

ULTRALUJIEN TERÄSTEN KUUMASÄRMÄYSTUTKIMUS

Teräs Toni

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

2016

Tekniikka ja liikenne
Kone- ja tuotantotekniikka
Insinööri (AMK)

Tekijä	Toni Teräs	Vuosi	2016
Ohjaaja	TkL Timo Kauppi		
Toimeksiantaja	Vili Kesti SSAB Europe Oy		
Työn nimi	Ultralujien terästen kuumasärmäystutkimus		
Sivu- ja liitesivumäärä	49		

Opinnäytetyön aiheena oli tutkia esikuumentamisen vaikutusta ultralujien terästen särmättävyyteen. Työ oli jatkoa tuotantotekniikan suuntaavan projektin sekä Erikoistyö-kurssilla tehtyihin särmäyksiin. Kurseilla tehdyissä tutkimuksissa havaittiin esikuumentamisen vaikuttavan heikentävästi särmättävyyteen, mikäli käytettiin valmistajan suosittelemia minimitaivutussäteitä pienempiä arvoja. SSAB:n kiinnostuksen aihetta kohtaan herätti asiakkailta saadut samankaltaiset tulokset.

Koemateriaaleja oli kaksi: 550 HBW- sekä 600 HBW-teräs. Materiaaleille tehtiin särmäyskokeita eri lämpötiloissa. Esikuumentamislämpötiloja seurattiin lämpökameraa käyttäen, jolla myös tallennettiin lämpökuvia kappaleista. Särmäysparametrit ja tulokset kirjattiin särmäyspöytäkirjaan.

Työn tuloksena todettiin, että esikuumentaminen heikentää materiaalien särmättävyyttä. Esikuumentamisen särmättävyyttä heikentävä vaikutus tuli esiin vasta kun särmättiin huomattavasti SSAB:n lupaamia minimitaivutussäteen arvoja pienemmillä arvoilla. Tärkeimpänä tuloksena todettiin, ettei esikuumentaminen heikennä materiaalien särmättävyyttä, mikäli käytetään materiaalivalmistajan suosittelemia taivutussäteen arvoja.

Technology, Communication and
Transport
Mechanical and Production
Bachelor of Engineering

Author	Toni Teräs	Year	2016
Supervisor	Timo Kauppi, Lic.Sc.(Tech)		
Commissioned by	Vili Kesti SSAB Europe Oy		
Subject of thesis	Hot Bending Research on Ultra-High Strength Steels		
Number of pages	49		

The subject of this bachelor's thesis was to study how pre-heating affects the bendability of ultra-high strength steels. This thesis was a continuation of studies which were completed during two school courses. The results of the studies were that pre-heating has worsening effects on bendability, if the bending parameters under the manufacturer's minimum values were used. SSAB has received similar results from their customers.

Two different materials were used in this research: 550 HBW and 600 HBW-steel. The materials went through bending tests in various pre-heating temperatures. The pre-heating temperatures were monitored by using thermal infrared camera, which was also used in saving the thermal images from the heated test samples. The bending parameters and results were recorded.

The results revealed that pre-heating had worsening effects on the bendability of materials. The worsening effects came out when the bending parameters were more critical than SSAB promised. The most important result was that, if the SSAB's minimum values were used, pre-heating had no worsening effects on the bendability.

Key words

bending, pre-heating, ultra-high strength steel

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	SSAB	8
3	ULTRALUJA TERÄS	10
3.1	Ominaisuudet.....	10
3.2	Käyttökohteet.....	12
3.3	Erikoislujien terästen ympäristöedut	14
4	SÄRMÄYS- JA TAIVUTUSMENETELMÄT	15
4.1	Särmäyspuristin	16
4.2	Yleisimmin käytetyt särmäysmenetelmät	17
4.2.1	Vapaataivutus.....	18
4.2.2	Pohjaaniskutaivutus	18
4.3	Takaisinjousto	19
4.4	Taivutusvoima.....	22
5	KOEMATERIAALIT JA MENETELMÄT	24
5.1	Koemateriaalit.....	24
5.1.1	Teräkset A ja B.....	24
5.1.2	Teräs C	25
5.2	Tehdyt särmäyskokeet.....	27
5.3	Lisäsärmäykset	28
5.4	Särmäyskokeet	30
5.5	Mittauspöytäkirja	33
5.6	Lämpökamera ja näytteiden esikuumennus.....	34
5.7	Särmien arvostelu	37
6	TULOKSET	38
6.1	Teräs A särmäystestit	38
6.2	Teräs B särmäystestit	39
6.3	Teräs C särmäystestit	40
6.4	Jäähymiskäyrät	40
7	TULOSTEN TARKASTELU	43

8 JOHTOPÄÄTÖKSET	47
9 POHDINTA.....	48
LÄHTEET.....	49

ALKUSANAT

Kiitokset SSAB:lle ja DI Vili Kestille mielenkiintoisesta opinnäytetyön aiheesta, sekä opastuksesta ja avusta työn aikana. Erityiskiitos DI Raimo Ruopalle avustuksesta ja neuvoista särmäykseen liittyvissä asioissa, sekä TkL Timo Kaupille opinnäytetyön ohjauksesta.

Kemissä 15.5.2016

Toni Teräs

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan ultralujien terästen kuumasärmäämistä. Kappaleiden esikuumennuksella pyritään yleisesti parantamaan materiaalin särmättävyyttä.

Aihe työhön on saatu SSAB Europe Oy:n Raahen terästehtaalta, joka on erikoistunut muun muassa ultralujien terästen valmistamiseen. Tutkimus on jatkoa tuotantotekniikan suuntaavan projektin sekä Erikoistyö-kurssilla tehtyihin särmäykseen.

SSAB:n kiinnostuksen aihetta kohtaan herätti asiakkaalta saatu tieto, jonka mukaan esikuumennettu kappale olisi hajonnut särmättäessä, kun taas parikymmentä minuuttia myöhemmin särmätty, jäähtynyt kappale, olisi särmäytynyt moitteetta. Samankaltaisia tuloksia saatiin myös Erikoistyö-kurssilla tehdyissä kokeissa, missä kaksi kuumana, poikittain valssaussuuntaan nähden särmättyä näytettä hajosi. Erikoista särmäyksissä oli myös se, ettei vastaavaa tapahtunut pitkittäin särmätyissä näytteissä, mitä yleisesti pidetään kriittisempänä särmäys-suuntana. Huomionarvoista särmäysongelmissa tosin on se, että särmäykset on suoritettu huomattavasti tehtaan lupaamia minimitaivutussäteitä pienemmillä arvoilla.

Työn tilaaja pitää mahdollisena, että dynaaminen myötövanheneminen aiheuttaa materiaalille kuvatus kaltaiset ongelmat.

Työn tarkoituksena on tutkia esikuumennuksen vaikutusta teräksen ominaisuuksiin. Tähän liittyen tavoitteena on:

1. selvittää vaikuttaako esikuumennus särmättävyyteen heikentävästi
2. selvittää onko ainevahvuudella vaikutusta särmättävyyteen.

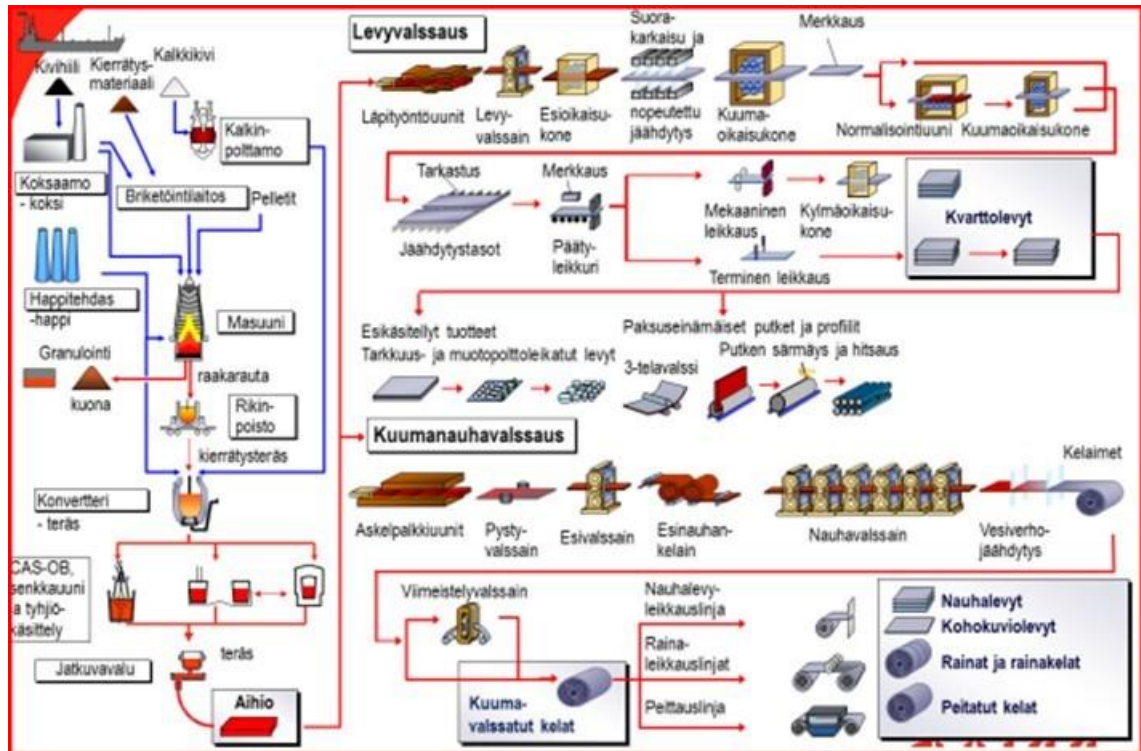
Työ rajataan 24 särmättävään näytteeseen. Tuloksista riippuen myös lisäsärmäykset ovat mahdollisia. Näytteille tehdään silmämääräinen arviointi, ilman optisia mittavälineitä.

2 SSAB

SSAB on maailmanlaajuisesti toimiva teräsyhtiö, joka on maailmanmarkkinoiden johtava tuottaja karkaistuuissa ja päästetyissä teräksissä, nauha-, kvarttolevy- ja putkituotteissa sekä rakentamisen ratkaisuuissa. SSAB:n Suomessa, Ruotsissa ja Yhdysvalloissa sijaitsevien tuotantolaitosten yhteenlaskettu vuotuinen teräksen tuotantomäärä on noin 8,8 miljoonaa tonnia. Konsernilla on noin 16 000 työntekijää 50 eri maassa. SSAB koostuu kolmesta teräsdivisioonasta: SSAB Special Steels, SSAB Europe ja SSAB Americas sekä kahdesta tytäryhtiöstä: Tibnor ja Ruukki Construction. SSAB:n pääkonttori sijaitsee Tukholmassa, ja sen osakkeet noteerataan Nasdaq OMX Tukholman pörssissä sekä toissijaisesti Helsingin pörssissä. (SSAB 2016.)

SSAB Europe on erittäin korkealaatuisten nauha-, kvarttolevy- ja putkituotteiden johtava valmistaja, ja se keskittyy toiminnassaan etenkin kotimarkkinoilleen Pohjoismaihin, Pohjois-Eurooppaan sekä Itä-Euroopan kasvualueisiin. Sen tärkeimmät tuotantolaitokset sijaitsevat Suomessa Raahessa ja Hämeenlinnassa, sekä Ruotsissa Luulajassa ja Borlängessä. SSAB European työntekijämäärä on noin 7300 henkilöä sekä liikevaihto 36 % koko konsernin kokonaisliikevaihdosta. Vuonna 2014 SSAB osti Rautaruukki Oyj:n, ja ne fuusioituivat nykyiseksi SSAB:ksi. (SSAB 2016.)

Raahen terästehdas työllistää noin 2700 henkilöä ja onkin yksi Suomen suurimmista tuotantolaitoksista. Tehtaalla valmistetaan kuumavalssattuja nauha- ja levytuotteita. Muihin tehtaan tarjoamiin palveluihin kuuluvat: kelan rainaleikkaus, nauhalevyleikkaus, peittäus sekä levykomponentit. Kuvassa 1 nähdään tehtaan prosessikaavio valmistus- sekä jatkojalostusprosesseineen. (SSAB 2016.)



