

Tutkimus kuumavalssattujen 355 ja 420 MPa lujuusluokan teräs-
ten leikatun reunan pinnanlaadusta ja sen vaikutuksesta reiänlaa-
jennuskykyyn

Milka Linke

Kone- ja tuotantotekniikan opinnäytetyö
Tuotantotekniikka
Insinööri (AMK)

KEMI 2014

ALKUSANAT

Haluan kiittää työn toimeksiantajaa Lapin ammattikorkeakoulun tekniikan TKI-osastoa ja etenkin TkL Timo Kauppia työn ohjaamisesta ja valvonnasta. Suuret kiitokset kuuluvat myös DI Vili Kestille asiantuntevasta avusta sekä Raimo Vierelälle avusta etenkin KWI – reiänlaajennuskokeiden osalta. Lisäksi haluan kiittää myös muuta TKI -osaston henkilökuntaa saamastani avusta näytteiden valmistuksessa ja testien suorittamisessa.

Lopuksi haluan kiittää myös läheisiäni saamastani tuesta pitkin opinnäytetyöprosessia.

Kemissä 2014

Milka Linke

TIIVISTELMÄ

LAPIN AMMATTIKORKEAKOULU, Tekniikka

Koulutusohjelma:	Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Opinnäytetyön tekijä(t):	Milka Linke
Opinnäytetyön nimi:	Tutkimus kuumavalssattujen 355 ja 420 MPa lujuusluokan terästen leikatun reunan pinnanlaadusta ja sen vaikutuksesta reiänlaajennuskykyyn
Sivuja (joista liitesivuja):	58
Päiväys:	2.5.2014
Opinnäytetyön ohjaaja(t):	TkL Timo Kauppi
<p>Tässä opinnäytetyössä tutkittiin kuumavalssattujen 355 ja 420 MPa lujuusluokan terästen leikatun reunan pinnanlaatua ja sen vaikutusta venytyssärmättävyyteen. Ruukki Metals Oy on kehittänyt uusia teräksiä, joiden reiänlaajennuskyky on alustavissa testauksissa osoittautunut selvästi aiempaa paremmaksi. Tässä työssä pyrittiin hakemaan syitä tälle. Tavoitteena oli selvittää, onko reiänlaajennustestin tuloksilla korrelaatiota mekaanisesti leikatun reunan pinnanlaatuun ja vaikuttaako leikkausväly leikkausreunan pinnanlaatuun.</p> <p>Teoriaosuudessa tehtiin selvitys yleisesti metallien muovauksesta ja teräksen muovattavuusominaisuuksista. Työssä selvitettiin myös venytyssärmäyksen ja reiänlaajennuskyvyn termejä ja tärkeimpiä reiänlaajennuskyvyn testausmenetelmiä. Lisäksi esitellään leikkaus- ja lävistysprosessit, leikkausreunan rakenne, leikkausväly sekä näiden vaikutus leikkausreunan laatuun.</p> <p>Työ aloitettiin leikkaamalla näytelevyjä välyksiä vaihtelemalla. Näytelevyille tehtiin KWI-reiänlaajennustestit, mikrorakennekuvaukset valomikroskoopilla, kovuusmittaukset mikrokovuusmittarilla ja pinnankarheusmittaukset laserprofilometrillä.</p> <p>Tulosten perusteella selitys koeteräs 355 ja 420:n ISO-reiänlaajennustesteissä havaitulle verrokkiteräksiä huomattavasti paremmille reiänlaajennussuhteille löytyi julkaisuista, joissa käsitellään reiänlaajennustestien välisiä eroja. Eroja kuitenkin löytyi myös leikkausreunan rakenteesta, etenkin kiillottuneen alueen koosta. Myös koeterästen alhaisempi lujittuminen voi olla yksi tekijä, kun tarkastellaan eroja koeterästen ja verrokkiterästen välillä. Pinnankarheuden vaikutus ei vastannut teoriaa, mutta hajonnan ja pinnankarheuksien absoluuttisen pienuuden takia karheudet olivat käytännössä hyvin lähellä toisiaan. Mikrorakennetutkimuksista ei ilmennyt merkittävää eroa koemateriaalien välillä.</p>	
Asiasanat: teräs, muokattavuus, leikkausreuna.	

ABSTRACT

LAPLAND UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES, Technology

Degree programme:	Mechanical and Production Engineering
Author(s):	Milka Linke
Thesis title:	Study of hot-rolled 355 and 420 MPa strength steel's sheared-edge quality and its effect on stretch flangeability
Pages (of which appendixes):	58
Date:	2 May 2014
Thesis instructor(s):	TkL Timo Kauppi
<p>The subject of thesis was to investigate hot-rolled 355 and 420 MPa strength steel's sheared edge quality and how it effects on stretch flangeability. Ruukki Metals Oy has developed new steels whose hole expansion ratio is clearly improved. The aim of this thesis was to find reasons for improvements, investigate did results of hole expansion tests correlate with sheared edge quality and did the cutting clearance have effect on the sheared edge quality.</p> <p>The theory part includes basics for steel forming and steel forming properties. Also terms of stretch flangeability and hole expansion ratio and the most important testing methods for hole expansion are explained. Moreover, one very important subject is study of cutting process, structure of sheared edge and cutting clearance and also how these things effect on sheared edge quality.</p> <p>The work was started by cutting samples with different cutting clearance. When samples were ready microstructure investigations with optical microscopy, hardness tests and surface roughness tests were carried out.</p> <p>The tests for the test materials were carried out successfully. Based on the results for considerably better hole expansion ratio of test steels 355 and 420 are found from the theory related to the differences between the hole expansion tests. Also differences were found in the sheared edge, especially in the size of sheared surface. Also lower hardening of the test steels 355 and 420 could be one factor when observing differences between test steels 355 and 420 and parable steels. The roughness parameters gave results which disprove the theory, but taking into account the dispersion between the results and minor unit of roughness parameters, in practice the results are very close to each other. The microstructure investigations did not show any significant difference between the test materials.</p>	
Key words: steel, formability, sheared edge.	

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYS	5
1 JOHDANTO	7
2 METALLIEN MUOVAUS	8
2.1 Kuumavalssaus	8
2.2 Kylmämuovaus	9
3 TERÄSTEN MUOVATTAVUUSOMINAISUUDET	11
3.1 Mekaaniset ominaisuudet	11
3.2 Muokkauslujittumiseksponentti n	11
3.3 Erichsenin luku IE	12
3.4 Plastinen venymäsuhde r	12
3.5 Rajavetosuhde LDR	13
3.6 Rajamuovattavuuspiirros FLC	13
4 VENYTYSSÄRMÄTTÄVYYS JA SEN TESTAAMINEN	15
4.1 Venytyssärmättävyys	15
4.2 ISO-standardin mukainen reiänlaajennusmenetelmä	16
4.3 KWI-reiänlaajennusmenetelmä	18
5 REIÄN LÄVISTYS JA LEIKKAUSREUNA	20
5.1 Lävistysprosessi	20
5.2 Leikkausreunan rakenne	20
5.2.1 Leikkauspinnan osat	20
5.2.2 Leikkaukselle altistunut alue SAZ	22
5.3 Leikkausväly	22
6 LEIKKAUSREUNAN LAADUN VAIKUTUS MUOVATTAVUUTEEN	25
7 KOEMATERIAALIT JA -MENETELMÄT	26
7.1 Koemateriaalit	26
7.2 Leikkausvälyksien vaihtelu ja näytteiden valmistus	26
7.3 Leikkausreunan alueet	27
7.4 KWI-reiänlaajennustesti	27
7.5 Kovuusmittaukset	28
7.6 Mikrorakennetutkimukset	28

7.7 Pinnankarheudet	28
8 TULOKSET	29
8.1 Leikkausvälyksen vaikutus kiillottuneen alueen suuruuteen	29
8.2 KWI-reiänlaajennus	29
8.3 Kovuusmittaukset.....	32
8.4 Mikrorakennetutkimukset	33
8.5 Pinnankarheudet	36
9 TULOSTEN TARKASTELU	39
9.1 Leikkausreunan ominaisuudet.....	39
9.2 Reiänlaajennuskyky	50
9.3 Venytyssärmättävyys	51
10 POHDINTA	57
LÄHTEET	58

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö tehtiin Lapin ammattikorkeakoulun materiaalien käytettävyyden tutkimusryhmän ennakointiprosessiin kuuluvana toimeksiantona. Opinnäytetyössä tutkittiin Ruukki Metals Oy:n Raahen kuumavalssaamalla kehitettyjen uusien terästen reiänlaajennuskykyä. Työssä selvitettiin mm. leikkausvälyksen vaikutusta leikatun reunan pinnanlaatuun ja tätä kautta reiänlaajennuskykyyn.

Kuumavalssattujen terästen muovattavuutta on tutkittu Suomessa vähän. Alustavissa tutkimuksissa (opintojakso Tuotantotekniikan materiaalit 1) on saatu lupaavia testituloksia ja tarvetta laajemmallekin tutkimukselle on herännyt. Autoteollisuudessa on käytösovelluksia, joissa kuumavalssattu, hyvin muovattava teräs voisi olla kilpailukykyinen, kylmävalssattua terästä edullisempi vaihtoehto tulevaisuudessa. Tällöin yksi tärkeimmistä muovattavuuteen liittyvistä ominaisuuksista on venytyssärmättävyys, jota voidaan testata reiänlaajennustestillä.

Teoriaosuudessa käsitellään terästen muokkaamista kirjallisuustutkimuksen avulla. Teoriaosuudessa tarkastellaan venytyssärmäystä (stretch flanging), reiänlaajennuskykyä ja sen testaamista sekä leikkausreunan ja sen pinnanlaadun vaikutusta reiänlaajennuskykyyn.

Kokeellisessa osuudessa tehtiin leikkauskokeita koe- ja verrokkiteräksille vaihdellen terävälystä mekaanisessa levyleikkurissa, jotta voitiin tutkia välyksen vaikutusta leikkausreunan pinnanlaatuun. Leikkausreunan pinnanlaatua tutkittiin mikrorakennetarkastelulla, kovuusmittauksilla sekä pinnankarheusmittauksilla. Aikaisempien muovaustutkimuksien tueksi tutkittavilla teräksille tehtiin myös KWI -reiänlaajennustesti.

Opinnäytetyössä tutkittiin Ruukin kuumavalssattuja uusia teräslaatuja (koeteräkset) ja tavoitteena oli:

1. Tutkia onko reiänlaajennustestin tuloksilla korrelaatiota mekaanisesti leikatun reunan pinnanlaatuun.
2. Selvittää, miten leikkausvälyys vaikuttaa leikatun reunan pinnanlaatuun.
3. Tehdä alustavia käytännön muovauskokeiluja, joilla pyritään demonstroimaan tutkittavien materiaalien muovattavuuden eroja.

