutusta särmättävyyteen.

Särmäysleveyden kasvattaminen ei huonontanut tulosten mukaan särmättävyyttä, vaikka odotusarvot olivat toisin. Tässäkin otossuuruudet olivat suhteellisen pienet ja mahdolliset satunnaisvirheet ovat voineet vaikuttaa tuloksiin. Mikäli tätä aihetta tutkitaan myöhemmin, tulisi se mielestäni tehdä siten, että valitaan R/t-suhde jolla saadaan särmään 1-4 luokan virheitä ja verrattavien materiaalien erona ainoastaan leveys. Otoksien suuruudet tulisi luotettavuutta ajatellen olla suuremmat mitä tässä työssä on vertailtu.

Mikäli tulevaisuudessa tehdään vastaavanlaisia tutkimuksia, kannattaa mielestäni valssaussuunnan huomioiminen jättää kokonaan pois. Tällä saataisiin tuplattua otos suuruudet samalla koe määrällä, jolloin satunnaisvirheen vaikutus pieneneisi. Valssaussuunnan huomioiminen ei mielestäni antanut lisäarvoa tälle

työlle. Koesuunnittelu tulisi myös toteuttaa paremmin jotta tuloksista saataisiin enemmän irti.

Työ oli mielestäni kaikin puolin onnistunut ja mielenkiintoinen kokonaisuus. Raepuhalluksen vaikutuksesta särmättävyyteen saatiin suuntaa antavia tuloksia joita SSAB pystyy käyttämään tulevaisuudessa investointipäätöksiin.

10 LÄHTEET

- Aaltonen, K., Andersson, P., & Kauppinen, V. 2015. Levytyö- ja työvälinetekniikat. Helsinki: WSOY.
- Kauppi, T. 2015. Hitsaajan materiaalioppi- osa1- luku3.
- Kesti, V. 2015. Mikrorakenteet. Email Niko.Tulkki@edu.lapinamk.fi 31.08.2015. Tulostettu 01.09.2015.
- Lepola, P & Makkonen, M. 2005. Hitsaustekniikat ja teräsrakenteet. Helsinki: WSOY.
- Matilainen, J., Parviainen, M., Havas, T., Hiitelmä, E. & Hultin, S. 2011. Ohutlevytuotteiden suunnittelijan käsikirja. Helsinki: Teknologiainfo Teknova Oy.
- Rautaruukki 2014. Raahan tehtaan esittely. Powerpoint-esitys.
- Ruukki 2015. Kuumavalssatut teräkset. Viitattu: 05.06.2015
<http://www.ruukki.fi/Teras/Kuumavalssatut-terakset>
- SFS-EN 10149-. Kuumavalssatut lujat kylmämuovattavat teräslevytuotteet. Osa1: Yleiset tekniset toimitusehdot
- SSAB 2015a. SSAB lyhyesti. Viitattu: 05.06.2015
<http://www.ssab.com/fi/Sijoittajat-ja-media/Tietoa-SSABsta/SSAB-lyhyesti/>
- SSAB 2015b. Vuosikatsaus. Viitattu: 05.06.2015
<http://mb.cision.com/Main/980/9763352/372026.pdf>