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

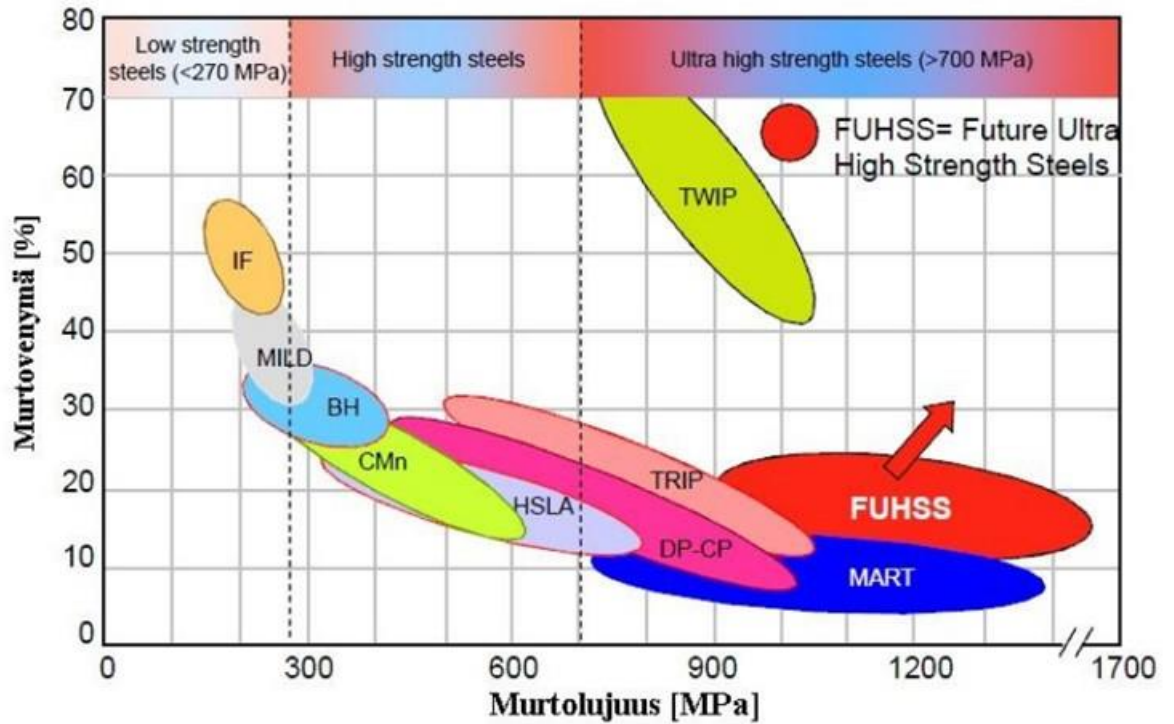
3 ULTRALUJA TERÄS

Ultralujien terästen kehitystä on vauhdittanut asiakkaiden sekä rakennesuunnittelijoiden vaatimus entistä lujemmista sekä keveämmistä teräsrakenteista. Materiaalin myötölujuuden kohotessa voidaan käyttää ohuempia ainevahvuuksia, ja näin ollen suunnitella kevyempiä ja edullisempia rakenteita.

3.1 Ominaisuudet

Ultralujien terästen korkeat kovuus- ja lujuusarvot saadaan aikaan tarkoin suunnitelluilla seostuksilla sekä lämpökäsittelyillä. Teräkset karkaistaan hehkuttamalla niitä austeniittialueella noin 900 °C:een lämpötilassa ja tämän jälkeen sammuttamalla huoneenlämpöön vedessä tai öljyssä. Karkaisulla materiaaliin pyritään aikaansaamaan martensiittinen mikrorakenne.

Myötölujuuden ylittäessä perinteisten terästen, kuten S235- ja S355-terästen, mutta alittaessa kuitenkin 500 MPa:n rajan, käytetään niistä yleisesti nimitystä korkealujuusteräs (HSS). Ultraluja teräs (UHSS)-nimitystä käytetään yleensä myötölujuuden ollessa yli 500 MPa. Tämän kaltaiset teräkset ovat ns. erikoisteräksiä, joihin kuuluvat muun muassa kulutus- ja suojausteräkset. Kuvassa 2 nähdään vertailua eri teräsluokkien välillä.



Kuva 2. Terästen lujuusluokkia (Lämsä & Kiuru 2012, 5)

Nykyään ultralujien rakenneterästen ja kulutusterästen erot ovat melko pieniä. Molemmat ovat mekaanisilta ominaisuuksiltaan hyvin samankaltaisia; omaavat suuren lujuuden sekä kovuuden, mutta toisaalta ovat myös melko hyvin kylmämuovattavia kuten esimerkiksi särmättäviä. Jokaiselle Raahen tehtailta lähtevälle tuote-erälle tehdään standardissa SFS-EN 7438 määritelty taivutuskoe.

Koneistettaessa ultralujia teräksiä on kiinnitettävä tavallista enemmän huomiota työstökoneen jäykkyyteen ja kappaleiden sekä työkalujen mahdollisimman tukevaan kiinnittämiseen, jotta haitallisilta värinöiltä vältyttäisiin.

3.2 Käyttökohteet

Ultralujien rakenneterästen ominaisuuksista, kuten suuresta lujuudesta, kovuudesta sekä hyvästä muovattavuudesta johtuen niitä käytetään runsaasti kohteissa joissa vaaditaan:

- keveyttä (pieni omapaino)
- vähentynyttä iskujen vaikutusta rakenteisiin
- lujaa, mutta helposti hitsattavaa materiaalia
- kovuutta (kulumiskestävyys).

Tämän kaltaisia ominaisuuksia hyödynnetäänkin mm. autoteollisuudessa keveyttä ja lujuutta vaativiin korirakenteisiin, sekä erikoistapauksissa ballistiseen suojaukseen. Hyötyajoneuvoissa, kuten nostureissa ja kuorma-autoissa, ultralujia teräksiä käytetään puomien tai päällirakenteiden rakennusmateriaalina, nostokorkeuden tai hyötykuorman lisäämiseen.

Kaivosolosuhteissa materiaalia sijoitetaan kohteisiin, joissa vaaditaan kulumiskestävyyttä, kuten kuormaajien huulilevyihin ja kauhoihin, kuormureiden lavoihin sekä erilaisiin suppiloihin ja murskaimiin. Teräsrakentamisessa ultralujia teräksiä käyttämällä voidaan säästää jopa kymmeniä prosentteja materiaalikustannuksissa pienentyneen omamassan kautta. Kuvassa 3 nähdään ultralujien terästen yleisimpiä käyttökohteita.



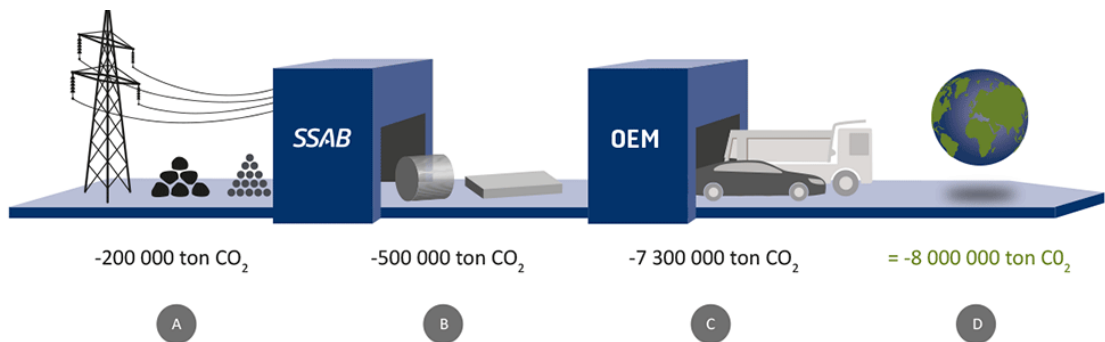
Kuva 3. Ultralujien terästen käyttökohteita (SSAB 2016)

3.3 Erikoislujien terästen ympäristöedut

Esimerkissä havainnollistetaan kuvitteellista tapausta, jossa ajoneuvojen valmistukseen käytetty 1,3 miljoonaa tonnia terästä korvataan miljoonalla tonnilla erikoislujaa terästä (ks. kuva 4). (SSAB 2016.)

Kuvan merkintöjen mukaan:

- Kun teräksen tuotannon tarve vähenee 300 000 tonnilla, alkupään toimittajien hiilidioksidipäästöt pienentyvät 200 000 tonnilla, koska tarvittavan energian ja raaka-aineiden määrä vähenee.
- Kun terästä tuotetaan 300 000 tonnia vähemmän, aiheuttaa SSAB:n terästuotanto 500 000 tonnia vähemmän hiilidioksidipäästöjä.
- Jos Euroopan nykyinen ajoneuvokanta päivitetäisiin, hiilidioksidipäästöt pienenevät 7,3 miljoonalla tonnilla.
- Tässä kuvitteellisessä tapauksessa hiilidioksidipäästöt vähenevät kokonaisuudessaan noin 8 miljoonalla tonnilla. (SSAB 2016.)

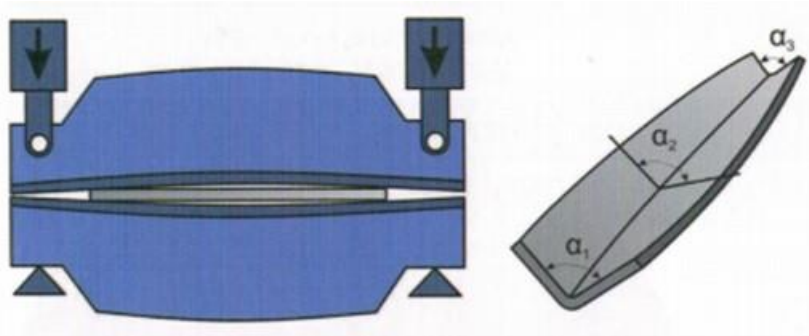


Kuva 4. Päästöjen pienentyminen tuotantoketjussa (SSAB 2016)

4 SÄRMÄYS- JA TAIVUTUSMENETELMÄT

Särmääminen ja taivuttaminen ovat yksi konepajojen käytetyimmistä valmistusmenetelmistä, sillä yleisesti levymateriaali vaatii jonkinlaista muokkaamista kohteen vaatimuksista riippuen. Muokatessa levyn muoto muuttuu, mutta paksuus säilyy lähes vakiona. Isoimmat muutokset tapahtuvatkin lähinnä raaka-aineen mittamuutoksina poikittain särmään nähden. Pysyvään, eli plastiseen muodonmuutokseen pyrittäessä, on muokattavan materiaalin myötöraja ylitettävä, jolloin se ei enää palaudu takaisin entiseen tilaansa vaan jää haluttuun muotoon. Särmäyksellä ja taivuttamisella kappaleeseen saadaan lisää jäykkyyttä ja näin ollen kappaletta voidaan keventää pienentämällä ainevahvuutta. (Lepola & Makkonen 2005.)

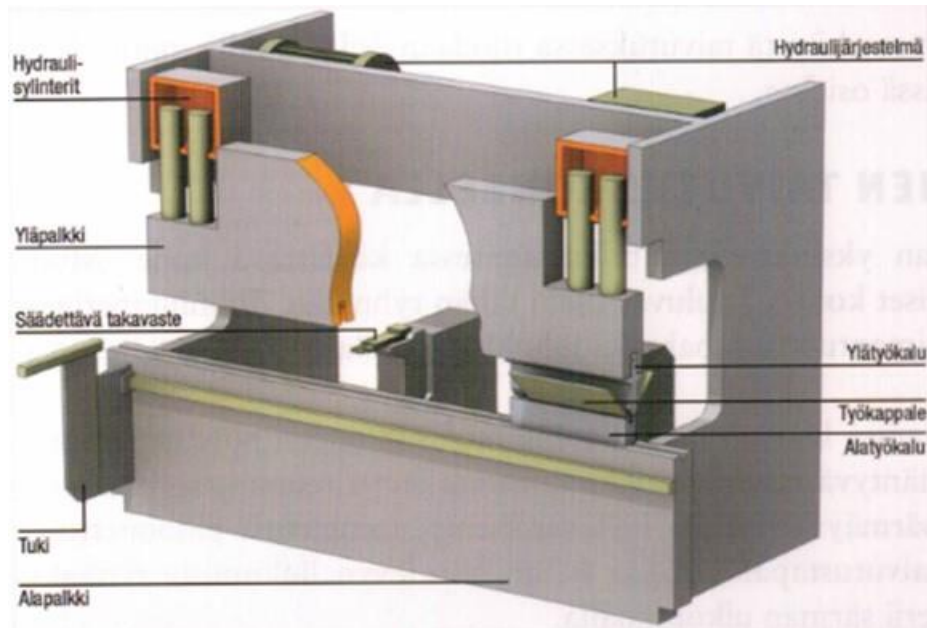
Onnistuneen lopputuloksen varmistamiseksi särmäyksessä täytyy hallita taivutusvoima, takaisinjousto, muokatun aihion mittamuutokset sekä särmän säilyminen murtumatta taivutuksen jälkeen. Suunnitteluvaiheessa taivutusvoimaan voidaan vaikuttaa oikean särmäyspituuden sekä materiaalin ainevahvuuden ja vetomurtolujuuden valinnalla. Vaadittuun särmäysvoimaan vaikuttavat myös käytetyt työkalut sekä taivutuskulma. Jo suunnitteluvaiheessa v-aukon leveys huomioidulla voidaan myös vaikuttaa työkaluvalintoihin sekä taivutuskulmaan. Erityispiirteenä särmäyksessä muihin taivutusmenetelmiin verrattuna voidaan mainita ns. veneilmiö. Ilmiössä taivutuskulma kappaleen särmän keskiosassa jää hieman vajaaksi särmäyspuristimen palkkien taivutuksenaikaisen taipumisen vuoksi. Kuvassa 5 nähdään veneilmiön periaate. (Matilainen, Parviainen, Havas, Hiitelä & Hultin 2011.)