2 METALLIEN MUOVAUS

2.1 Kuumavalssaus

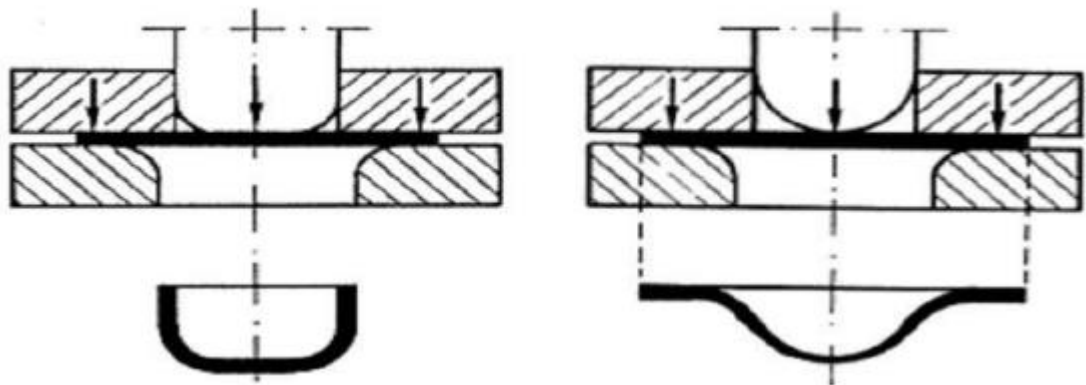
Tyypillisesti teräksen kuumavalssaus tapahtuu noin 800 - 1250 celsiusasteen lämpötilassa, jolloin teräs on helposti muokkaantuvaa. Kuumavalssauksen aikana karkea, valussa syntynyt epäedullinen mikrorakenne tasoittuu ja hienontuu. Lisäksi metallin lujuus ja sitkeys kasvavat. Tämä on seurausta mikrorakenteesta tapahtuvista muutoksista, kun austeniitti rekristallisoituu pistojen välillä. Lämpötilan tulee kuitenkin olla riittävän korkea ja pistojen välisen ajan tarpeeksi pitkä. Tätä tapahtuu etenkin esivalssauksessa, jossa valssattava nauha kulkee edestakaisin työvalssien läpi. Rekristallisoitumisen takia muokkauslujuuttamista ei tapahdu ja tästä johtuen teräksen muokkaukseen vaadittava voima ei nouse, kun kokonaisreduktio kasvaa. Teräksen lujuusominaisuudet ja mikrorakenne määräytyvät sen mukaan, missä lämpötilassa muokkaus lopetetaan ja kuinka jäähdytys yli faasimuutoslämpötilojen tapahtuu. (Vierelä 2012, 2; Juntunen 2010,3.)

Nykyaikaisessa valssauksessa pyritään saavuttamaan mahdollisimman pieni raekoko ja sopivin austeniitin hajaantumistuote. Tästä johtuen nauhavalssauksessa pyritään valssaamaan terästä mahdollisimman lähellä A3-lämpötilaa, jolloin austeniitti saadaan muokkautumaan. Tällöin välittyy myös muokkausenergiaa, joka tuottaa jäähdytyksen yhteydessä mahdollisimman pienen ferriitin raekoon. (Vierelä 2012, 2.)

Tutkimuksissa käytettävät koemateriaalit Ruukki Laser 355 MC ja 420 MC sekä koeteräkset 355 ja 420 toimitetaan termomekaanisesti valssattuna, jota kuvaa kirjain M. Teräslajin tunnuksen C kirjain tarkoittaa särmättävyystakuuta. Materiaalit sisältävät mikroosaineita (Ti, Nb), jotka viivästyttävät rekristallisaation tapahtumista nauhavalssauksen yhteydessä. Termomekaanisessa valssauksessa säädellään valssauslämpötilaa, muokkausastetta ja valssauksen jälkeistä jäähtymistä. Termomekaanisessa valssauksessa suoritetaan tarkassa lämpötilassa oleva viimeistelyvalssaus, jolloin ei tapahdu rekristallisoitumista. Erona tämän tutkimuksen Laser- ja koeterästen välillä on koeterästen innovatiivinen jäähdytys.

2.2 Kylmämuovaus

Teräksen kylmämuovaus tapahtuu huoneenlämmössä ja sen tarkoituksena on muovata kappale halutun muotoiseksi ilman vaurioita ja ilman liiallista seinämien ohenemista. Etuna kylmämuovatuilla tuotteilla ovat hyvä lujuus, pinnanlaatu, mittatarkkuus ja niiden nopea valmistaminen. Esimerkkejä kylmämuovausmenetelmistä ovat venytysmuovaus ja syväveto (kuva 1).



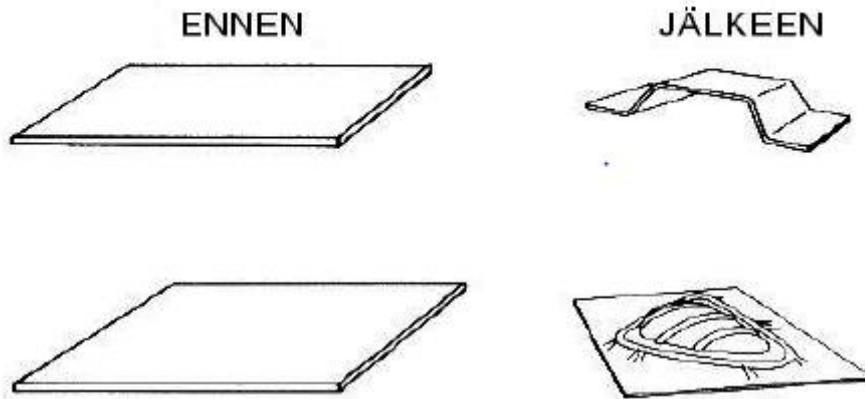
Kuva 1. Syvävedon (vasemmalla) ja venytysmuovauksen (oikealla) periaate kaaviollisesti esitetynä. (Kivivuori 2006, hakupäivä 6.3.2014).

Venytysmuovauksella tarkoitetaan levyn muovausta, jossa materiaalin virtaus on estetty. Venytysmuovausta käytetään muuan muassa arkkitehtonisissa koristeosissa sekä lentokoneiden osissa. Venytysmuovausta käytetään silloin, kun halutaan tehdä osia tai tuotteita, joilla on suuri pyörityssäde.

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

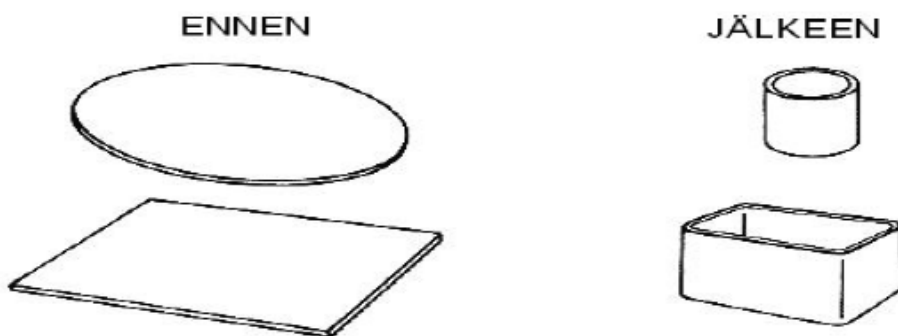
Yksinkertaisimmillaan venytysmuovattavuutta voidaan tutkia Erichsenin kokeella. Kokeen avulla saadaan määritettyä venytysmuovattavuutta kuvaava parametri, Erichsenin

luku. Mitä suurempi on IE -luku, sitä parempi venytysmuovattavuus materiaalilla on. (Kivivuori 2011, 24; Vierelä 2012, 7.)



Kuva 2. Kaaviokuva venytysmuovauksesta. Aihion reunojen luistaminen on estetty vetorenkkaan ja levynpidättimen avulla. (Kivivuori 2006, hakupäivä 6.3.2014.)

Syvävedossa levyaiho muovataan yleensä kuppimaiseksi tai astiamaiseksi tuotteeksi ja aihion seinämänpaksuutta ei tarkoituksellisesti muuteta. Vedon aikana aihio liukuu pidätinlevyn ja vetorenkkaan välistä painimen pakottamana ja tällöin muovautuu vetorenkkaan pyöristyksen yli kuppimaiseksi tuotteeksi (kuva 3). (Kivivuori 2006, hakupäivä 6.3.2014.)



Kuva 3. Kaaviokuva syvävedosta (Kivivuori 2006, hakupäivä 6.3.2014).

3 TERÄSTEN MUOVATTAVUUSOMINAISUUDET

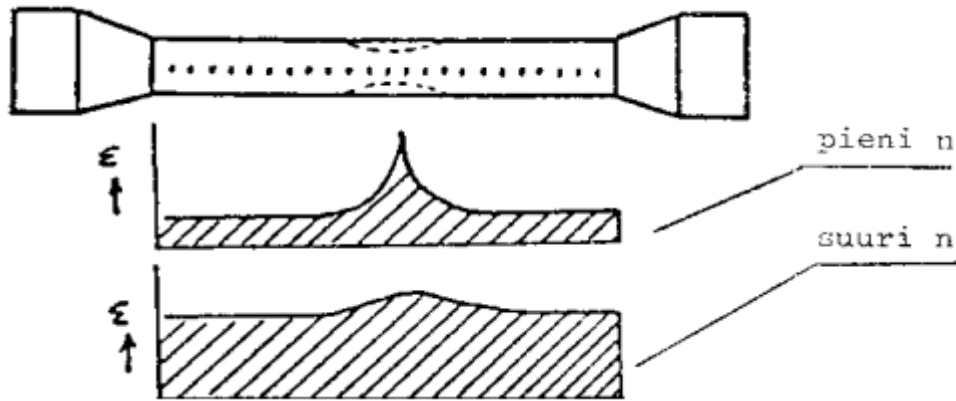
3.1 Mekaaniset ominaisuudet

Teräksen muovaamisen lähtökohtana on pääseminen plastisen muodonmuutoksen alueelle. Tämän takia myötörajalta ja myötölujuuden $R_{p0,2}$ ylittämällä on suuri merkitys muovaamisen kannalta. 0,2 nimitys kuvaa jännitystä, jolla saadaan aikaan 0,2% pysyvä muutos. Terästen myötörajaan voidaan vaikuttaa esimerkiksi seostusta muuttamalla ja termomekaanisesti valssaamalla.

Murtolujuus R_m tarkoittaa rajaa, jonka jälkeen esimerkiksi vetokokeessa käytettävä koesauva alkaa kuroutua ja lopulta katkeaa. Myötösuhde $R_{p0,2}/R_m$ kuvaa usein aineen sitkeyttä. Joissakin käyttösovelluksissa arvoa 0,7 pidetään jo riittävänä sitkeytenä, mutta mitä lähempänä ykköstä sitä parempi. Sitkeyden ilmaisemiseen voidaan käyttää myös murtovenymää A_5 . Murtovenymä ilmoitetaan prosentteina alkuperäisesti mittapituudesta. Murtovenymä on helppo määrittää ja siksi hyvä työkalu sitkeyden vertaamiseen. Mekaaniset ominaisuudet voidaan määrittää vetokokeella. (Juntunen 2010, 20; Vierälä 2012, 9.)

3.2 Muokkauslujittumiseksponentti n

Muokkauslujittumiseksponentti n kuvaa venytysmuovattavuutta. Mitä suurempi n -arvo on, sitä suurempi lujittuminen teräksellä on. Näin ollen terästuotteen voi venyttää ohuemmaksi sen murtumatta. Kun materiaalilla on hyvä n -arvo, venyminen laajenee isommalle alueelle, kun taas huonomman n -arvon omaavassa materiaalissa tapahtuu venymistä enemmän yhdessä paikassa ja ratkeamisen vaara on suurempi (kuva 4). (Vierälä 2012, 10.)



Kuva 4. Muokkauslujittumisen vaikutus materiaalin venymään. (Vierelä 2012, 10).