Kuva 5. Periaatekuva veneilmiöstä (Matilainen ym. 2011, 244)

4.1 Särmäyspuristin

Särmääminen suoritetaan särmäyspuristimeksi kutsutulla koneella. Niitä on saatavilla erikokoisia ja -tehoisia, käyttötarkoituksesta riippuen. Koneiden työleveydet voivat vaihdella metristä jopa kymmenen metrin levyisiin koneisiin saakka, yleisimmät konepajoilla käytetyistä laitteista ovat 2-4 metriä leveitä. Leveys ilmoitetaan yleensä työkalupalkin leveyden mukaan ja nimellisleveys on tavallisesti muutamia kymmeniä millimetrejä yli tasaluvun, kuten 2040 mm. Nimellisleveydestä voidaan suoraan päätellä pisimmän mahdollisen taivutuksen pituus. Tarvittaessa koneita voidaan liittää myös sarjaan, jolloin särmäyspituus voi moninkertaistua. Särmäyspuristimien puristusvoimat voivat vaihdella välillä 100–25 000 kN. Särmäyksessä vaadittu puristusvoima riippuu särmättävän kappaleen materiaalista, paksuudesta sekä särmäyspituudesta. Särmäyspuristimen rakenne on esitetty kuvassa 6. (Matilainen ym. 2011.)



Kuva 6. Särmäyspuristimen rakenne (Matilainen ym. 2011, 240)

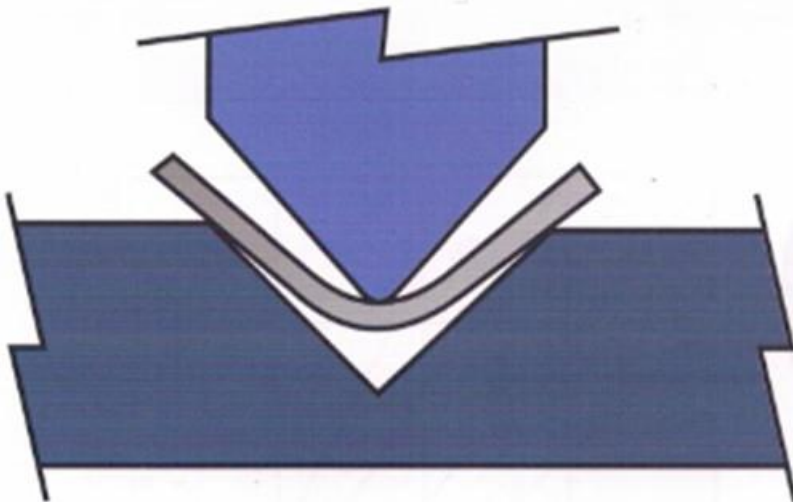
Särmäyspuristin on yksi ohutlevyteollisuuden yleisimmistä koneista. Sen toiminta voi olla toteutettu hydraulisesti, pneumaattisesti tai mekaanisesti. Suuritehoisimmat koneet ovat hydraulisia. Pneumaattisesti toimivat koneet ovat hyvin harvinaisia. Hydraulisessa särmäyspuristimessa hydraulisylinterit on sijoitettu yleensä yläpalkin päihin. Tämä mahdollistaa yläpalkin työskun syvyyden säätämisen, sekä voiman jakaantumisen melko tasaisesti koko palkin pituudelle. Tarkkaliikkeisten särmäyspuristimien toiminta on toteutettu servomoottoreiden avulla. (Matilainen ym. 2011.)

4.2 Yleisimmin käytetyt särmäysmenetelmät

Särmäys suoritetaan yleensä vapaataivutuksena tai pohjaaniskutaivutuksena. Toisinaan haluttu muoto saadaan toteutettua elastista vastinta käyttämällä. Litistykset, joissa kappaleen reuna taitetaan kokonaan levyn päälle, tehdään omilla litistystyökaluillaan. Särmäyksessä kappaleeseen tehtävän taivutuksen suunta on vapaa, mikä poikkeaa monista muista taivutusmenetelmistä. Levyn reuna voidaan taivuttaa ylös- tai alaspäin. (Matilainen ym. 2011.)

4.2.1 Vapaataivutus

Vapaataivutuksessa levyä taivutetaan kolmipistetaivutuksena alatyökalun v-aukon reunojen ja ylätyökalun suhteen. Oleellista vapaataivutuksessa on, että liike pysäytetään ennen kuin särmättävä kappale osuu alatyökalun pohjaan. Tavoiteltavaa kulmaa voidaan muuttaa säätämällä ylätyökalun iskun pituutta. Tämän vuoksi vapaataivutuksessa käytetään yleensä työkaluja, joiden kulmat ovat alle 90°. Menetelmän etuna on se, että työkalun muoto ei vaikuta levyyn syntyvään muotoon. Särmätyn kappaleen geometria riippuu työkalujen keskinäisestä etäisyydestä, materiaalin lujuusominaisuuksista sekä levyn ainevahvuudesta. Yleisimmin käytettyjen työkalujen muodot ovat yksinkertaisia ja prosessi on helppo automatisoida. Vapaataivutuksen periaate on esitetty kuvassa 7. (Matilainen ym. 2011.)

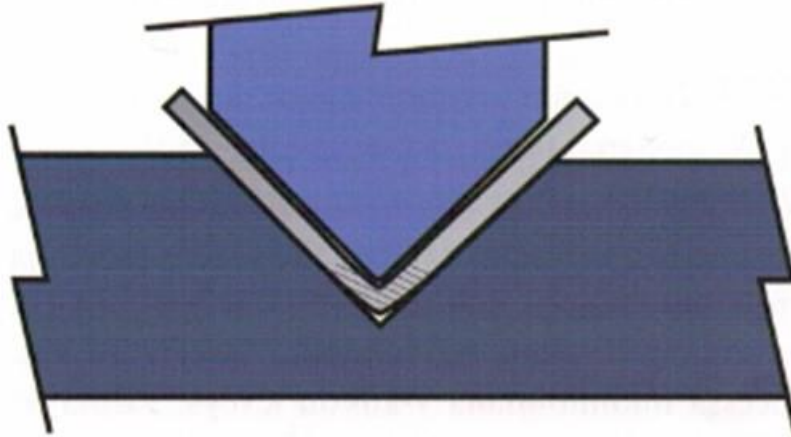


Kuva 7. Vapaataivutuksen periaate (Matilainen ym. 2011, 241)

4.2.2 Pohjaaniskutaivutus

Pohjaaniskutaivutuksessa iskun pituus on säädetty siten, että ylätyökalu painuu täysin alatyökalua vasten ja välissä oleva levy muotoutuu tarkasti ala- ja ylätyökalun muotojen mukaisesti. Pohjaaniskutaivutus vaatii jopa 3-5 kertaisen puristusvoiman vapaataivutukseen verrattuna. Menetelmällä voidaan aikaansaada pysyvä muodonmuutos, joka saattaa onnistuessaan poistaa takaisinjouston lähes täydellisesti. Pohjaaniskutaivutuksella pyritään hyvin tarkkaan ja jäykkään

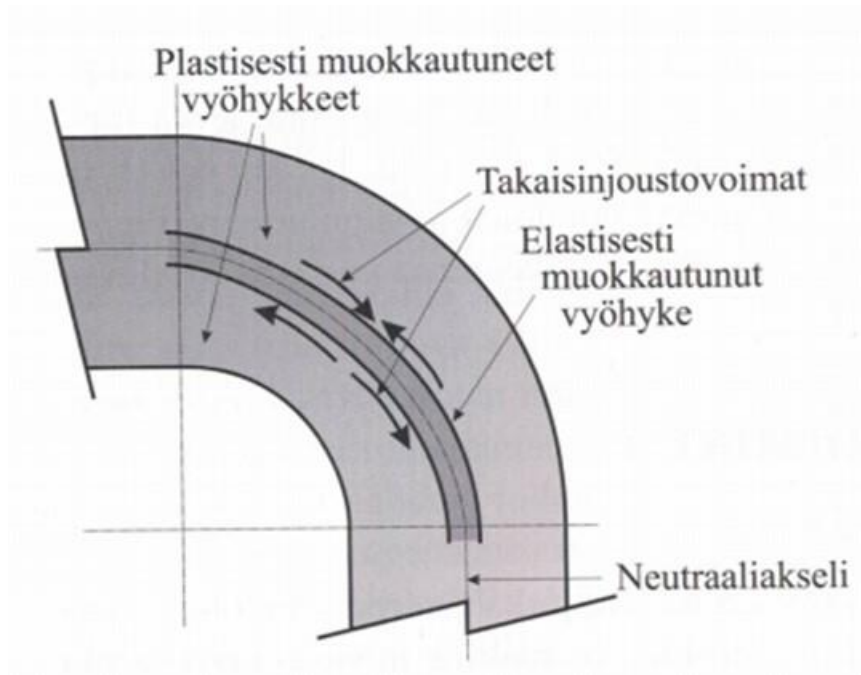
muotoon. Pohjaaniskutaivutuksen suuren voimantarpeen ja työkalujen korostuneen mittatarkkuuden vuoksi, suositellaan sitä käytettäväksi vain alle 2 mm:n ainevahvuuksille. Myös taivutettavien osien sarjasuuruus täytyy olla riittävä. Pohjaaniskutaivutuksessa oikeanlevyisen v-aukon valinta on erittäin tärkeää, sillä takaisinjoustokulma saattaa olla negatiivinenkin. Pohjaaniskutaivutuksen periaate on esitetty kuvassa 8. (Matilainen ym. 2011.)



Kuva 8. Pohjaaniskutaivutuksen periaate (Matilainen ym. 2011, 241)

4.3 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 usein vain elastista muodonmuutosta. 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 takaisinjoustoja, mutta ilmiö tapahtuu aina riippumatta kappaleen geometriasta. Takaisinjouston syntyyn vaikuttavat muodonmuutosvyöhykkeet on esitetty kuvassa 9. (Matilainen ym. 2011.)

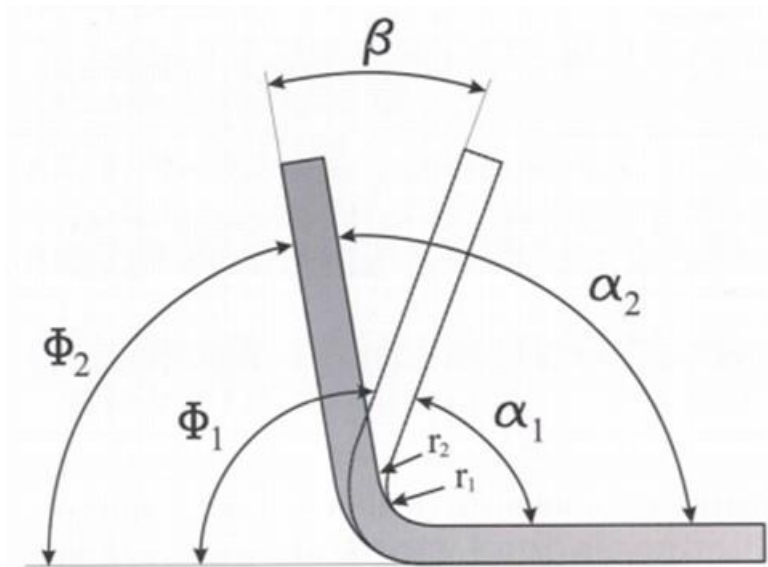


Kuva 9. Kappaleeseen syntyvät muodonmuutosvyöhykkeet (Matilainen ym. 2011, 246)

Takaisinjouston suuruutta on vaikea ennalta-arvioida. Siihen vaikuttavat ainakin:

- taivutettavan levyn mekaaniset ominaisuudet
- levyn geometria, kuten paksuus ja taivutussäde
- käytettävät työkalut
- koneen ominaisuudet.

Koska takaisinjouston arvioiminen on hankalaa, tehdään yleensä koetaivutus ennen varsinaisen kappaleen taivutusta. Koetaivutuksessa levy taivutetaan haluttuun kulmaan, jonka jälkeen se mitataan. Mittauksesta selviää, kuinka paljon taivutuskulma jää alle halutun kulman. Kulmien erotuksesta saadaan selville takaisinjouston suuruus. Tämän avulla varsinaiselle työkappaleelle voidaan suorittaa ns. ylitaivutus, jolloin kulma saadaan vaaditun suuruiseksi. Kuvassa 10 esitetään takaisinjoustoon ja taivutukseen liittyviä suureita.



Kuva 10. Takaisinjoustoon ja taivutukseen liittyvät suureet (Matilainen ym. 2011, 247)

Kuvassa 10 esitettyjen suureiden selitykset:

α_1 = taivutuskulma taivutuksessa

α_2 = taivutuskulma taivutuksen jälkeen

β = takaisinjoustokulma

Φ_1 = kaarikulma taivutuksessa

Φ_2 = kaarikulma taivutuksen jälkeen.