3.3 Erichsenin luku IE

Kun tutkitaan materiaalin venytysmuovattavuutta, käytetään yleisesti Erichsenin koetta. Erichsenin kokeen tuloksena saadaan Erichsenin luku IE, joka on venytysmuovattavuutta kuvaava parametri. Mitä suurempi IE luku on, sitä parempi venytysmuovattavuus materiaalilla on. (Kivivuori 2011, hakupäivä 13.3.2014.)

Erichsenin testissä painetaan vastinrenkaan ja pitimen välissä olevaa koekappaletta pallomaisella painimella kunnes koekappaleeseen tulee valon läpäisemä läpimurtuma. Testin tulos saadaan mittaamalla painuman syvyys painimen liikkeen perusteella. Testissä tulee suorittaa vähintään kolme samanlaista painantaa, jotta voidaan laskea painumien syvyyksien keskiarvo eli Erichsenin luku. (Vierelä 2012, 16.)

3.4 Plastinen venymäsuhde r

Plastinen venymäsuhde r määritetään vetokokeella. Venymäsuhde on vetokokeessa tapahtuvan poikittais- ja paksuussuuntaisen venymän suhde. Vetosauvaan piirretään venymäsuhteen määrittämistä varten venymämittausmerkit, joista pitkittäinen ja poikittainen venymä voidaan mitata. Venymämittausmerkkien avulla voidaan laskea plastinen venymäsuhde r . Arvon ollessa 1, venyy materiaali joka suuntaan saman verran ja sitä kutsutaan isotrooppiseksi. Muovauksen kannalta parasta kuitenkin olisi anisotrooppinen materiaali, jolla r -arvo on 1,6-1,9. Anisotrooppisesta materiaalista voidaan vetää syvempiä tuotteita. (Kivivuori 2011, hakupäivä 13.3.2014.)

3.5 Rajavetosuhde LDR

Rajavetosuhdetta pidetään syvävedettävyyden mittana ja se riippuu huomattavasti materiaalin r -arvosta. Mitä suurempi on materiaalin r -arvo, sitä suurempi on myös rajavetosuhde. Korkeilla r -arvoilla ja suurilla rajavetosuhteilla voidaan valmistaa syvempiä ja vaikeamuotoisimpia tuotteita. Rajavetosuhde voidaan määrittää syvävetokokeilla. Rajavetosuhde LDR on suurimman mahdollisen aihion halkaisijan D suhde syvävedetyn ehjän kupin halkaisijaan d (kuva 5). (Kivivuori 2011, hakupäivä 13.3.2014.)

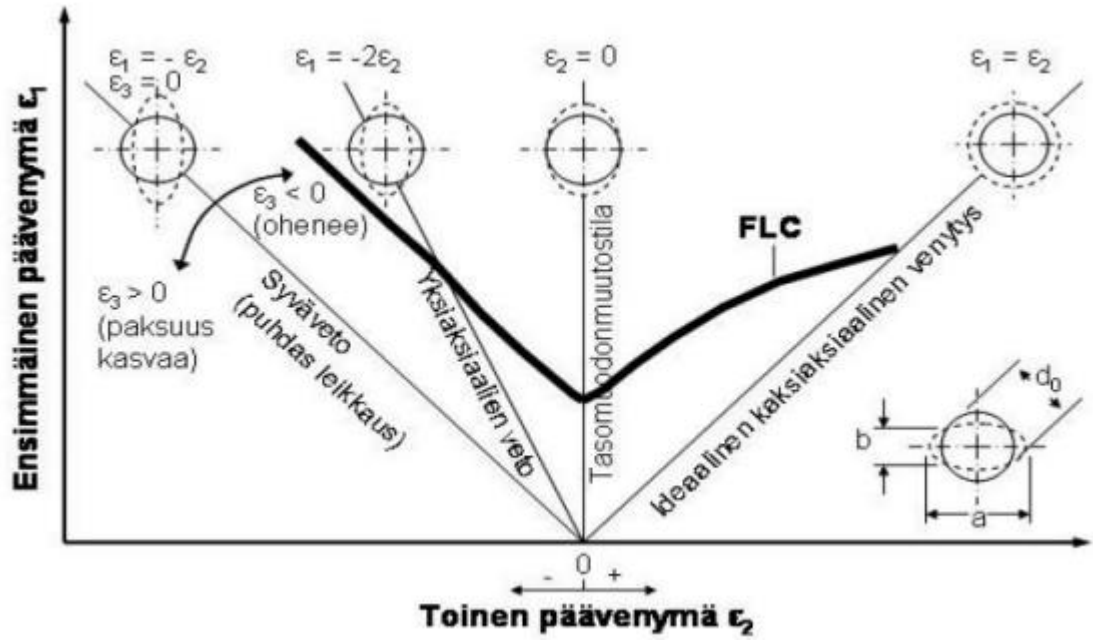


Kuva 5. Suurin aihio, joka on voitu vetää ehyeksi kupiksi (Kivivuori 2011, hakupäivä 13.3.2014).

3.6 Rajamuovattavuuspiirros FLC

Rajamuovattavuuspiirroksen avulla voidaan myös kuvata teräksen muovattavuutta. Piirrosta voidaan käyttää apuna esimerkiksi muovausongelmien ratkaisemisessa, materiaalin valinnassa sekä valmistettavuuden arvioinnissa. Yleensä piirros piirretään päävenymäkoordinaatistoon. Koordinaatiston pystyakselilla on ensimmäinen päävenymä ϵ_1 ja vaaka-akselilla toinen päävenymä ϵ_2 . Positiivinen arvo kuvaa venyttävää muodonmuutosta, rajamuovattavuuspiirroksen pystyakselin oikeanpuoleista puoliskoa kutsutaankin venytysmuovauspuoleksi. Negatiivinen arvo taas merkitsee puristavaa muodonmuutosta. Piirroksen vasenta puoliskoa kutsutaan syvävetopuoleksi. Käyrän alapuolella tapahtuva muokkaus muokkaa kappaletta sen vaurioitumatta. (Martikainen 2006, hakupäivä 26.3.2014.)

Rajamuovattavuuskäyrä määritetään mittaamalla rajavenymät tietyllä tavalla muovatuista koekappaleista. Nykyään mittaamiseen käytetään mittauslaitteistoja, jotka mittaavat venymät ja laskevat tulokset muovaustapahtumista. (Vierelä 2012, 15.)

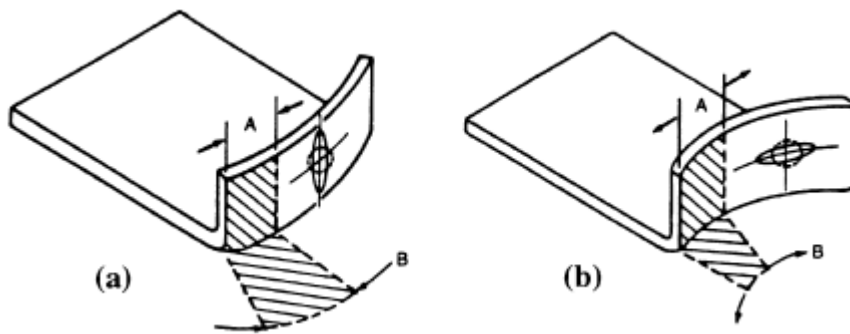


Kuva 6. Rajamuovattavuuspiirros (Martikainen 2006, hakupäivä 26.3.2014).

4 VENYTYSSÄRMÄTTÄVYYS JA SEN TESTAAMINEN

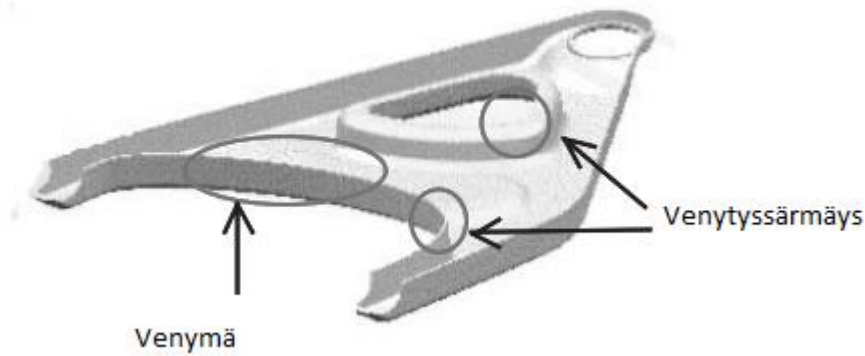
4.1 Venytyssärmättävyys

Terästen muovattavuuden tutkimisesta on tullut tärkeää, koska niitä käytetään yhä useammin muun muassa autoteollisuudessa. Nimitystä venytyssärmäys (englanninkielinen alkuperäinen termi on ”stretch flangeability”) käytetään alueilla, missä venymä on metallin reunassa ja näin ollen reuna on altis repeytymiselle. Termille ”stretch flanging” ei ole aiemmin esitetty suomenkielistä vastinetta – ”venytyssärmäys” termiä on alettu käyttää tässä opinnäytetyössä ja se ei ole vielä virallisesti hyväksytty termi. Kuvassa 7 nähdään periaatekuva venytys- ja puristussärmäystä osasta. Kuten kuvasta 7 näkyy, venytyssärmäyksessä elementti A on vetojännityksen alainen, kun taas puristussärmäyksessä siihen kohdistuu puristusjännitys.



Kuva 7. Ero a) puristussärmäyksen ja b) venytyssärmäyksen välillä (Asnafi 1999, 199).

Venytyssärmättävyydestä on tullut tärkeä muovattavuuden arvioinnin parametri veto-ominaisuuksien lisäksi, etenkin kun muovataan monimutkaisia autojen runko-osia tai osia voimakkaissa muovausolosuhteissa. Tyypillisiä esimerkkejä venytyssärmäyksestä autoteollisuudessa ovat ikkunapaneelien kulmat ja piilotetut nivelet. Niiden säde laajenee muovattaessa ja mukana on venytyssärmäystä tai reiänlaajennusta (kuva 8). (Gutiérrez, Escaler, Lara, Casellas & Prado 2011, 1.)



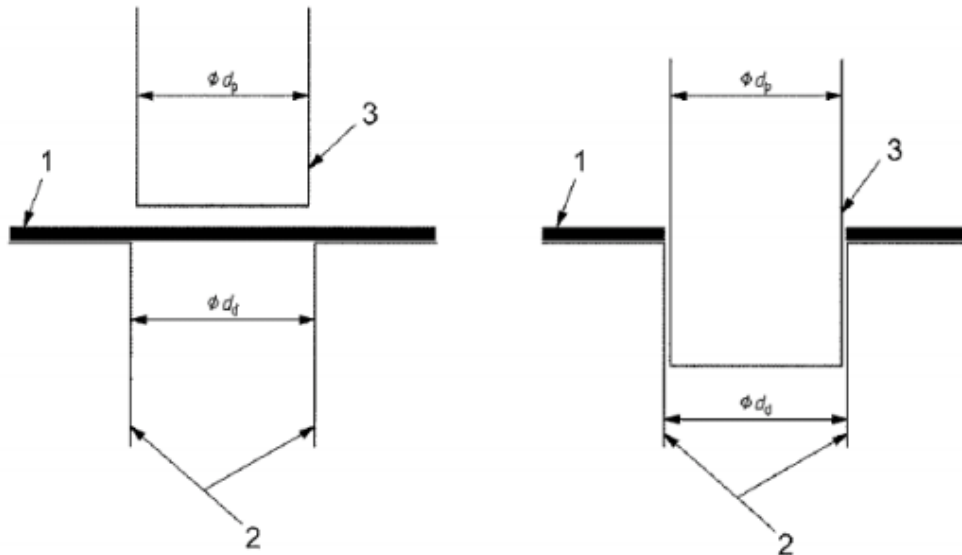
Kuva 8. Venytyssärmättyjä alueita auton alustan osassa (Takahashi, Hayashida, Taniguchi, Kawano & Okamoto 2003, 11).