4.4 Taivutusvoima

Materiaalille käytettävän puristusvoiman tarvetta voidaan yleisesti arvioida murtolujuuden avulla. Helposti muovattavien terästen puristusvoimantarve saattaa olla jopa kymmeniä prosentteja pienempi kuin saman lujuusluokan teräksen. Tästä syystä voimantarpeen laskemiseen on kehitetty yhtälö, joka yleisimmin on muodossa:

$$F = C \times \frac{R_m \times b \times s^2}{V} \quad (1)$$

F = tarvittava puristusvoima (N)

C = vakio, esimerkiksi SSAB:n karkaistuilla ja ultralujilla teräksillä $\approx 1,6 - 1,8$, sekä tavallisilla rakenneteräksillä $\approx 1,2 - 1,5$

R_m = levyn murtolujuus N/mm² (MPa)

b = taivutettava pituus mm

s = levyn paksuus mm

V = V-aukon leveys mm.

(Matilainen ym. 2011.)

Yleisesti suositellaan, että kappaleet esikuumennetaan 100–200 °C lämpötilaan ennen särmäämistä. Kuumentaminen parantaa materiaalin särmättävyyttä sekä vähentää taivutusvoiman tarvetta. Työssä tutkittavien 550 HBW-terästen kohdalla on kuitenkin havaittu, että tulos voi olla jopa päinvastainen. Työn tilaaja pitää mahdollisena että dynaaminen myötövanheneminen aiheuttaa ilmiön.

Metallien muokattavuus perustuu dislokaatioiden liikkeeseen. Liuenneet atomit lukittavat dislokaatioita, näin ollen dislokaatioiden liikkeeseen vaadittava kuormitus kasvaa. Vanhenemisen seurauksena metalleissa havaitaan tavallisesti myötörajan korostumista sekä lisääntyneitä kovuutta. Metallien vanhenemisprosessi on hidasta huoneenlämpötilassa, mutta huomattavasti nopeampaa korkeissa

lämpötiloissa. Liuenneita atomeja sisältävässä seoksessa esiintyessään vanhenemisprosessi voi aiheuttaa dislokaatioiden nopeaa lukittumista venymän aikana. Ilmiötä kutsutaan yleisesti dynaamiseksi myötövanhenemiseksi (DSA, Dynamic Strain Aging). (Ivanchenko 2010.)

Teräksen vuoroittainen lukittuminen ja pehmeneminen ilmenevät useimmiten jännitys-venymäkäyrien sahalaitaisena plastisena muodonmuutoksena. Ilmiö voi johtaa muodonmuutoksen paikallistumiseen, mikä helpottaa säröjen ydintymistä ja siten pienentää teräksen väsymisikää. (Apajalahti 2014, 7.)

5 KOEMATERIAALIT JA MENETELMÄT

5.1 Koemateriaalit

Särmäyskokeissa tutkittiin kovuusluokan 550 HBW-terästä, sekä lisäksi verrokina särmättiin neljä näytettä 600 HBW-teräksestä. Valmistajan pyynnöstä johdettujen materiaaleista ei käytetty niiden oikeita myynti- tai tuotenimiä. Tutkittavat teräkset olivat ns. ultralujia teräksiä ja niistä käytettiin kirjainmerkintöjä A, B ja C, joista A ja B edustivat 550 HBW-teräksen kahta eri ainevahvuutta ($t = 5$ ja 6 mm), ja merkintä C puolestaan 600 HBW-terästä ($t = 6$ mm).

Näytteet, lukuun ottamatta C-terästä, saapuivat tehtaalta valmiiksi leikattuina ja niihin oli merkitty valssaussuunta, kelanumero sekä materiaalimerkintä. Jokaiseen näytteeseen merkittiin lisäksi materiaalikohtainen kirjainmerkintä sekä juokseva numero ykkösestä alkaen (esim. A12). Merkinnällä pyrittiin helpottamaan näytteiden tunnistamista sekä välttämään niiden sekoittuminen keskenään. Näin varmistettiin myös tulosten jäljitettävyys.

5.1.1 Teräkset A ja B

Teräkset A ja B olivat mikrorakenteeltaan martensiittisiä ultralujia teräksiä. Ne ovat suorasammutettuja suuren kovuuden ja lujuuden takaamiseksi. Korkeista kovuus- ja lujuusarvoista huolimatta ne omaavat hyvät leikkaus-, särmäys- ja hitsausominaisuudet. Materiaalin tyypillinen kemiallinen koostumus on annettu taulukossa 1 ja mekaaniset ominaisuudet taulukossa 2.

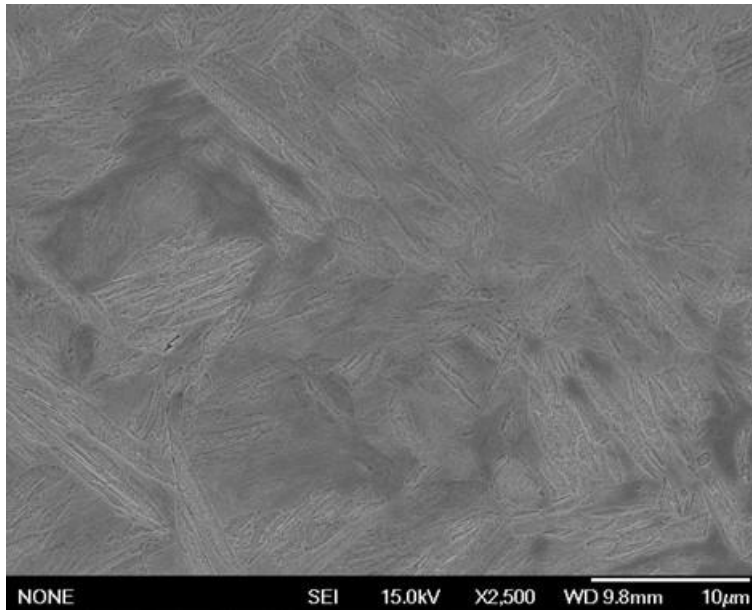
Taulukko 1. Teräksien A ja B ohjeellinen kemiallinen koostumus (SSAB 2015)

MARTENSIITTINEN 550 HBW-TERÄS KEMIALLINEN KOOSTUMUS								
C (max %)	Si (max %)	Mn (max %)	P (max %)	S (max %)	Cr (max %)	Ni (max %)	Mo (max %)	B (max %)
0.36	0.70	<1.50	0.015	0.010	1.50	2.50	0.8	0.005

Taulukko 2. Teräksien A ja B mekaaniset ominaisuudet (SSAB 2015)

MARTENSIITTINEN 550 HBW-TERÄS MEKAANISET OMINAISUUDET				
Paksuus (mm)	Kovuus (HBW)	Myötölujuus $R_{p0,2}$ (Mpa)	Murtolujuus R_m (Mpa)	Iskusitkeys Charpy-V -40°C (J)
3.0-15.0	540-600	1550	1850	16

Kuvassa 11 nähdään teräksien A ja B kovaa ja lujaa martensiittista mikrorakennetta pyyhkäisyelektronimikroskoopilla (SEM) otetussa SEI - kuvassa.



Kuva 11. Teräksien A ja B martensiittinen mikrorakenne (Kesti, 2016)

5.1.2 Teräs C

Teräs C oli mikrorakenteeltaan martensiittinen suorasammutettu ultraluja teräs. Karkaisun lisäksi materiaalille oli myös tehty päästö, jolla saavutettiin tasaisempi mikrorakenne. Mekaanisilta ominaisuuksiltaan materiaali on erittäin lujaa ja kovaa. Matalasta hiilipitoisuudesta johtuen se on myös melko helposti hitsattavaa sekä omaa hyvän särmättävyyden. Materiaalin tyypillinen kemiallinen koostumus on annettu taulukossa 3 ja mekaaniset ominaisuudet taulukossa 4.

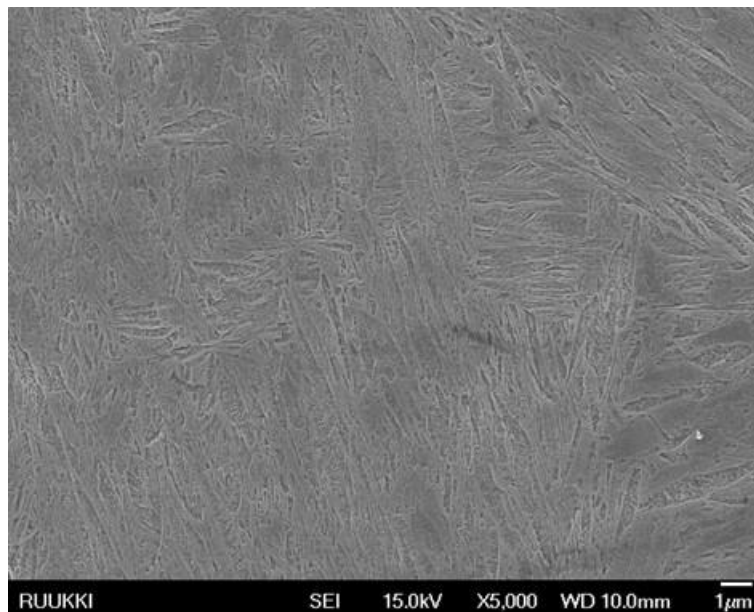
Taulukko 3. Teräksen C ohjeellinen kemiallinen koostumus (SSAB 2015)

MARTENSIITTINEN 600 HBW-TERÄS KEMIALLINEN KOOSTUMUS								
C (max %)	Si (max %)	Mn (max %)	P (max %)	S (max %)	Cr (max %)	Ni (max %)	Mo (max %)	B (max %)
0.47	0.7	1	0.01	0.005	1.50	3.00	0.7	0.005

Taulukko 4. Teräksen C mekaaniset ominaisuudet (SSAB 2015)

MARTENSIITTINEN 600 HBW-TERÄS MEKAANISET OMINAISUUDET					
Paksuus (mm)	Kovuus (HBW/HRC)	Myötölu- juus $R_{p0,2}$ (Mpa)	Murtolu- juus R_m (Mpa)	Murtovenymä A_5 %	Iskusitkeys Charpy-V -40 °C (J)
4.0-20.0	570-640	Tyyp. 1500	Tyyp. 2000	Tyyp. 7	Min. 12, tyyp. 25

Kuvassa 12 nähdään teräksen C päästettyä martensiittista mikrorakennetta pyyhkäisyelektronimikroskoopilla (SEM) otetussa SEI - kuvassa.



Kuva 12. Teräksen C martensiittinen mikrorakenne (Kesti, 2016)

5.2 Tehdyt särmäyskokeet

Taulukossa 5 on annettu A- ja B-terästen koematriisi ilman niille tehtyjä lisäsärmäyksiä. Ainevahvuudeltaan $t = 5$ mm (teräs A) olevat näytteet olivat kooltaan 295 mm x 295 mm, ja $t = 6$ mm (teräs B) näytteet 260 mm x 290 mm sekä 280 mm x 280 mm. Levyt olivat pohjamaalaamattomia.

Kokeita tehtiin valmistajan taivutussäteen suositusarvolla $6 \times t$, sekä lähes puolta pienemmällä arvolla $n. 3 \times t$. Särmäyksiä tehtiin pitkittäin- ja poikittain valssausuuntaan nähden. Yhteensä särmättiin 24 näytettä. Särmäykset tehtiin ammatiopisto Lappian Aliko 220-3000-laitteistolla ja niissä käytettiin 80- ja 100 mm:n vaukkoa.

Suurin osa näytteistä (20 kpl) kuumennettiin happi-asetyleenipolttimella 150–200°C lämpötilaan. Osan kuumennetuista kappaleista (8 kpl) annettiin jäähtyä n. 25 minuuttia ennen särmäämistä. Lämpötilaa ja lämmön jakautumista seurattiin lämpökameralla, jolla myös tallennettiin 10 sekunnin välein lämpökuva särmättävästä näytteestä.

Taulukko 5. Terästen A ja B koematriisi

MARTENSIITTINEN 550 HBW-TERÄS						
T	R	V	Kuumennus	Jäähdytys	Särmäyssuunta	Toistoja
5	30	100	150–200 °C	-	PI	1
5	30	100	150–200 °C	-	PO	1
5	30	100	150–200 °C	25 min	PI	1
5	30	100	150–200 °C	25 min	PO	1
5	16	80	150–200 °C	-	PI	2
5	16	80	150–200 °C	-	PO	2
5	16	80	150–200 °C	25 min	PI	1
5	16	80	150–200 °C	25 min	PO	1
5	16	80	-	-	PI	1
5	16	80	-	-	PO	1
6	36	100	150–200 °C	-	PI	1
6	36	100	150–200 °C	-	PO	1
6	36	100	150–200 °C	25 min	PI	1
6	36	100	150–200 °C	25 min	PO	1
6	20	80	150–200 °C	-	PI	2
6	20	80	150–200 °C	-	PO	2
6	20	80	150–200 °C	25 min	PI	1
6	20	80	150–200 °C	25 min	PO	1

6	20	80	-	-	PI	1
6	20	80	-	-	PO	1
						24

5.3 Lisäsärmäykset

Särmäyskokeiden tuloksista johtuen tehtiin myös lisäsärmäyksiä. Lisäsärmäyksissä esikuumennuksen lämpötilaa laskettiin (verrattuna koematriisissa käytettyihin lämpötiloihin). Tällä pyrittiin löytämään lämpötila-alueet, joilla näytteiden rikoontumista tai särmävaurioita ei enää esiintyisi. Kappaleet särmättiin joko esikuumennettuna tai kuumentamattomana. Yhtään näytettä ei erikseen jäähdytetty ennen testausta kuten aiemmissa särmäyksissä. Särmäyksiä tehtiin valssausuuntaan nähden pitkittäin sekä poikittain. Yhteensä särmättiin 29 näytettä.