Levynmuovauksessa on usein alueita, joita ei voida arvioida ja testata määrittämällä rajamuovattavuuspiirros. Levyn särmän muodonmuutoskyky eli venytyssärmättävyys on useissa levynmuovaustöissä muovattavuutta rajoittava tekijä ja sitä voidaan mitata reiänlaajennustestillä. Reiänlaajennustesti on tärkeä myös selvittäessä materiaalin käyttäytymistä, kun muovattaviin kappaleisiin halutaan tehdä reikiä sekä se on lähimpänä olosuhteita, jotka voivat esiintyä tuotantoympäristöissä. Reiänlaajennuskyky on siis tärkeä muovattavuuden parametri veto-ominaisuuksien rinnalla etenkin monimutkaisten autojen runko-osien valmistuksessa ja voimakkaissa muovausolosuhteissa. (Gutiérrez, Escaler, Lara, Casellas & Prado 2011, 1.)

Edellä mainittujen ominaisuuksien testausmenetelmät käsittävät kaksi perättäistä muovausprosessia, reiän lävistyksen ja reiänlaajennuksen. Reiänlaajennusmenetelmiä on olemassa erilaisia. Tässä työssä testaus tehtiin ISO 16630 standardin mukaisesti tai paljon autoteollisuudessa käytetyllä KWI-reiänlaajennusmenetelmällä. Testit eroavat toisistaan muun muassa painimen muodon perusteella. (Akola 2013, 10.)

4.2 ISO-standardin mukainen reiänlaajennusmenetelmä

Reiänlaajennustestille on olemassa standardi ISO 16630. Reiänlaajennustestiä käytetään 1,2-6 mm vahvaisille metallinauhoille ja -levyille, joiden leveys on vähintään 90 mm. Testi on kaksivaiheinen ja ensimmäisessä vaiheessa suoritetaan reiänlävistys standardin mukaisen työkalun avulla (kuva 9). (Vierelä 2012, 23.)

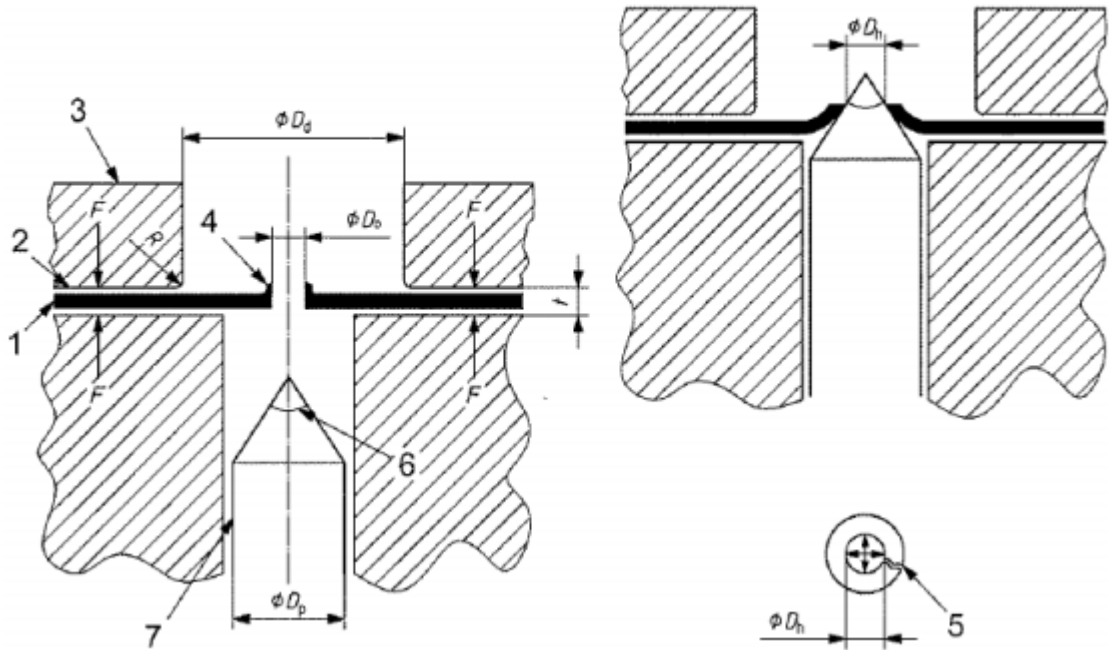


Kuva 9. Reiänlävistyksen periaatekuva ennen lävistystä ja lävistyksen jälkeen. 1=koekappale, 2=tyyny, 3=lävistin, d_p =lävistimen halkaisija, d_d =tyynyn sisähalkaisija (Vierelä 2012, 24).

Reiänlaajennustestin toisessa vaiheessa reikää laajennetaan kartionmuotoisella painimella (kuva 10). Jotta materiaalin virtaaminen saadaan estettyä, testauksessa tulee käyttää tarpeeksi suurta pidätinvoimaa. Kun havaitaan murtuma, joka on edennyt levyn paksuuden läpi, tulee kartion liike pysäyttää välittömästi. Koekappaleesta mitataan reiän halkaisija D_h kahdesta eri kohdasta ja niiden keskiarvolla lasketaan reiänlaajennussuhde käyttämällä kaavaa 1 (Vierelä 2012, 24.)

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

,missä λ on reiänlaajentumissuhde [%], D_h reiän halkaisija laajennuksen jälkeen [mm] ja D_0 kuvaa reiän halkaisijaa ennen koetta [mm].

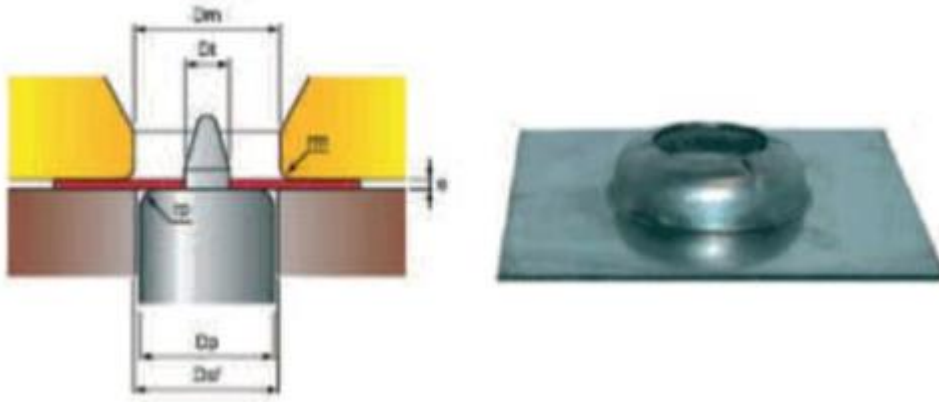


Kuva 10. Periaatekuva reiänlaajennustestistä ennen laajennusta ja sen jälkeen. 1=koekappale, 2=vetorengas, 3=vetorengaan vastinpinta, 4=lävistys, 5=murtuma, 6=purse, D_d =vetorengaan sisähalkaisija, D_p =lävistimen alahalkaisija, D_h =reiän halkaisija murtuman jälkeen (Vierelä 2012, 25).

4.3 KWI-reiänlaajennusmenetelmä

KWI-reiänlaajennuskokeessa käytetään tylppää paininta. Painimen kärjessä on kohdistustappi, joka auttaa näytelevyn kohdistamisessa keskelle paininta. KWI-menetelmää voidaan käyttää metallinauhoille ja –levyille, joiden vahvuus on 1,2-3 mm ja vähimmäisleveys 100 mm. Testilevyn pituus tulee valita siten, että levyyn mahtuu vähintään kolme reiänlaajennuskoetta. Reunimmaisten reikien tulee olla vähintään 100 mm päässä levyn reunasta ja reikien keskipisteiden etäisyys toisistaan vähintään 150 mm.

KWI-reiänlaajennus suoritetaan ISO-standardin mukaisen testin tavalla kahdessa vaiheessa. Testin ensimmäisessä vaiheessa lävistetään levyyn reikä samalla työkalulla kuin ISO – standardin mukaisessa testissä. Tämän jälkeen suoritetaan testin toinen vaihe edellä mainitulla tylpällä painimella. Paininta työnnetään niin pitkälle, kunnes huomataan aineen paksuuden läpi menevä murtuma. (Akola 2013, 12.)



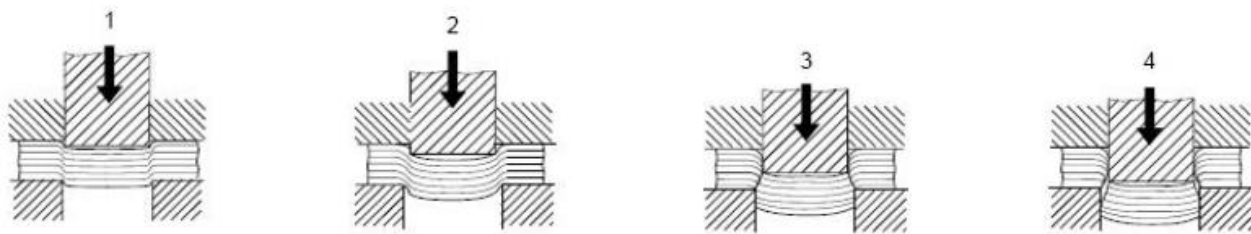
Kuva 11. KWI-reiänlaajennuskokeen alkutilanne sekä laajennettu reikä (Akola 2013, 12).

5 REIÄN LÄVISTYS JA LEIKKAUSREUNA

5.1 Lävistysprosessi

Reiän lävistystapahtuma voidaan jakaa neljään eri vaiheeseen lävistysprosessin etene-
misen mukaisesti. Lävistyksen ensimmäisessä vaiheessa pistin kohtaa levyn pinnan ja
alaspäin edetessä aiheuttaa levyyn elastista muodonmuutosta. Kun myötölujuus ylittyy,
seuraa plastinen muodonmuutos. Tämän seurauksena levyn yläpinta painuu pysyvästi
alaspäin ja tällöin muodostuu pyöristynyt vajaasärmä reiän yläreunaan.

Lävistystapahtuman toisessa vaiheessa lävistettävän levyn muodonmuutoskyky ylittyy,
jolloin pistin tunkeutuu materiaaliin ja muodostuu säröjä. Terän tunkeutuminen materi-
aaliin aiheuttaa leikkauspintaan selvästi erottuvan kiillottuneen alueen. Tätä aluetta kut-
sutaan kiillottuneeksi vyöhykkeeksi tai leikkausvyöhykkeeksi. Leikkausvyöhykkeen
kokoon vaikuttavat lävistyksessä käytetty leikkausväly, levyn paksuus sekä materiaalin
ominaisuudet, kuten murtolujuus ja sitkeys. Leikkausprosessin kolmannessa ja neljän-
nessä vaiheessa tapahtuu lopullinen leikkautuminen kun materiaaliin syntyneet säröt
kohtaavat toisensa ja pistin lävistää materiaalin. (Kutuniva 2011, 13.)