Lisäsärmäyskokeisiin käyttöön saatiin nestekaasupoltin jolla kappaleet kuumentettiin. Myös näissä kokeissa kuumentetut kappaleet kuvattiin lämpökameralla ja kuvat tallennettiin 10 sekunnin välein. Taulukossa 6 on annettu terästen A ja B lisäsärmäysmatriisi.

Taulukko 6. Terästen A ja B lisäsärmäysmatriisi

MARTENSIITTINEN 550 HBW-TERÄS						
T	R	V	Kuumennus	Jäähdytys	Särmäyssuunta	Toistoja
5	16	100	130–160 °C	-	PI	2
5	16	100	130–160 °C	-	PO	2
5	16	100	100–130 °C	-	PI	2
5	16	100	100–130 °C	-	PO	2
5	16	100	70–100 °C	-	PI	2
5	16	100	70–100 °C	-	PO	2
5	16	100	40–70 °C	-	PI	2
5	16	100	40–70 °C	-	PO	2
5	16	100	-	-	PI	2
5	16	100	-	-	PO	2
6	20	100	100–130 °C	-	PI	2
6	20	100	100–130 °C	-	PO	2
6	20	100	70–100 °C	-	PI	2
6	20	100	70–100 °C	-	PO	2
6	20	100	-	-	PI	1
						29

Lisäsärmäyksissä käytettiin 100 mm:n v-aukkoa, sillä ne tehtiin Lapin ammatti-korkeakoulun ASM TKI-ryhmän särmäyskokeissa käytettävällä 6000 tonnin hydraulisella puristimella Torniossa. Laitteen alatyökalua ei voinut säätää alle 100 mm:n leveydelle, joten aiemmissa särmäyksissä käytettyyn 80 mm:n leveyteen ei päästy.

C-teräksen särmäykset sisällytettiin lisäsärmäyksiin, sillä ne eivät kuuluneet alkuperäiseen koematriisiin. Näytteet saatiin toisen insinööriyön koemateriaaleista. Särmäyksillä pyrittiin selvittämään vaikuttaako esikuumentaminen tämän materiaalin särmättävyyteen heikentävästi. Poikkeuksena A- ja B-terästen särmäyksiin, testeissä ei käytetty taivutussäteenä valmistajan suosittelemaa 8 x t sisäsädettä pienempiä ylätyökaluja.

Näytteet leikattiin Finnpower Lp5e-levytyökeskuksen laserleikkurilla ja niihin merkittiin valssaussuunta arkissa olleen valssaussuunnan mukaisesti. Leikatut kappaleet olivat kooltaan n. 300 mm x 300 mm, ja ne olivat pohjamaalattuja, mikä on materiaalin yleisin toimitustila. Taulukossa 7 on annettu C - teräkselle tehdyt särmäykset.

600 HBW-teräkset kuumennettiin alkuperäisen särmäysmatriisin mukaiseen lämpötilaan, eli n. 150–200°C. Kuumennettuja näytteitä ei jäähdytetty ennen särmäämistä. Yhteensä särmättiin neljä näytettä.

Taulukko 7. Koeteräksen C särmäysmatriisi

MARTENSIITTINEN 600 HBW-TERÄS						
T	R	V	Kuumennus	Jäähdytys	Särmäyssuunta	Toistoja
6	48	150	150–200 °C	-	PI	1
6	48	150	150–200 °C	-	PO	1
6	48	150	-	-	PI	1
6	48	150	-	-	PO	1
						4

5.4 Särmäyskokeet

Taulukon 5 mukaiset särmäykset suoritettiin ammattiopisto Lappian, Kemin tekniikan koulutusalan Aliko 220-3000-särmäyspuristinta käyttäen. Särmäyspuristin nähdään kuvassa 13.



Kuva 13. Aliko 220–3000-särmäyspuristin

Särmäyspuristin ohjelmoitiin syöttämällä siihen särmättävän kappaleen mitat, materiaali sekä haluttu taivutuskulma. Ultralujaa terästä särmättäessä kappaleen leveyttä on korjattava todellista suuremmaksi, jotta käyttöön saadaan riittävä särmäysvoima, sillä kyseisiin materiaaleihin soveltuvia lujuusarvoja ei koneen tietokannassa ole. Särmättävän kappaleen leveydeksi syötettiin 1000 mm.

Koneen automaattisesti liikkuva takavaste ohjelmoitiin pois tieltä syöttämällä kappaleen taipeen arvoksi 1000 mm. Takavaste on käytännöllinen apuväline taivutettaessa monisärmäisiä kappaleita, mutta särmäyskokeissa, joissa levyt taivutettiin keskeltä, ei siitä olisi ollut mitään hyötyä.

Kappaleen ainevahvuus ohjelmoitiin koneeseen todellisena, lukuun ottamatta tilanteita, joissa jouduttiin käyttämään ns. fyllilevyä (ks. kuva 14). Fyllilevyä käytettiin sisäsäteen kasvattamiseen, kun soveltuvaa ylätökalua ei ollut käytettävissä. Esimerkiksi sisäsäteen arvolle $R = 16$ ei ollut sopivaa työkalua. Tällöin käytettiin R15-paininta ja lisättiin kappaleen ja painimen väliin 1 mm:n vahvuinen levy. Koneen työkalukirjastosta valittiin R15-painin ja ohjelmoitiin kappaleen ainevahvuudeksi 1 mm suurempi arvo kuin se todellisuudessa oli. Mikäli fyllilevyn ainevahvuutta ei olisi huomioitu koneen ohjelmoinnissa, olisi särmäyspuristin painanut taivutuskulman yli tavoitteen.

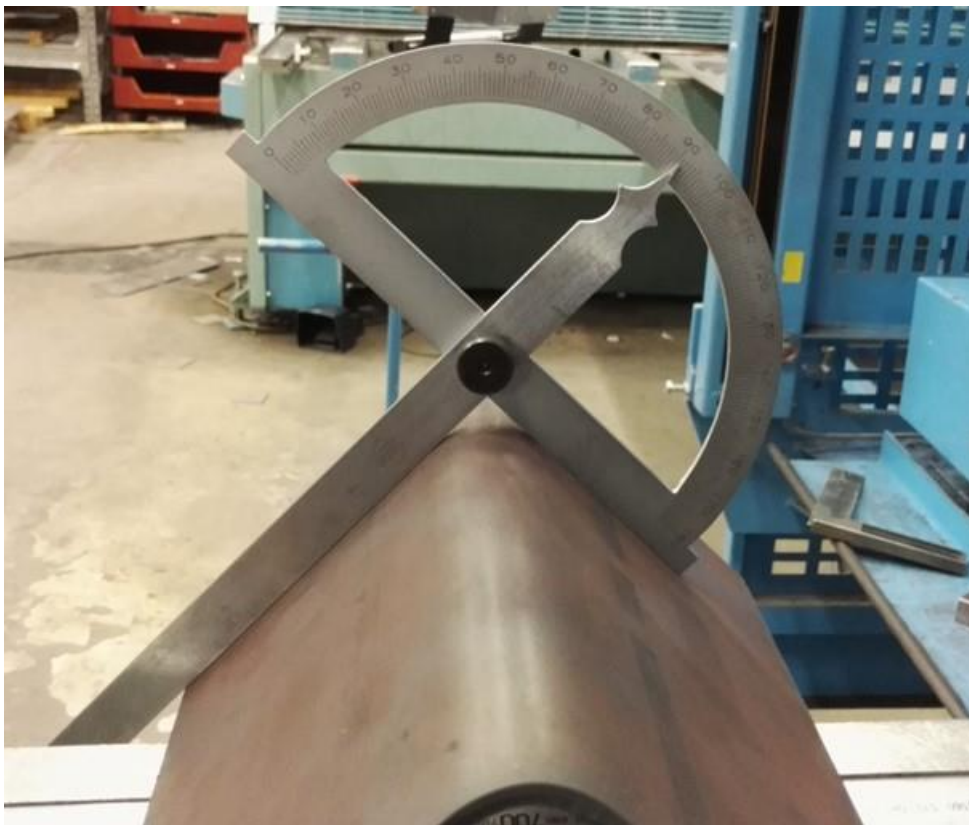
Kokeissa käytetyt alatyökalut löytyivät valmiiksi ohjelmoituina särmäyspuristimen työkalukirjastosta.



Kuva 14. Taivutussäteen kasvattaminen fyllilevyä käyttäen

Särmättyjen näytteiden taivutuskulmat mitattiin analogista astemittaa käyttäen (ks. kuva 15). Koska kaikkien särmättyjen näytteiden tavoitekulman toleranssi oli $90^\circ \pm 5^\circ$, ei tarkempia, kuten digitaalisia mittalaitteita, ollut tarvetta käyttää.

Kulmamittaus suoritettiin jokaisen särmäyksen jälkeen, jolla varmistuttiin toteutuneen taivutuskulman pysyneen toleranssialueella. Muuttuneiden särmäysparametrien, kuten ainevahvuuden ja työkalujen vaihtamisen jälkeen, on kulmanmittaus erityisen tärkeää. Särmäyspuristimen ohjelmisto arvioi takaisinjouston yleisimpien taivutettujen materiaalien, kuten perinteisten rakenneterästen mukaisesti. Näillä materiaaleilla takaisinjousto on huomattavasti pienempi kuin ultraluojilla teräksillä, joilla se saattaa olla useita kymmeniä asteita. Useimmiten jouduttiinkin särmäämään koekappale, jonka mukaan taivutusarvoja korjattiin. Esimerkiksi kun tavoitekulma oli 90° ja toteutunut kulma 96° , syötettiin särmäyksen jälkeen koneeseen toteutuneen kulman arvo. Särmäyspuristin säätää tämän arvon perusteella painosyvyyttä hiukan alemmaksi/syvemmälle. Korjauksen, eli painosyvyyden, pystyi ohjelmoimaan myös suoraan koneeseen, ilman toteutuneen kulman syöttämistä.



Kuva 15. Kulman mittaaminen analogisella astemitalla

Lisäsärmäykset suoritettiin JaloteräsStudion OLI-24-hydromuovauslaitteistolla (ks. kuva 16), sillä ammattiopisto Lappian Tietokatu 2:n toimipisteen tiloissa käynnistyneet muutostyöt eivät mahdollistaneet työn loppuun saattamista Kemissä. Laitetta käytetään varsinaisen hydromuovaamisen lisäksi myös paksujen levyjen särmäämiseen. Koneen pääsylinterin männän päässä on paikka työkalupidikkeelle, johon särmäämisessä käytettävä ylätökalu kiinnitetään. Alatyökalun v-aukon leveyttä säädettiin hydraulisyntereillä. Hydromuovaimen operoimisesta vastasi DI Raimo Ruoppa.



Kuva 16. OLI-24-hydromuovauslaitteisto

5.5 Mittauspöytäkirja

Jokaisen särmäyksen arvot ja mittaustulokset merkittiin mittauspöytäkirjaan. Siihen merkittiin seuraavat tiedot:

- särmäyspäivämäärä
- näytteen numero

- esikuumennuslämpötila
- jäähdytys
- ainevahvuus
- käytetyt työkalut sekä särmäyssäteen suhde ainevahvuuteen
- särmäyssuunta valssaussuuntaan nähden
- korjauksen suuruus sekä saavutettu kulma
- tuloksen arviointi: hyväksytty/hylätty.

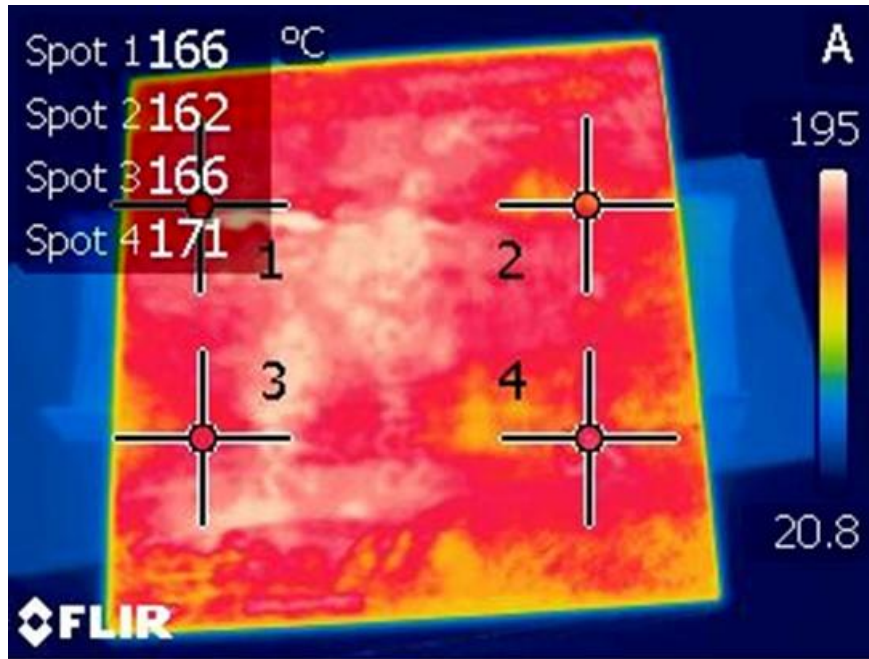
Kaikki särmäykset tehtiin ns. A-puolelle, eli puolelle jolla näytteen merkinnät olivat.