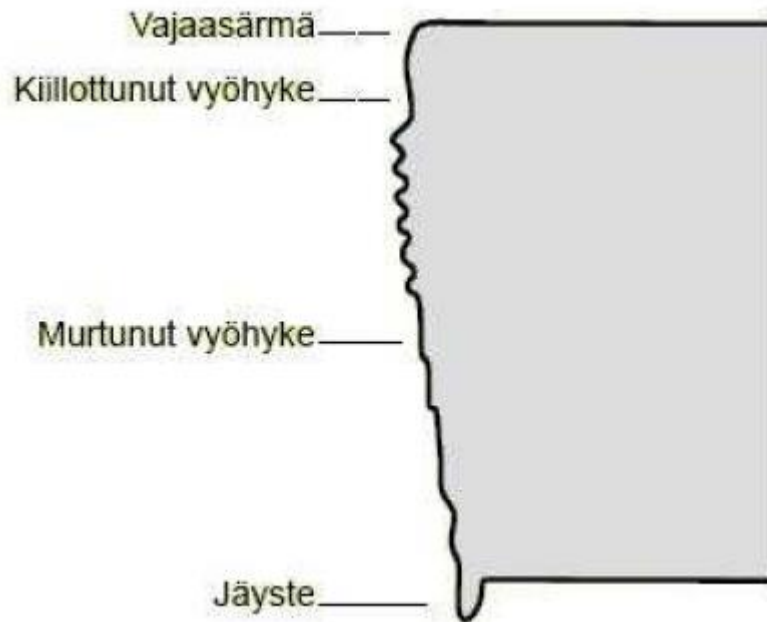
Kuva 12. Lävistysprosessin vaiheet: 1) elastinen ja plastinen muodonmuutos, 2) leik-
kautuminen, 3) murtuminen, 4) läpäisy (Kutuniva 2011, 13).

5.2 Leikkausreunan rakenne

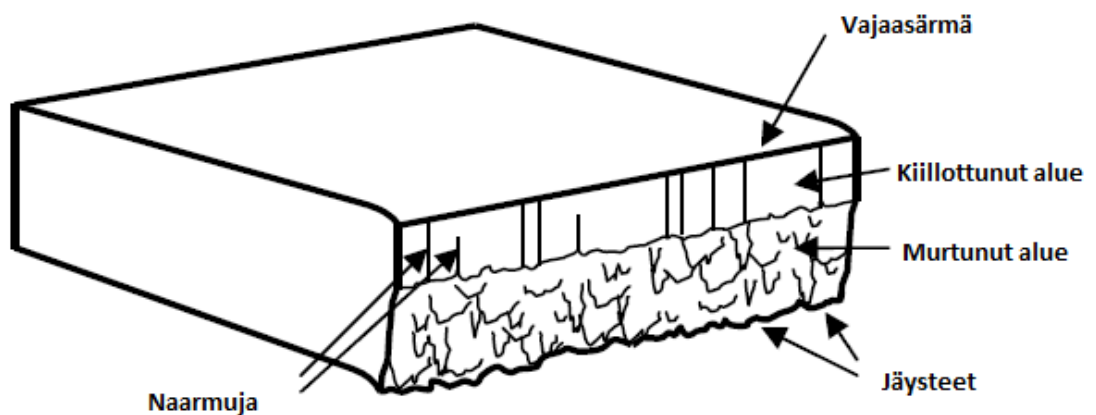
5.2.1 Leikkauspinnan osat

Leikkauksen alussa syntyy levyn yläpintaan pyöristynyt vajaasärmä plastisen muodon-
muutoksen seurauksena. Vastaava vajaasärmä muodostuu myös tyynyn vaikutuksesta
irti leikkautuvan osan alareunaan. Seuraava alue leikkauspinnassa on kiillottunut vyö-
hyke. Vyöhyke on seurausta pistimen tunkeutumisesta materiaaliin.

Laajin alue, jonka erottaa leikkauspinnasta, on murtunut vyöhyke. Se syntyy materiaaliin säröjen etenemisen suuntaisesti. Viimeinen leikkauspintaan muodostuva osa on jäyste, joka syntyy lävistetyin reiän alareunaan ja irtoavan levyosan yläreunaan. (Kutuniva 2011, 14.)



Kuva 13. Leikkauspinnan osat (Kutuniva 2011, 14).



Kuva 14. Leikkauspinnan osat (Col & Jousserand 2008, 203).

5.2.2 Leikkaukselle altistunut alue SAZ

Leikkausprosessissa syntyy kaksi selvästi havaittavaa mutta toisiinsa liittyvää vauriota: leikkauspinta, johon kuuluu vajaasärmä, kiillottunut ja murtunut alue ja jäyste sekä leikkaukselle altistunut alue. Leikkaukselle altistunut alue tuottaa leikatun pinnan ja leikkauspinnan taakse muodonmuutosvyöhykkeen ja tätä kokonaisuutta kutsutaan leikkaukselle altistuneeksi vyöhykkeeksi eli Shear Affected Zoneksi SAZ.

Leikkaukselle altistunut alue on teräksessä alue, johon on kohdistunut huomattavaa plastista muodonmuutosta. Verrattuna perusaineeseen leikkaukselle altistuneella alueella on erilaiset ominaisuudet ja alue vaikuttaa venymisen etenemiseen jo laajennuksen alkuvaiheessa. Leikkaukselle altistuneen alueen ja leikatun reunan kriittinen ero on se, että leikatussa reunassa ei esiinny samanlaista säteen suuntaista venymistä kuin leikkaukselle altistuneella alueella.

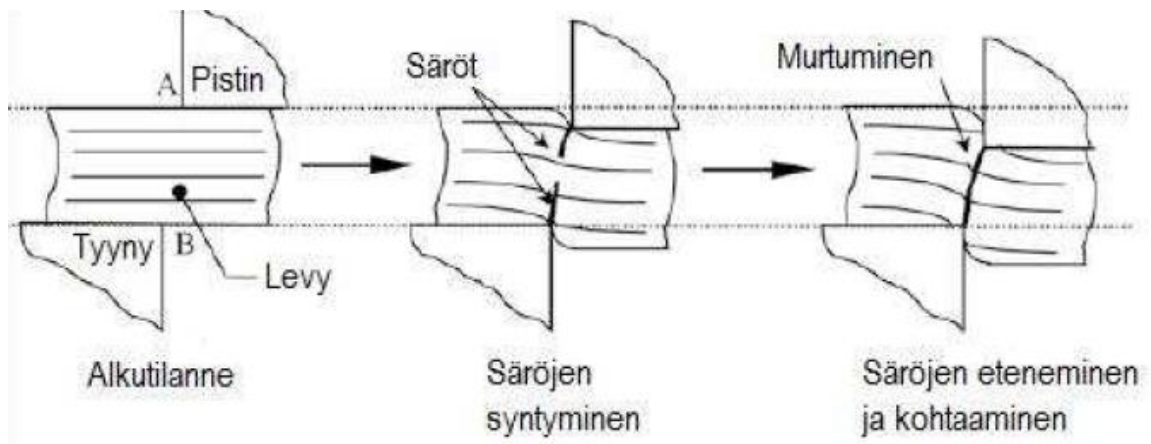
Leikkaukselle altistuneen pinnan syvyys määritetään kovuusmittauksen avulla mittamalla kovuudet leikkausreunasta pois päin kunnes kovuus ei enää nouse leikkaustapah-tuman vaikutuksesta. Lujittuneen alueen syvyys on noin 0.5 mm. Leikkaukselle altistuneella alueella on vaikutusta murtovenymään. Venymäpolun vaikutus leikkaukselle altistuneella alueella kuvaa sitä, että leikkaukselle altistuneella alueella olevat vahingot ovat tärkeitä määritettäessä venytyssärmäyksen epäonnistumista. (Van Tyne & Levy 2012, 60; Van Tyne & Levy 2008, 847.)

5.3 Leikkausvälyys

Yksi leikkausreunan laatuun vaikuttava tekijä on leikkausvälyys. Leikkausvälyksen valintaan vaikuttavat muun muassa levyn paksuus, haluttu leikkauspinnan laatu, materiaalin myötö- ja murtolujuus, lävistysnopeus sekä työkalun ominaisuudet. Perinteisissä lävistysprosesseissa leikkausvälykset ovat yleensä välillä 2-10 % levyn paksuudesta. Ohuille ja pehmeille materiaaleille käytetään yleisesti pienempiä leikkausvälyksiä kuin paksuille ja koville materiaaleille.

Optimaalisena leikkausvälyksenä voidaan pitää arvoa, milloin lävistyksessä syntyvä säröt kohtaavat toisensa suoraviivaisesti siten, että sekundäärisiä säröjä ei pääse muodostumaan (kuva 15). Optimaalisen leikkausvälyksen määrittäminen on usein hyvin

vaativaa ja mahdotonta siihen vaikuttavien tekijöiden lukumäärästä johtuen. Oikein määritetty leikkausvälys antaa hyvän mittatarkkuuden ja leikkauspinnan laadun. Pienemmän leikkausvälyksen etuna ovat hyvä leikkauspinnan laatu eli pieni murtunut vyöhyke. Liian pieni leikkausvälys aiheuttaa kuitenkin muun muassa huonosti irtoavan ja muokkauslujittuneen jäysteen. Liian suuri leikkausvälys puolestaan aiheuttaa suuren murtuneen vyöhykkeen. Tämän lisäksi suurta leikkausvälystä käytettäessä murtuneen ja kiillottuneen vyöhykkeen välinen kulma kasvaa, eli toisin sanoen reunan alaosa tulee kartiomainen.



Kuva 15. Optimaalinen leikkausvälys lävistyksessä (Kutuniva 2011, 16).

Leikkauspintaan muodostuvat toisistaan erotettavissa olevat vyöhykkeet syntyvät leikkauspintaan niin lujilla kuin pehmeämmilläkkin materiaaleilla, mutta vyöhykkeiden mittasuhteet ovat materiaalin lujuudesta riippuvia. Materiaalin murtolujuuden kasvaessa leikkauspinnan kiillottunut vyöhyke pienenee. Leikkausvälyksen suuruus vaikuttaa jäysteen muodostumiseen ja vajaasärmä ja murtunut vyöhyke kasvavat leikkausvälystä kasvatettaessa. (Kutuniva 2011, 16 – 18.)

Mekaanisesti leikatun reunan kiillottuneen ja murtuneen vyöhykkeen muodostuminen, koko ja niiden tyypilliset ominaisuudet ovat seurausta leikkausprosessin lävistysvaiheesta. Näiden kahden vyöhykkeen yhdistelmällä on vaikutusta mekaanisesti leikatun reunan muovausominaisuuksiin. Kun leikkausvälystä kasvatetaan, vyöhykkeiden koot muuttuvat suhteessa toisiinsa. Murtuneen vyöhykkeen koko voi olla tärkeä, jotta ymmärretään muokattavuutta, koska se on karkein alue ja siinä ilmenee jäljelle jääneet ve-tojännitykset. Murtuneen alueen koko on tärkeä tekijä myös siksi, että voidaan mitata ja määrittää muovattavuutta mahdollisimman laajasti. Löytämällä oikean välyksen, voi-

daan parantaa leikkausreunan pinnalaatua, mikä taas parantaa reunan muovattavuutta.
(Thomas 2013, 455.)