5.6 Lämpökamera ja näytteiden esikuumennus

Särmäyskokeissa tarvittava kuumennuslämpötilojen seuranta toteutettiin Lapin ammattikorkeakoulun FLIR T425-lämpökameraa käyttäen. Kamera soveltui käytettäväksi lämpötila-alueella $-20-1200$ °C. Tarkasteltava lämpötila-alue oli jaettu kolmeen osaan, joista tähän tutkimukseen valittiin alue välillä $0-350$ °C.

Lämpötilojen tarkastelemisen helpottamiseksi, oli kameran näyttöruutuun mahdollista ohjelmoida mittauspisteitä. Mittauspisteitä sijoitettiin yhteensä neljä kappaletta, neliönmuotoisen alueen nurkkiin.

Näytteiden lämpötilojen taltioimiseen käytettiin kamerassa olevaa ominaisuutta tallentaa kuvia tietyn ajan välein. Kamera säädettiin tallentamaan kuva joka kymmenes sekunti, mikä oli minimaiaika kuvien tallentamisen välillä. Kuvat tallentuivat laitteessa olevalle muistikortille, jolla tiedostot siirrettiin tietokoneelle jokaisen särmätyn kappaleen jälkeen. Kuvassa 17 nähdään esimerkki kameralla tallennetusta kuvasta.



Kuva 17. Esimerkki lämpökameralla taltioidusta kuvasta

Kamera asennettiin tukevasti kolmijalan päälle ja säädettiin oikeaan kulmaan lämmitettävään kappaleeseen nähden (ks. kuva 18). Kolmijalan käyttämisellä mahdollistettiin samanaikainen kappaleiden lämmittäminen sekä niiden vakaa kuvaaminen.



Kuva 18. Kappaleiden kuvaaminen lämpökameralla

Happi-asetyleenikuumentamisella ei havaittu olevan juurikaan eroa nestekaasukuumentamiseen verrattuna, joskin nestekaasukuumentaminen on konepajoilla yleisemmin käytetty menetelmä. Sen etuina ovat muun muassa vain yhden kaasupullon tarve, sekä laajempi lämpövaikutusalue.

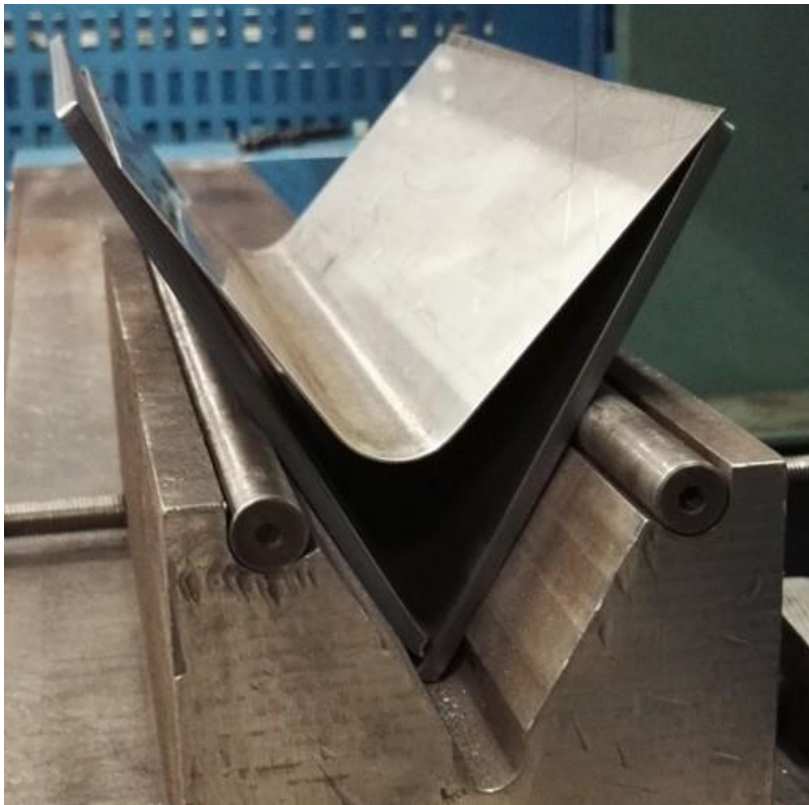
Työn alussa havaittiin että on erityisen tärkeää kuumentaa kappale oikeanlaisella alustalla. Kuvassa 18 nähdään näytteen alla oleva u-profiiliin särmätty ohutlevykappale, jolla estettiin lämmön nopea johtuminen alla olevaan palkkiin. Mikäli näyte olisi kuumennettu suoraan alla olevan palkin päällä, olisivat näytteen lämpötilaerot ylä- ja alapinnan välillä sekä lämmönjohtumisnopeus olleet melko suuria.

Tasaisin lämmitys kappaleisiin saatiin kiertämällä näytteen kehää ympäri, liikuen kohti keskustaa. Kappaleita kuumennettiin lyhyin jaksoin, välillä lämpötila lämpökameran näytöltä tarkastaen. Lämpötilaa luettaessa oli tärkeää suunnata kaasupoltin pois kameran havainnointialueelta. Useimmiten oli myös odotettava

muutama sekunti, jotta lämpökameran lukemat tasaantuivat. Kaikki näytteet kuumennettiin A-puolelta.

5.7 Särmien arvostelu

Särmätyt näytteet tarkastettiin silmämääräisesti ilman optisia apuvälineitä. Pöytäkirjaan merkittiin tulokseksi joko hyväksytty tai hylätty. Erilaisten särmävirheiden merkintää ei suoritettu, sillä tutkimuksessa särmätyt kappaleet joko särmäytyivät täydellisesti tai menivät särmäyslinjan kohdalta poikki. Kuvassa 19 nähdään esimerkki särmättäessä katkenneesta koekappaleesta.



Kuva 19. Särmättäessä katkennut koekappale

6 TULOKSET

Seuraavassa käsitellään särmäystestien välittömät tulokset.

6.1 Teräs A särmäystestit

Ainevahvuudeltaan 5 mm:n A - teräkselle tehtiin 32 särmäyskoetta. Näytteet jotka särmättiin valmistajan minimitaivutussäteen mukaisella arvolla, kestivät. Pienellä taivutussäteellä, huoneenlämpöisenä tai jäähdytettynä särmätyt näytteet kestivät. Kuumana särmätyistä näytteistä 12 kpl hajosi särmättäessä.

Taulukossa 8 on annettu teräksen A särmäystestien tulokset. ”Lämpötila”-sarakeessa on annettu lämpökameran lämpömittauspisteiden välinen keskiarvo ennen särmäämistä.

Taulukko 8. A-teräs särmäyspöytäkirja

Näyte nro.	Materiaali	Alue (°C)	Jäähdytys	Lämpötila (°C)	T (mm)	R/T	R	V	Suunta	Puoli	Korjaus/z-syvyys	Kulma α	Hyväksytyt=0 Hylätty=x
A1	550 HBW	150-200	-	179	5	6	30	100	PI	A	-10.0	95°	o
A2	550 HBW	150-200	-	172	5	6	30	100	PO	A	-11.0	93°	o
A3	550 HBW	150-200	x	55	5	6	30	100	PI	A	-12.0	91°	o
A4	550 HBW	150-200	x	43	5	6	30	100	PO	A	-12.0	91°	o
A5	550 HBW	150-200	-	184	5	3.2	16	80	PI	A	-7.30	92°	o
A6	550 HBW	150-200	-	173	5	3.2	16	80	PI	A	-7.30	-	x
A7	550 HBW	150-200	-	182	5	3.2	16	80	PO	A	-7.30	-	x
A8	550 HBW	150-200	-	175	5	3.2	16	80	PO	A	-7.30	-	x
A9	550 HBW	150-200	x	49	5	3.2	16	80	PI	A	-7.30	91°	o
A10	550 HBW	150-200	x	34	5	3.2	16	80	PO	A	-7.30	91°	o
A11	550 HBW	-	-	-	5	3.2	16	80	PI	A	-7.30	92°	o
A12	550 HBW	-	-	-	5	3.2	16	80	PO	A	-7.30	92°	o
A13	550 HBW	130-160	-	154	5	3.2	16	100	PI	A	341.30	-	x
A14	550 HBW	130-160	-	153	5	3.2	16	100	PI	A	341.30	90°	o
A15	550 HBW	130-160	-	154	5	3.2	16	100	PO	A	341.30	-	x
A16	550 HBW	130-160	-	155	5	3.2	16	100	PO	A	341.30	90°	o
A17	550 HBW	100-130	-	123	5	3.2	16	100	PI	A	341.30	-	x
A18	550 HBW	100-130	-	125	5	3.2	16	100	PI	A	341.30	90°	o
A19	550 HBW	100-130	-	124	5	3.2	16	100	PO	A	341.30	-	x
A20	550 HBW	100-130	-	125	5	3.2	16	100	PO	A	341.30	-	x
A21	550 HBW	70-100	-	96	5	3.2	16	100	PI	A	341.30	-	x
A22	550 HBW	70-100	-	96	5	3.2	16	100	PI	A	341.30	-	x
A23	550 HBW	70-100	-	97	5	3.2	16	100	PO	A	341.30	90°	o
A24	550 HBW	70-100	-	93	5	3.2	16	100	PO	A	341.30	-	x
A25	550 HBW	40-70	-	59	5	3.2	16	100	PI	A	341.30	-	x
A26	550 HBW	40-70	-	56	5	3.2	16	100	PI	A	341.30	90°	o
A27	550 HBW	40-70	-	60	5	3.2	16	100	PO	A	341.30	90°	o
A28	550 HBW	40-70	-	59	5	3.2	16	100	PO	A	341.30	90°	o
A29	550 HBW	-	-	-	5	3.2	16	100	PI	A	341.30	90°	o
A30	550 HBW	-	-	-	5	3.2	16	100	PI	A	341.30	90°	o
A31	550 HBW	-	-	-	5	3.2	16	100	PO	A	341.30	90°	o
A32	550 HBW	-	-	-	5	3.2	16	100	PO	A	341.30	90°	o

6.2 Teräs B särmäystestit

Ainevahvuudeltaan 6 mm:n B-teräkselle tehtiin 21 särmäyskoetta. Näytteet jotka särmättiin valmistajan minimitaivutussäteen mukaisella arvolla, kestivät. Pienellä taivutussäteellä, huoneenlämpöisenä tai jäähdytettynä särmätyt näytteet kestivät. Kuumana särmätyistä näytteistä 8/12 hajosi särmättäessä.

Taulukossa 9 on annettu teräksen B särmäystestien tulokset.

Taulukko 9. B-teräs särmäyspöytäkirja

Näyte nro.	Materiaali	Alue (°C)	Jäähdytys	Lämpötila (°C)	T (mm)	R/T	R	V	Suunta	Puoli	Korjaus/z-syvyys	Kulma α	Hyväksytyt=0 Hyläytyt=x
B1	550 HBW	150-200	-	184	6	6	36	100	PI	A	-6.0	91°	o
B2	550 HBW	150-200	-	178	6	6	36	100	PO	A	-6.0	91°	o
B3	550 HBW	150-200	x	45	6	6	36	100	PI	A	-6.0	90°	o
B4	550 HBW	150-200	x	50	6	6	36	100	PO	A	-6.0	90°	o
B5	550 HBW	150-200	-	180	6	3.3	20	80	PI	A	-1.5	-	x
B6	550 HBW	150-200	-	168	6	3.3	20	80	PI	A	-1.5	-	x
B7	550 HBW	150-200	-	174	6	3.3	20	80	PO	A	-1.5	-	x
B8	550 HBW	150-200	-	168	6	3.3	20	80	PO	A	-1.5	-	x
B9	550 HBW	150-200	x	46	6	3.3	20	80	PI	A	-1.5	91°	o
B10	550 HBW	150-200	x	45	6	3.3	20	80	PO	A	-1.5	91°	o
B11	550 HBW	-	-	-	6	3.3	20	80	PI	A	-1.5	92°	o
B12	550 HBW	-	-	-	6	3.3	20	80	PO	A	-1.5	92°	o
B17	550 HBW	100-130	-	119	6	3.3	20	100	PI	A	326.00	-	x
B18	550 HBW	100-130	-	117	6	3.3	20	100	PI	A	326.00	-	x
B19	550 HBW	100-130	-	117	6	3.3	20	100	PO	A	326.00	-	x
B20	550 HBW	100-130	-	119	6	3.3	20	100	PO	A	326.00	-	x
B21	550 HBW	70-100	-	92	6	3.3	20	100	PI	A	326.00	90°	o
B22	550 HBW	70-100	-	89	6	3.3	20	100	PI	A	326.00	90°	o
B23	550 HBW	70-100	-	90	6	3.3	20	100	PO	A	326.00	90°	o
B24	550 HBW	70-100	-	89	6	3.3	20	100	PO	A	326.00	90°	o
B29	550 HBW	-	-	-	6	3.3	20	100	PI	A	325.00	92°	o

6.3 Teräs C särmäystestit

C-teräkselle tehtiin neljä särmäyskoetta. Näytteet särmättiin valmistajan minimi-taivutussäteen mukaisella arvolla. Sekä kuumana että huoneenlämpöisenä sär-mätyt näytteet onnistuivat.