6 LEIKKAUSREUNAN LAADUN VAIKUTUS MUOVATTAVUUTEEN

Koska reiän tulee laajentua ilman että murtumia muodostuu, reiän leikatun reunan ominaisuudet vaikuttavat venytyssärmättävyyteen. Näin ollen murtumien muodostuminen tai liiallinen kovettuminen reiän ympärillä laskevat reiänlaajennussuhdetta. Leikkaustavan ja myös välyksen vaikutusta muovattavuuteen on tutkittu aikaisemmin. Tulokset osoittavat merkittäviä vaikutuksia teräksen vetolujuuteen sekä leikatun reunan lujittumisasteeseen laajennusprosessissa. (Gutiérrez ym. 2011, 9.)

Aikaisemmissa tutkimuksissa on todettu, että leikkausreunan pinnanlaadun paraneminen leikkausvälyksiä säätämällä parantaa venytyssärmättävyyttä. Kun murtunut vyöhyke on karkea ja jäyste terävä, murtumalla on taipumus esiintyä vetotilanteessa myöhemmässä venytyssärmäyksessä. Venytyssärmättävyys laskee alhaisen sitkeyden sekä myös leikatun reunan huonon pinnanlaadun takia. (Ken-ichiro, Yohei & Suzui 2012, 653.)

Myös leikkaukselle altistuneella alueella on vaikutusta venytyssärmättävyyteen. Reiänlaajennuksessa syntynyt murtuma riippuu leikkausprosessista, metalliin välittyneestä muodonmuutoksesta ja myöhemmän laajennuksen aikana leikkaukselle altistuneen vyöhykkeen koosta. Siitä huolimatta, että leikkausreunaa ja sen osia on tutkittu monilla tutkimuksilla, leikkauksessa altistuneeseen alueeseen syntynyt muodonmuutos näyttää vaikuttavan oleellisesti leikatun reunan kykyyn laajentua. Sitä on kuitenkin tutkittu vähän, joten ei ole tarkkaa tietoa kuinka leikkaukselle altistunut alue vaikuttaa muovattavuuteen. (Van Tyne & Levy 2012, 60.)

Reiän leikkausreunan ominaisuudet vaikuttavat venytyssärmättävyyteen, jossa reiän pitäisi laajentua muodostamatta halkeamia. Näin ollen murtuman muodostuminen tai liiallinen lujittuminen reiän ympärillä pitäisi laskea reiänlaajennussuhdetta. Leikkausreunan lujittuminen vaikuttaa reiänlaajennuskykyyn, joten mitä vähemmän on tapahtunut lujittumista, sitä parempi reiänlaajennuskyky on. Korkeat pinnankarheusarvot vaikuttavat myös reiänlaajennuskykyyn laskevasti, koska murtumat voivat helposti ydintyä karkeissa pinnoissa. (Gutiérrez ym. 2011, 10.)

7 KOEMATERIAALIT JA -MENETELMÄT

7.1 Koemateriaalit

Ruukki Metals Oy oli jo aikaisemmin toimittanut paksuudeltaan T=3mm koemateriaaleja aikaisempia projekteja ja tutkimuksia varten ja jäljelle jääneistä materiaaleista leikattiin näytteitä levyleikkurilla Torniossa JaloteräsStudiolla annettujen ohjeiden mukaisesti. Taulukoissa 1-2 on annettu tutkimuksissa käytettyjen materiaalien ohjeelliset kemialliset koostumukset ja mekaaniset ominaisuudet. Koeterästen 355 ja 420 koostumukset ovat pääpiirteissään samat kuin Laser -terästen. Opinnäytetyössä materiaalit ovat nimetty seuraavasti: koeteräs 355 = K355, koeteräs 420 = K420, Laser 355MC = L355 ja Laser 420MC = L420.

Taulukko 1. Laser- terästen kemialliset koostumukset (Ruukki Metals Oyn www-sivut, hakupäivä 1.4.2014).

Pitoisuus % (sulatusanalyysi)						
Teräslaji	C enintään	Si enintään	Mn enintään	P enintään	S enintään	Al vähintään
Ruukki Laser 250 C	0.12	0.03	1.20	0.020	0.020	0.015
Ruukki Laser 355 MC	0.12	0.03	1.50	0.020	0.015	0.015
Ruukki Laser 420 MC	0.12	0.03	1.60	0.020	0.015	0.015

Taulukko 2. Laser –terästen mekaaniset ominaisuudet (Ruukki Metals Oyn www-sivut, hakupäivä 1.4.2014).

	Paksuus mm		Myötölujuus R _{eH} N/mm ² Vähintään	Murtolujuus R _m MPa		Murtovenymä A ₅ % Vähintään	Iskusitkeys Pitkittäinen vähintään t °C Charpy V J	
	Nauhalevyt	Kvarttolevy		Nauhalevyt	Kvarttolevy			
Ruukki Laser 355 MC	2 - 15	10 - 30	355	430-530	430-530	24 ²⁾	-20	40
Ruukki Laser 420 MC	2 - 13	10 - 25	420	490-590	490-590	21 ³⁾	-20	40

7.2 Leikkausvälyksien vaihtelu ja näytteiden valmistus

Leikkausvälyksen vaikutusta leikatun reunan pinnanlaatuun tutkittiin leikkaamalla 500x50 mm² kappaleita pitkittäin (pi) ja poikittain (po) valssaussuuntaan nähden eri välyksillä. Levyjen leikkaus suoritettiin Hakomec-levyleikkurilla JaloteräsStudiolla

Torniossa. Lähtötilanteessa levyleikkuriin asetettiin levynpaksuudeksi 2 mm ja asetusta nostettiin millimetrin välein kuuteen (6) millimetriin asti. Tällöin välys suureni paksuutta nostettaessa (Taulukko 3). Välyksien mittaamiseen käytettiin rakotulkkia.

Taulukko 3. Käytetyt leikkausvälykset.

Paksuus	K355	L355	K420	L420
2mm	0,26	0,26	0,26	0,26
3mm	0,34	0,40	0,34	0,39
4mm	0,40	0,42	0,40	0,42
5mm	0,45	0,58	0,45	0,53
6mm	0,63	0,66	0,63	0,66

Eri välyksillä leikatuista testilevyistä valmistettiin näytteet kovuusmittauksia ja metallografiaa varten. Lisäksi näyteleikkurilla leikattiin sopivat näytteet myös FESEM - tutkimuksia ja laserprofilometriä varten. Leikatut näytteet valettiin Stuers CitoPress-1 valukoneella, jossa käytettiin valujauheena PolyFastia. Tämän jälkeen hieet hiottiin SiC-vesihiomapapereilla karkeuksilla grit 220, 320, 500, 800 ja 1000 sekä kiillotettiin Struers:n Mol-kankaalla +3 μm :n timanttisuspensiolla ja Nap-kankaalla +1 μm :n timanttisuspensiolla. Näytteet syövytettiin 3%:lla nitalilla 6 sekunnin ajan. Laserprofilometrinäytteet pestiin ultraäänipesurissa. Näytteistä mitattiin myös Leican MZ16 stereomikroskoopilla kiillottuneen alueen koko ottamalla kuva leikkauspinnasta, jonka jälkeen lisättiin mittajana.

7.3 Leikkausreunan alueet

Leikkausreunasta määritettiin kiillottuneen alueen suuruus [mm] mittaamalla ne stereomikroskoopilla. Tulokset taulukoitiin leikkausvälyksen suuruuden mukaiseen järjestykseen.

7.4 KWI-reiänlaajennustesti

Koemateriaaleille tehtiin KWI – reiänlaajennustesti Erichsen 145-60 ohutlevyjen muovattavuustutkimuslaitteella. Testi suoritettiin ISO 16630 standardin mukaisesti muiden paitsi painimen osalta, joka oli KWI – testissä käytettävä tylppä painin, jonka päässä on kohdistustappi. Testiä varten leikattiin jokaisesta materiaalista kaksi 150x500 mm ko-

koista näyteaihiota poikittain valssaussuuntaan nähden. Näyteaihioihin lävistettiin kolme reikää 100, 200 ja 450 millimetrin kohdalle 75 mm päähän reunasta.

7.5 Kovuusmittaukset

Kovuusmittaukset suoritettiin Vickersin menetelmällä (HV 0,2) jokaiselle laadulle Matsuzawan MMT-X mikrokovuusmittarilla, jossa kuormana käytettiin 0,2 kgf (kilogram-mavoima, SFS-EN ISO 6507-1). Kovuudet mitattiin reunasta, jonne oli syntynyt jäyste leikkausprosessin seurauksena. Mittaukset suoritettiin viidestä eri kohdasta 0,1 mm:n välein edeten leikkausreunasta perusaineeseen päin. Tarkoituksena oli selvittää kovuuden vaikutusta tutkittujen terästen reiänlaajennuskykyyn. Lisäksi jokaisesta koemateriaalista mitattiin perusaineen kovuus kolmen kohdan keskiarvona.

7.6 Mikrorakennetutkimukset

Tutkittujen terästen leikkausreunalle ja perusaineelle tehtiin valomikroskooppitutkimus mahdollisten mikrorakenne-erojen selvittämiseksi. Laitteena toimi Leican DMI5000M valomikroskooppi. Lisäksi haluttiin selvittää välyksen vaikutusta mikrorakenteeseen. Mikrorakenteita kuvattiin 200 -kertaisella suurennoksella.

7.7 Pinnankarheudet

Pinnankarheusmittaukset suoritettiin NanoFocus - laserprofilometrillä. Karheudet mitattiin leikkausreunan kiillottuneesta ja murtuneesta alueesta. Mittauksia tehtiin yhteensä kuudesta kohdasta: kiillottuneesta ja murtuneesta alueesta molemmista reunoista sekä keskeltä, 3mm x 0,2-0,5mm alueelta riippuen kiillottuneen alueen koosta (kuva 16).



Kuva 16. Pinnankarheuksien mittauskohdat.

8 TULOKSET

8.1 Leikkausvälyksen vaikutus kiillottuneen alueen suuruuteen

Taulukossa 4 on annettu leikkausreunaan syntyneen kiillottuneen alueen koko eri leikkausvälysten arvoilla. Tulokset ovat annettu millimetreinä. Yksi mittaus edustaa viiden (5) mittauksen keskiarvoa.

Taulukko 4. Leikkausvälyksen vaikutus kiillottuneen alueen kokoon.

Välys [mm]	Kiillottuneen alueen suuruus [mm]			
	K355	L355	K420	L420
0.26	1.25	1.04	1.16	0.88
0.34	1.07		1.12	
0.39				0.8
0.4	0.85	0.92		
0.42		0.71		0.87
0.45	1.06		0.88	
0.5			0.9	
0.53				0.7
0.58		0.64		
0.63	0.86		0.8	
0.66		0.6		0.69

8.2 KWI-reiänlaajennus

Taulukoissa 5-8 on annettu KWI-reiänlaajennuskokeen tulokset tutkituille teräksille. Kaikissa kokeissa käytetty alkureiän halkaisija oli $\varnothing = 10\text{mm}$, muovausnopeus $v = 15\text{ mm/min}$ ja pidätinvoima $F = 600\text{ kN}$. Taulukkojen mukaan reiänlaajennussuhde vaihteli välillä 55.5 – 72.2 % ja suurin muovausvoima välillä 15.55 – 17.22 kN.

Taulukko 5. KWI-reiänlaajennuskokeen tulokset teräkselle K355.

Testi n:ro	Teräs	Muovausvoima max. [kN]	D_h [mm]	Suhde λ [%]
1	K355	191	16.32	63.2
2	K355	190	16.52	65.15
3	K355	187	16.22	62.15
4	K355	188	16.32	63.2
5	K355	187	16.05	60.5
6	K355	191	16.31	63.1
k.a.:		189	16.29	62.9

Taulukko 6. KWI-reiänlaajennustestin tulokset teräkselle L355.

Testi n:ro	Teräs	Muovausvoima max. [kN]	D_h [mm]	Suhde λ [%]
1	L355	197	16.87	68.7
2	L355	197	16.53	65.25
3	L355	195	16.37	63.7
4	L355	193	16.61	66.05
5	L355	195	17.12	71.15
6	L355	195	17.22	72.2
k.a.:		195	16.78	67.8

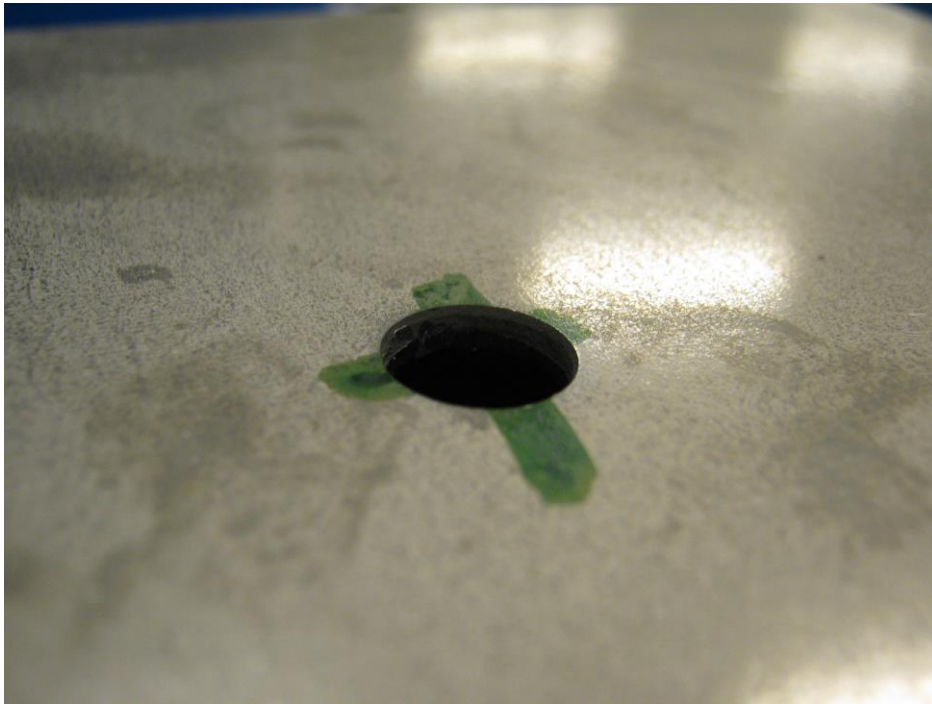
Taulukko 7. KWI-reiänlaajennustestin tulokset teräkselle K420.

Testi n:ro	Teräs	Muovausvoima max. [kN]	D_h [mm]	Suhde λ [%]
1	K420	206	15.78	57.8
2	K420	205	15.75	57.5
3	K420	201	15.55	55.45
4	K420	203	15.85	58.45
5	K420	209	16.07	60.7
6	K420	209	15.88	58.75
k.a.:		205	15.81	58.1

Taulukko 8. KWI-reiänlaajennustestin tulokset teräkselle L420.

Testi n:ro	Teräs	Muovausvoima max. [kN]	D_h [mm]	Suhde λ [%]
1	L420	198	16.66	66.55
2	L420	200	17.12	71.15
3	L420	192	16.54	65.35
4	L420	200	16.38	63.75
5	L420	198	16.56	65.55
6	L420	197	16.22	62.2
k.a.:		197	16.58	65.8

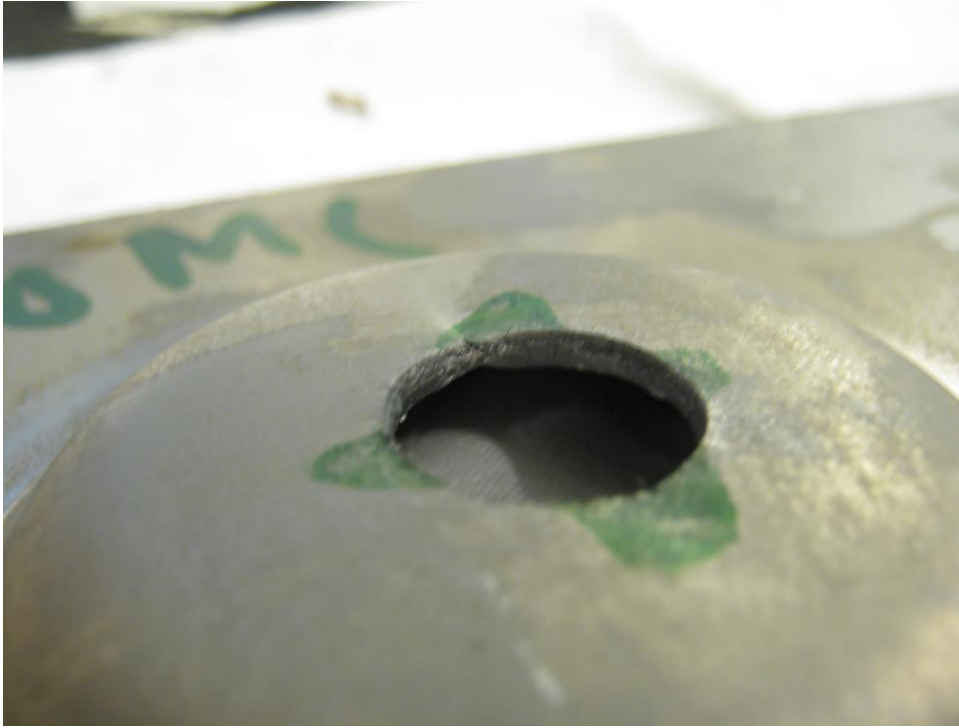
Kuvassa 17 nähdään halkaisijaltaan $\varnothing = 10\text{mm}$ pistimellä tehty esireikä näytelevyssä ja kuvassa 18 teräksen L355 näytelevy KWI-testin jälkeen. Kuvassa 19 nähdään ainepaksuuden lävistävä murtuma KWI-testin jälkeen.



Kuva 17. Näytelevyyn painettu reikä.



Kuva 18. KWI-reiänlaajennustesti suoritettu Laser 355MC:lle.



Kuva 19. Murtuma laajennuksen jälkeen.

8.3 Kovuusmittaukset

Taulukoissa 9-12 on esitetty kovuusmittausten välittömät tulokset eri välyksillä leikatuille koemateriaaleille niin pitkittäin kuin poikittain valssaussuuntaan nähden sekä perusaineen kovuus kullekin koemateriaalille.

Taulukko 9. Leikkausreunan kovuudet teräkselle K355.

Etäisyys reunasta [mm]	0.26mm Pi	0.26mm Po	0.34mm pitk	0.34mm poikit	0.40mm Pi	0.40mm Po	0.45mm Pi	0.45mm Po	0.63mm Pi	0.63mm Po
0.1	376	350	353	334	357	335	347	341	364	332
0.2	247	310	286	299	297	306	336	321	330	332
0.3	221	242	223	249	253	271	303	321	285	288
0.4	213	228	211	226	231	244	280	299	236	281
0.5	213	218	202	223	218	227	248	276	225	271
Perusaineen kovuus	178									

Taulukko 10. Leikkausreunan kovuudet teräkselle L355.

Etäisyys reunasta [mm]	0.26mm Pi	0.26mm Po	0.4mm Pi	0.4mm Po	0.42mm Pi	0.42mm Po	0.58mm Pi	0.58mm Po	0.66mm Pi	0.66mm Po
0.1	302	322	318	303	302	326	330	282	294	294
0.2	240	281	277	259	278	314	283	246	280	283
0.3	187	221	218	234	228	286	206	206	258	248
0.4	184	200	184	205	206	265	192	192	253	218
0.5	188	197	184	174	171	253	179	193	247	178
Perusaineen kovuus	167									

Taulukko 11. Leikkausreunan kovuudet teräkselle K420.

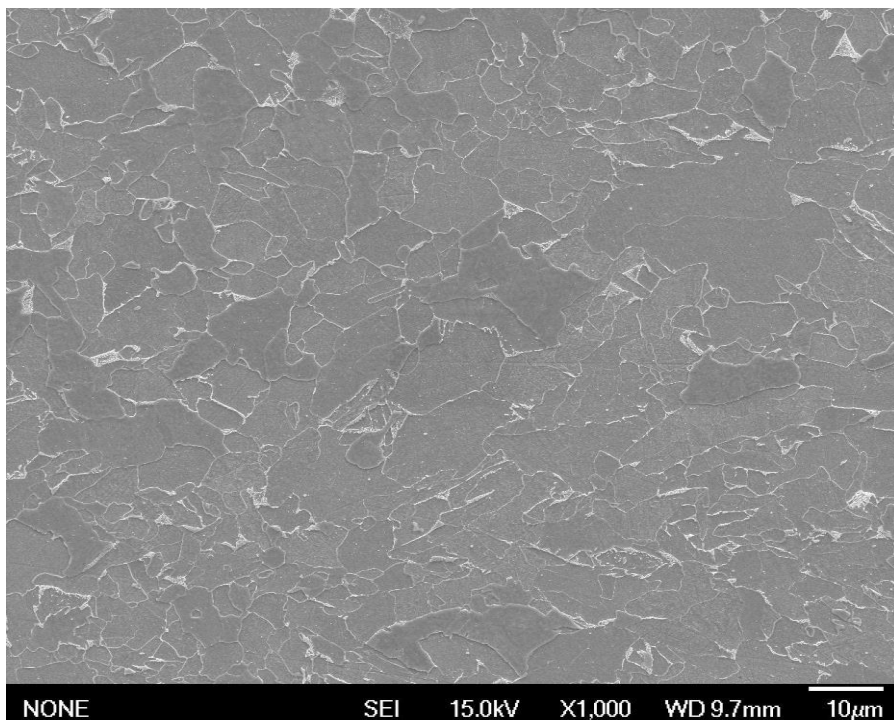
Etäisyys reunasta [mm]	0.26mm Pi	0.26mm Po	0.34mm Pi	0.34mm Po	0.40mm Pi	0.40mm Po	0.45mm Pi	0.45mm Po	0.63mm Pi	0.63mm Po
0.1	360	377	305	312	304	362	356	355	356	353
0.2	298	307	258	310	268	288	320	301	325	331
0.3	226	247	227	265	265	274	317	280	261	307
0.4	194	239	226	254	246	250	276	245	227	310
0.5	195	233	231	235	224	224	249	233	233	308
Perusaineen kovuus	187									

Taulukko 12. Leikkausreunan kovuudet teräkselle L420.