Taulukossa 10 on annettu teräksen C särmäystestien tulokset.

Taulukko 10. C-teräs särmäyspöytäkirja

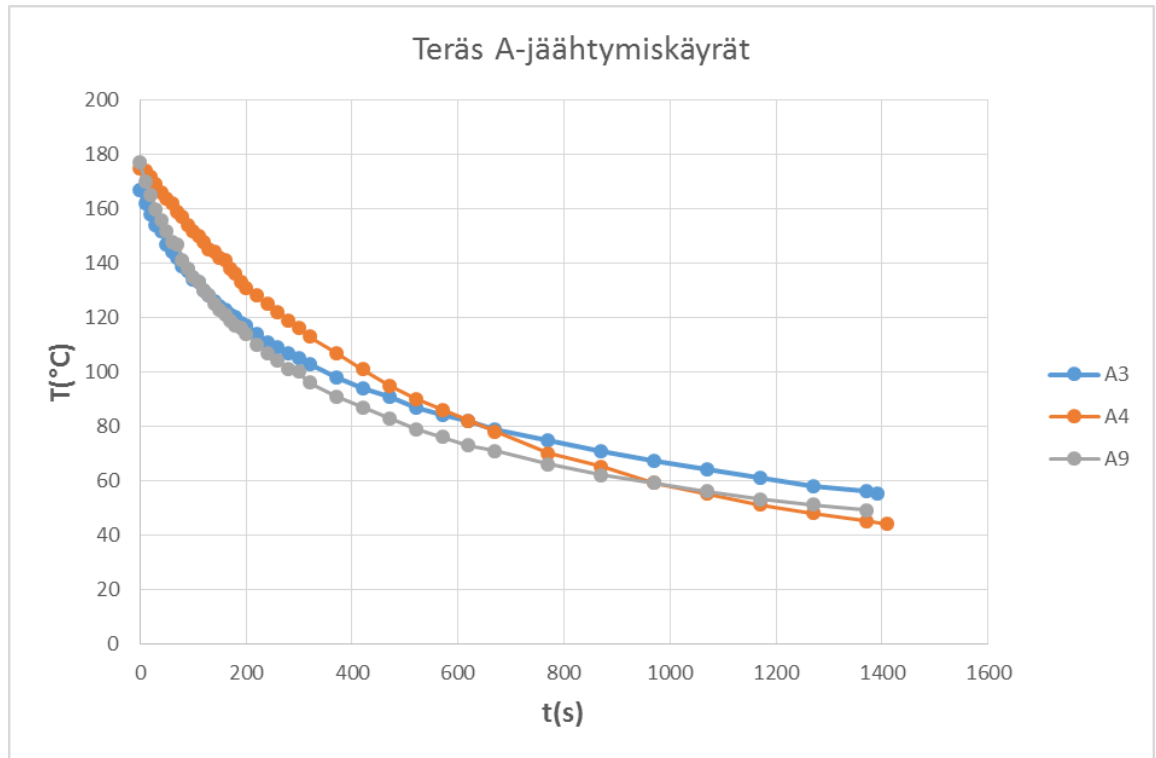
Näyte nro.	Materiaali	Alue (°C)	Jäähdytys	Lämpötila (°C)	T (mm)	R/T	R	V	Suunta	Puoli	Korjaus/z-syvyys	Kulma α	Hyväksyty=0 Hylätty=x
C1	600 HBW	150-200	-	174	6	8	48	150	PI	A	376.5	90°	o
C2	600 HBW	150-200	-	178	6	8	48	150	PO	A	376.5	90°	o
C3	600 HBW	-	-	-	6	8	48	150	PI	A	377.00	90°	o
C4	600 HBW	-	-	-	6	8	48	150	PO	A	377.00	89°	o

6.4 Jäähymiskäyrät

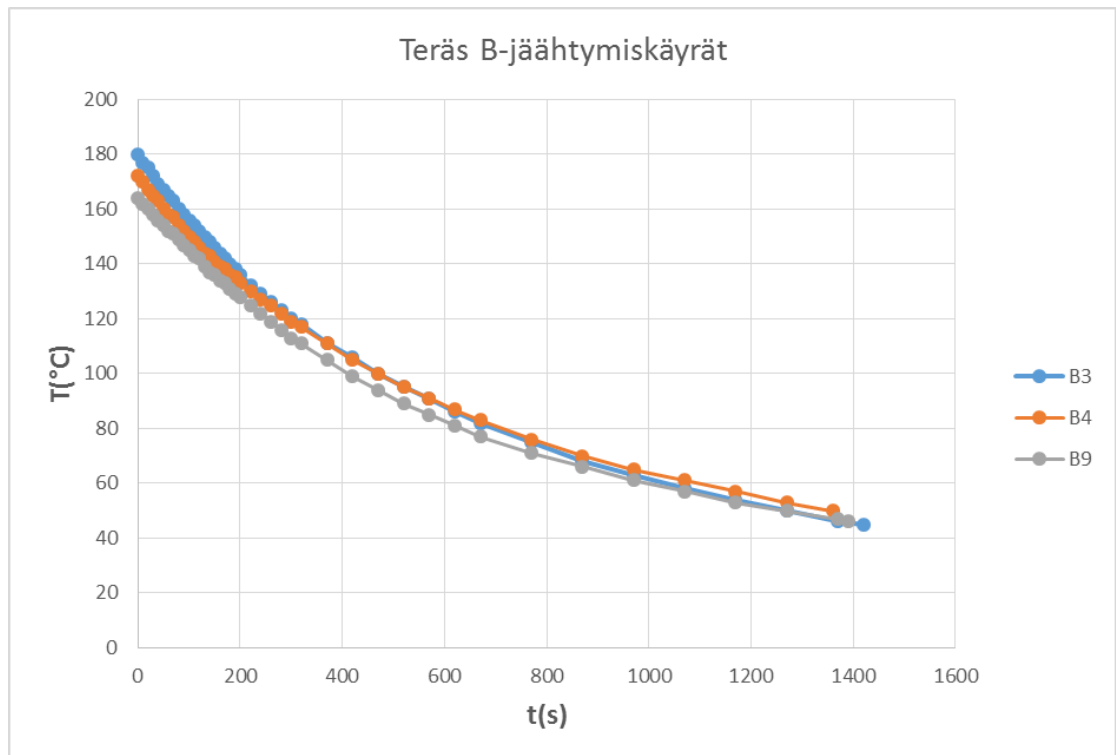
Kaikki tutkimuksessa esikuumennetut kappaleet kuumennettiin särmäyslaitteiston välittömässä läheisyydessä. Lyhyestä välimatkasta huolimatta, näytteet jotka särmättiin kuumana, jäähdyivät n. 10–20 sekuntia siirrettäessä särmättäväksi.

Kuvissa 20 ja 21 nähdään esimerkki A- ja B-teräksen jäähymiskäyristä. Kuvissa on esitetty kolmen A- ja B-teräsnäytteen jäähymiskäyrät n. 25 minuutin jäähymisen ajalta ennen särmäämistä. Mittauspisteiden välinen keskiarvolämpötila $T(^{\circ}\text{C})$ on esitetty ajan $t(\text{s})$ funktiona.

Työn alussa havaitun oikeanlaisen kuumennusalustan (ks. kuva 18) tarpeellisuus nähdään myös kuvassa 20. Poikkeama kappaleiden jäähymisnopeudessa joh-tuu siitä, että vain näytteessä A4, käytettiin u-profiilin muotoista välikappaletta levyn ja palkin välissä. Näytteiden A3 ja A9 jäähymisnopeus on huomattavasti suurempi, sillä ne jäähdyivät suoraan palkin päällä.



Kuva 20. Teräs A-jäähdytyskäyrät



Kuva 21. Teräs B-jäähdytyskäyrät

Taulukossa 11 on annettu kuvissa 20 ja 21 esitettyjen näytteiden jäähtymisnopeuden maksimiarvot ($T(^{\circ}\text{C})/t(\text{s})$). Arvot ovat kunkin näytteen jäähtymiskäyrän kulmakertoimen minimiarvo.

Taulukko 11. Jäähtymisnopeus

Jäähtymisnopeuden maksimi						
	A3	A4	A9	B3	B4	B9
$^{\circ}\text{C}/\text{s}$	-0.5	-0.3	-0.7	-0.3	-0.3	-0.3

7 TULOSTEN TARKASTELU

Kaikkien kokeissa tutkittujen teräslaatuojen kohdalla huomattiin, ettei esikuumentus vaikuta särmättävyyteen heikentävästi, mikäli käytetään valmistajan suosittelomia taivutussäteiden arvoja; A- ja B-teräkselle 6 x t ja C-teräkselle 8 x t.

A-teräksen kohdalla havaittiin, että taivutussäteen arvolla 3.2 x t, esikuumentaminen vaikuttaa särmättävyyteen heikentävästi. Lämpötila-alueella 150–200 °C kuumennetuista, ja kuumana särmätyistä näytteistä, hylättiin kolme näytettä neljästä. Samalla alueella kuumennetut ja tämän jälkeen 25 minuuttia jäähtyneet kappaleet särmätyivät täydellisesti.

Lämpötila-alueella 130–160 °C kuumennetuista ja kuumana särmätyistä, puolet näytteistä onnistui. Hajonneissa oli yksi poikittain- sekä yksi pitkittäin valssaussuuntaan nähden särmätty näyte.

100–130 °C:een lämpötila-alueella hyväksyttiin yksi näyte neljästä, pitkittäin valssaussuuntaan nähden särmätty. Loput kolme näytettä hylättiin.

70–100 °C:een alueella hyväksyttiin yksi näyte neljästä, poikittain valssaussuuntaan nähden särmätty näyte. Loput kolme näytettä hylättiin.

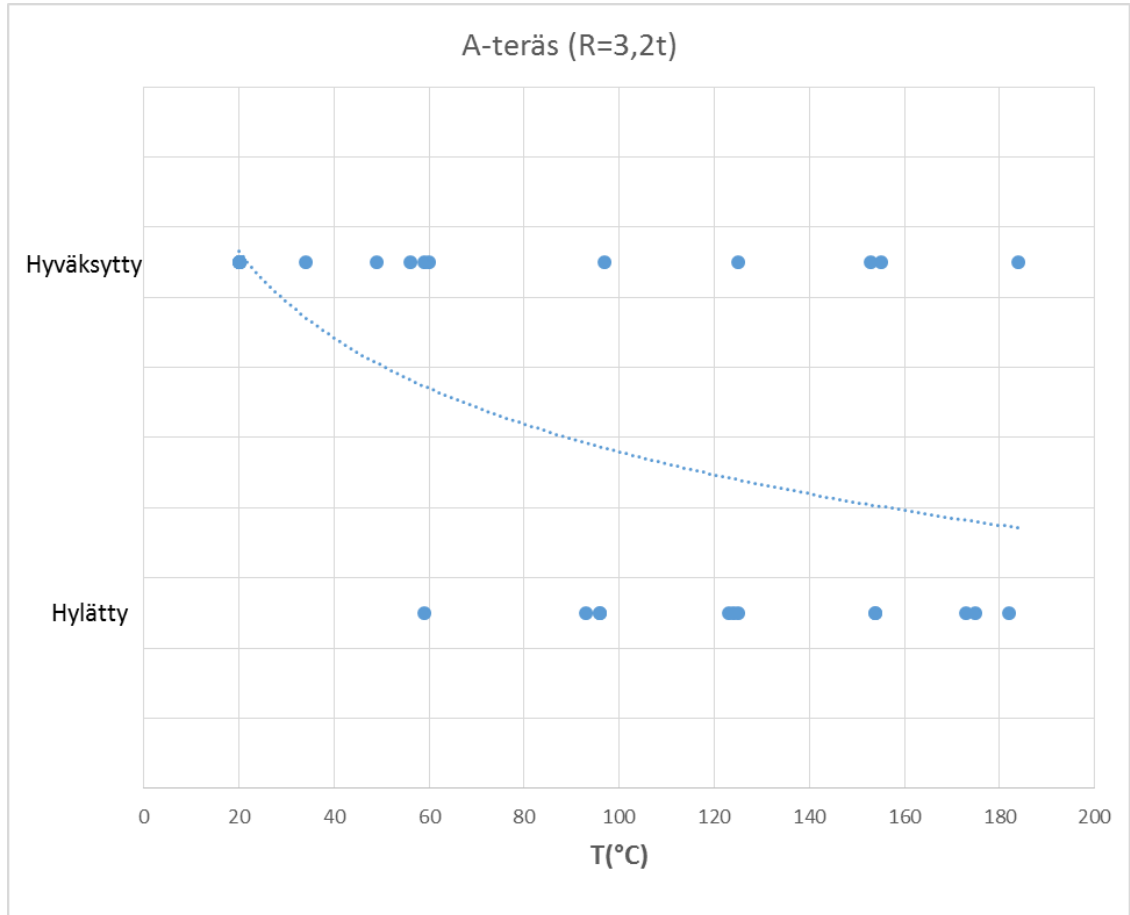
Lämpötila-alueella 40–70 °C särmätyistä näytteistä vain yksi hajosi, valssaussuuntaan nähden pitkittäin särmätty näyte. Loput kolme näytettä hyväksyttiin.

Materiaalille tehtiin kuusi särmäyskoetta kuumentamattomana huoneenlämpöisenä. Kaikki näytteet hyväksyttiin.

Särmäyssuunnalla ei havaittu olevan merkitystä materiaalin särmättävyyteen. Näytteiden kestämisen/hajoamisen huomattiin olevan säännöllisen epäsäännöllistä. Kuitenkin valmistajan lupaamaa minimitaivutussädettä pienemmällä arvolla särmättäessä, särmäystuloksen onnistumistodennäköisyys kasvoi mitä lähempänä huoneenlämpötilaa näytteiden lämpötila oli ennen särmäämistä.

Kuvassa 22 nähdään A-teräksen särmäystulokset pientä taivutussäteen arvoa käyttäen. Kuvaan ei ole merkitty näytteiden särmäyssuuntaa, sillä sen havaittiin olevan merkityksetöntä särmäyksen onnistuvuuden kannalta. Huoneenlämpöisinä särmätyille näytteille annettiin lämpötila-arvoksi 20 °C, joten ensimmäinen

mittapiste sisältää kuusi näytettä. Mittauspistejoukkoon sijoitetusta trendiviivasta voidaan todeta, että onnistuneiden särmäyksien lukumäärä pienenee lämpötilan kasvaessa.



Kuva 22. A-teräs särmäystulokset

Teräksen B särmäyskokeissa havaittiin, että taivutussäteen arvolla $3.3 \times t$, esikuumentaminen vaikuttaa heikentävästi särmättävyyteen. Lämpötila-alueella 150–200 °C, kaikki neljä särmättyä näytettä hylättiin. Sen sijaan kaksi samalla alueella kuumennettua, ja tämän jälkeen 25 minuuttia jäähtynyttä näytettä särmäytyivät moitteetta.

Lämpötila-alueella 130–160 °C, ei B-teräkselle tehty kokeita lainkaan. A-teräkselle tehtyjen kokeiden perusteella oletettiin, ettei rajalämpötilaa tällekin materiaalille löydy kyseisellä alueella.

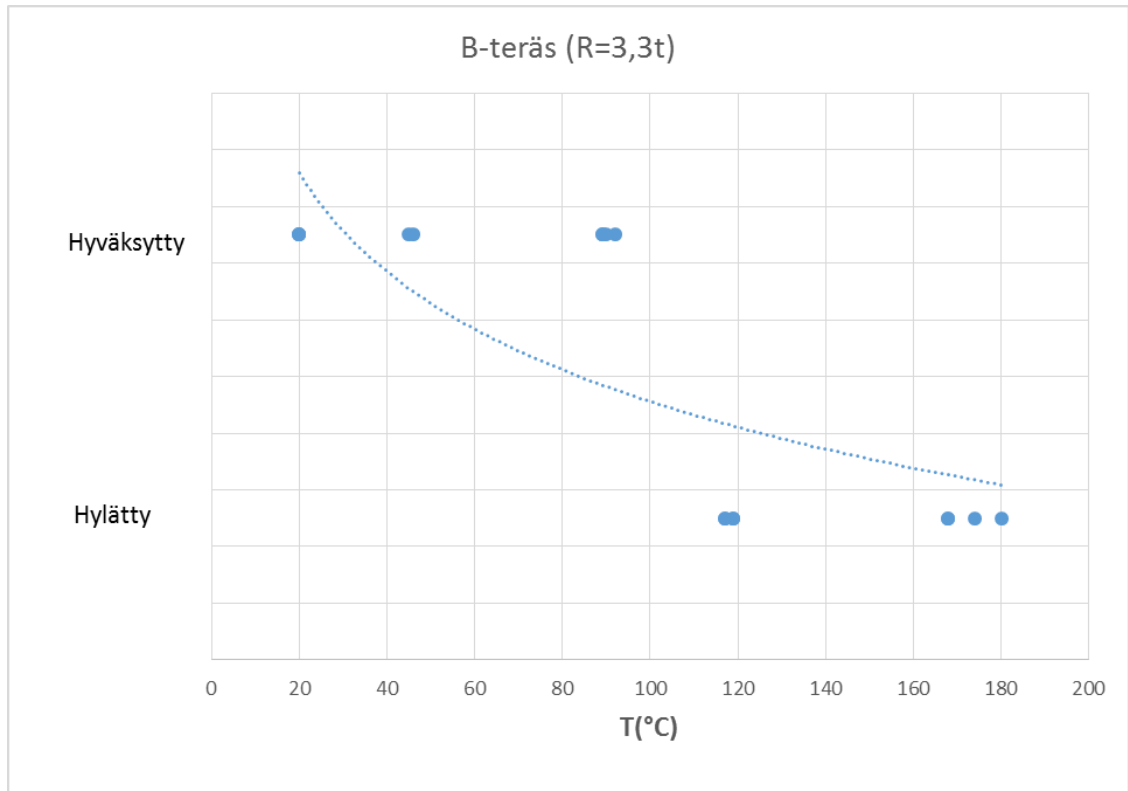
100–130 °C:een lämpötila-alueella tehtiin neljä särmäyskoetta, joista kaikki hylättiin.

70–100 °C:een lämpötila-alueella särmätyistä neljästä näytteestä kaikki hyväksyttiin. Onnistuneiden tuloksien perusteella päätettiin, ettei materiaalille tehdä lisäsärmäyksiä alemmalla lämpötila-alueella.

Kuumentamattomana huoneenlämpöisenä, materiaalille tehtiin yhteensä kolme särmäyskoetta, joista kaikki hyväksyttiin.

Särmäyssuunnalla ei havaittu olevan merkitystä särmättävyyteen. A-teräkseen verrattuna B-teräksen särmäystulokset olivat säännöllisempiä. Eri lämpötila-alueilla särmätyistä näytteistä joko kaikki hylättiin tai hyväksyttiin. Esikuumennuslämpötilan madaltuessa särmättävyys parani kuten A-teräkselläkin.

Kuvassa 23 nähdään B-teräksen särmäystulokset pientä taivutussäteen arvoa käyttäen. Kuvaan ei ole merkitty särmäyssuuntaa. Huoneenlämpöisinä särmäytyille näytteille annettiin lämpötila-arvoiksi 20 °C, joten ensimmäinen mittapiste sisältää kolme näytettä. Kuvan perusteella voidaan todeta korkeiden esikuumennuslämpötilojen heikentävän särmättävyyttä.



Kuva 23. B-teräs särmäystulokset

C-terästä särmättiin yhteensä neljä näytettä. Kaksi näytteistä särmättiin pitkittäin- ja poikittain valssaussuuntaan nähden 150–200 °C:een lämpötila-alueella, sekä loput kaksi näytettä huoneenlämpöisinä myöskin molempiin suuntiin. Kaikki näytteet särmäytyivät hyväksytysti. Taivutussäteenä käytettiin valmistajan suosittelemaa minimiarvoa 8 x t.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn johtopäätöksenä voidaan todeta, ettei esikuumentaminen heikennä 550 HBW- tai 600 HBW-teräksen särmättävyyttä, mikäli käytetään SSAB:n lupaamia minimitaivutussäteitä. Materiaaleja voidaan särmätä esikuumentettuina tai esikuumentamattomina.

Esikuumentamisen havaittiin heikentävän 550 HBW-teräksen särmättävyyttä, mikäli käytetään materiaalivalmistajan suositusta pienempiä taivutussäteen arvoja. Mikäli esikuumentamista halutaan käyttää, on suositeltavaa pysyä alle 50 °C lämpötiloissa. Paras särmättävyys saavutetaan esikuumentamattomana huoneenlämpöisenä särmättynä.

Ainevahvuudella ja särmäyssuunnalla ei havaittu olevan vaikutusta 550 HBW- ja 600 HBW-teräksen särmättävyyteen.

9 POHDINTA

Ultralujien terästen kuumasärmäystutkimus oli hyvä ja mielenkiintoinen aihe opinäytetyölle. Työ lisäsi tietämystäni terästen ominaisuuksista, sekä antoi hyvän kuvan tutkimuksesta, mikä pitää sisällään työvaiheen sekä tulosten käsittelyn.

Tutkimuksesta saatuja tuloksia voidaan pitää suuntaa antavina, sillä niille ei pienestä näyte- ja tapausmäärästä johtuen voinut suorittaa tilastollista tulosten käsittelyä. Tulosvirheitä voi myös aiheuttaa näytteiden kuumentamiseen käytetty menetelmä, missä näytteiden lämpöjakauma on melko epätasainen. Menetelmällä tosin pyrittiinkin simuloimaan konepajaolosuhteita.

Tärkeimpänä tuloksena kuitenkin saatiin selville, ettei esikuumentaminen heikennä 550 HBW- ja 600 HBW-teräksen särmättävyyttä. Esikuumentamisen särmättävyyttä heikentävä vaikutus ilmeni vasta huomattavasti valmistajan suosituksia pienempiä taivutussäteen arvoja käyttämällä. Noudattamalla valmistajan suosittelemia minimitaivutussäteitä, ei esikuumentaminen heikennä särmättävyyttä.

Ainevahvuuden ei tulosten perusteella havaittu vaikuttavan särmättävyyteen. Molemmat 550 HBW-materiaalit särmäytyivät hyvin materiaalivalmistajan suosittelemia taivutussäteitä käyttämällä. Eroja särmättävyydessä alkoi ilmetä vasta pienillä taivutussäteillä kuumana särmättäessä, joskin huoneenlämpötilaa lähestyessä särmättävyys parani oleellisesti.

Työhön suunnitellut vetokokeet jouduttiin laiterikkojen ja aikataulun vuoksi jättämään tutkimuksesta pois. Vetokokeiden avulla olisi saatu huomattavasti lisätietoa materiaalin käyttäytymisestä korotetussa lämpötilassa, sekä selvitettyä aiheuttaako dynaaminen myötövanheneminen ongelmat kuumasärmäyksessä.

Mikäli työssä tutkituille teräksille tullaan tulevaisuudessa tekemään vastaavanlaisia tutkimuksia, tulisi mielestäni niihin ehdottomasti sisällyttää vetokokeita sekä suurempi särmäyskoematriisi. Koesuunnitteluun tulisi kiinnittää erityistä huomiota, jotta tilastollisesta analysoinnista saataisiin mahdollisimman tarkkoja tuloksia.

LÄHTEET

Apajalahti, H. 2014. Kevytvesireaktorien käyttöiän hallinta - materiaalivauriot pitkällä aikavälillä. Elomatic News. Talvi 2014, 7.

Ivanchenko, M. 2010. Dynamic strain aging of austenitic stainless steels and Ni-base alloys. Aalto-yliopisto. Tohtorintyö.

Kesti, V. 2016. Oppariasiaa. Sähköposti toni.teras@edu.lapinamk.fi 11.4.2016. Tulostettu 11.4.2016.

Lepola, P. & Makkonen, M. 2005. Hitsaustekniikat ja teräsrakenteet. Helsinki: WSOY.

Lämsä, J. & Kiuru, H. 2012. Ultralujat rakenne- ja kulutusteräkset – tärkeimmät ominaisuudet suunnittelulle. Raahen Seudun Teknologiakeskus Oy, Oulun yliopisto. CASR-Steelpolis –verkostohanke (EAKR) . Viitattu 16.3.2016
<https://wiki oulu.fi/download/attachments/28082956/Ultralujat+rakenne-+ja+kulutuster%C3%A4kset+-+t%C3%A4rkeimm%C3%A4t+ominaisuudet+suunnittelulle.pdf> ultraluja teräs oulu yliopisto

Matilainen, J., Parviainen, M., Havas, T., Hiitelä, E. & Hultin, S. 2011. Ohutlevytuotteiden suunnittelijan käsikirja. Helsinki: Teknologiainfo Teknova Oy.

Rautaruukki 2014. Raahen tehtaan esittely. Powerpoint-esitys.

SSAB 2016. Yrityksen www-sivut. Viitattu 15.2.2016. <http://www.ssab.fi/>