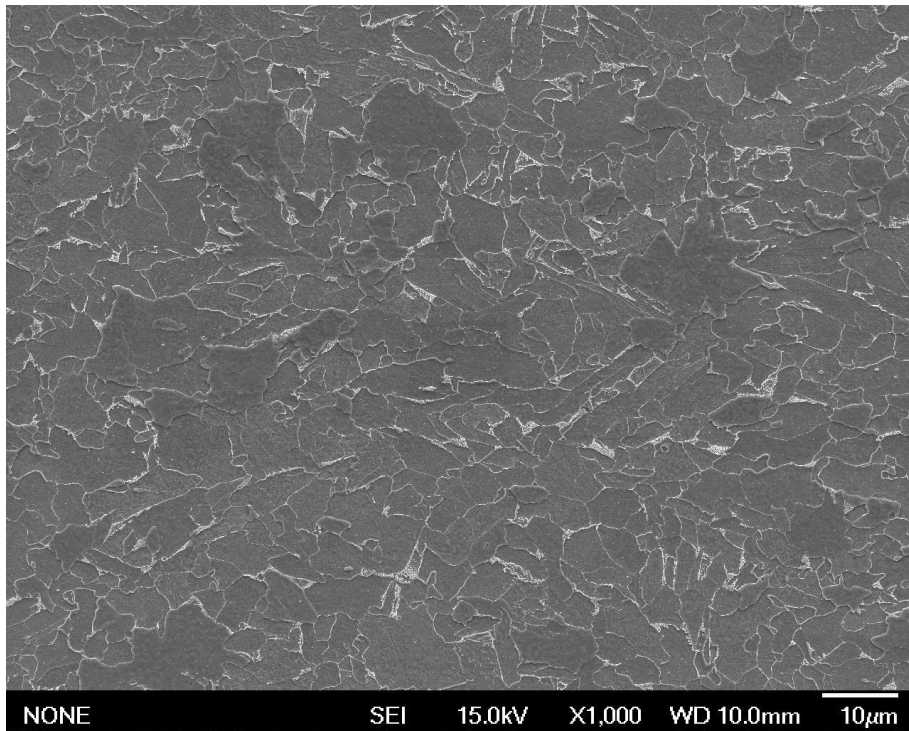
Etäisyys reunasta [mm]	0.26mm Pi	0.26mm Po	0.39mm Pi	0.39mm Po	0.41mm Pi	0.41mm Po	0.53mm Pi	0.53mm Po	0.66mm Pi	0.66mm Po
0.1	293	323	290	270	340	336	331	337	333	345
0.2	228	261	244	241	277	254	294	293	300	295
0.3	189	233	222	216	236	230	245	249	267	245
0.4	187	224	220	212	219	205	214	230	220	205
0.5	186	218	211	199	196	201	211	193	197	198
Perusaineen kovuus	179									

8.4 Mikrorakennetutkimukset

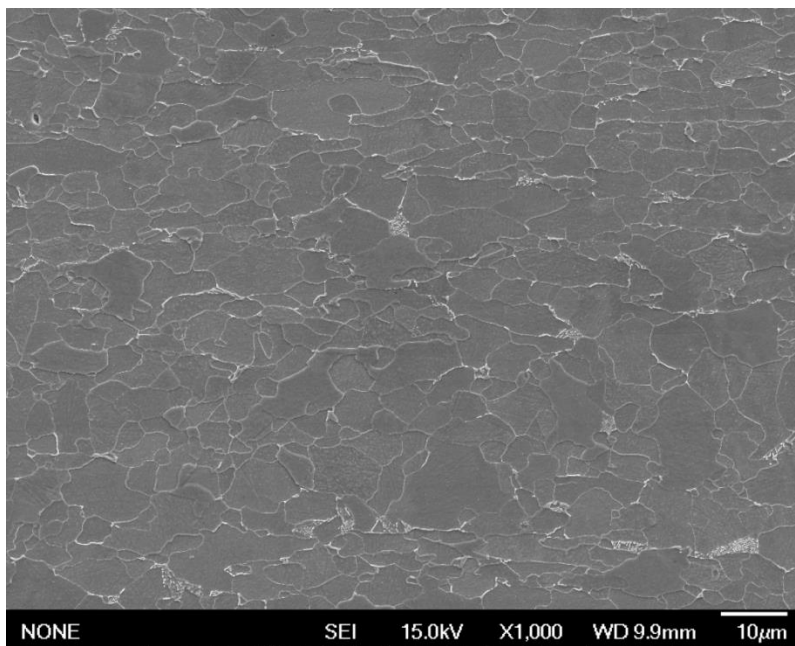
Kuvissa 20-23 on esitetty 1000 – kertaisella suurennoksella olevat mikrorakennekuvat koemateriaaleille. Kuvassa 20 on 1000 –kertainen suurennos teräksestä K355. Mikrorakenne on ferriittinen ja raerajoilla on hieman perliittiä, joissa ferriitti ja rautakarbidi Fe_3C – lamellit vuorottelevat. Kuvassa 21 on K420:n mikrorakenne, joka on ferriittistä ja perliittialueita on raerajoilla. L355:n ferriittisperliittinen mikrorakenne nähdään kuvasta 22. Kuvassa 23 on L420:n mikrorakenne, jossa perliittilamellialueita ei ole niin paljoa kuin K420:ssa.



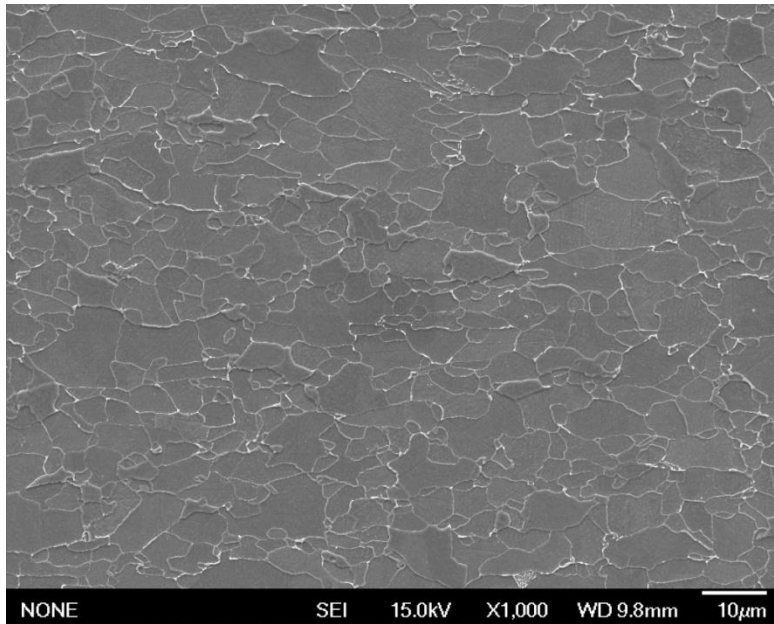
Kuva 20. Teräksen K355 mikrorakenne.



Kuva 21. Teräksen K420 mikrorakenne.

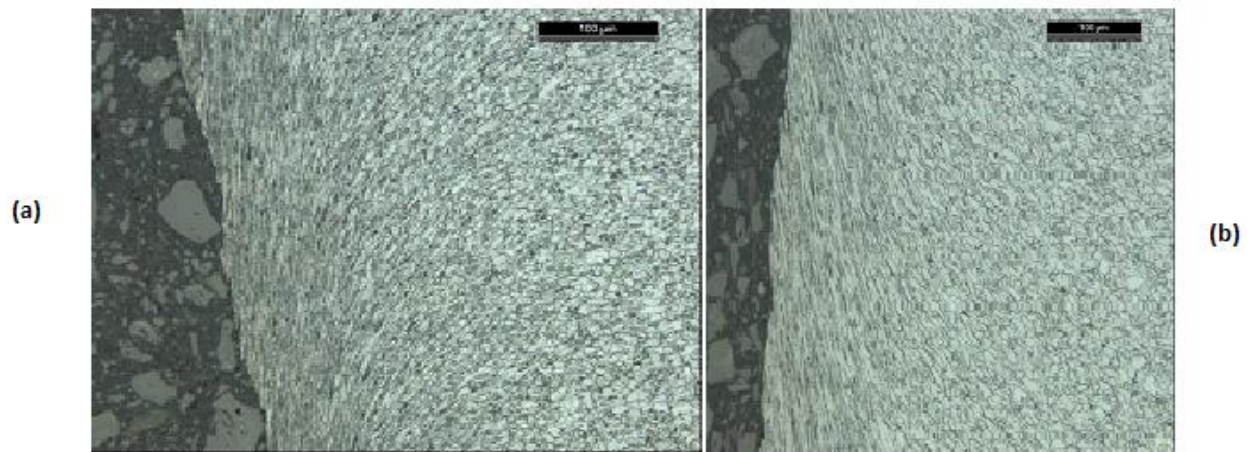


Kuva 22. Teräksen L355 mikrorakenne.

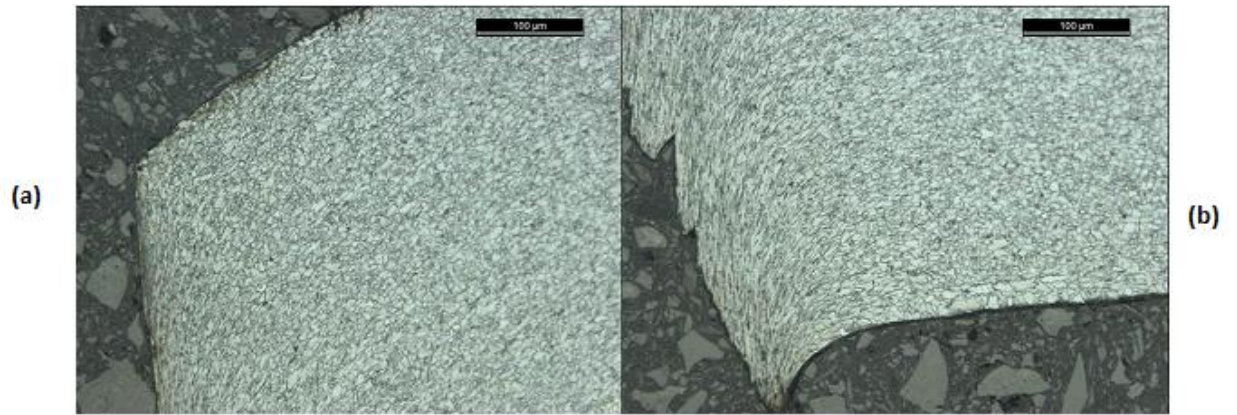


Kuva 23. Teräksen L420 mikrorakenne.

Leikkausreunat kuvattiin valomikroskoopilla. Kuvia otettiin kaikkiaan 59 kpl ja kuvissa 24-25 on esitetty esimerkkikuvia mikrorakenteista. Kuvassa 24 näkyy samalla välyksellä leikatun reunan mikrorakenteen eroja K355 ja L355 terästen välillä. Kuvassa 25 näkyy leikkausprosessissa syntyneitä leikkausreunan osia.



Kuva 24. Leikkausreuna 0,26mm:n välyksellä leikattuna teräksissä a) K355 ja b) L355.



Kuva 25. Esimerkkikuvia leikkausreunaan muodostuneista leikkausreunan osista: a) kiillottunut alue ja vajaasärmä, b) jäyste

8.5 Pinnankarheidet

Taulukoissa 12-15 on esitetty pinnankarheusmittausten välittömät mittaustulokset (R_a -arvot) tutkituille teräksille.

Taulukko 12. Leikkausreunan pinnankarheuden R_a -arvot [μm] teräkselle K355 eri leikkausvälyksillä [mm].

Välys [mm]	K355_pi		K355_po	
	kiillott.	murtunut	kiillott.	murtunut
0.26	1.021	4.628	2.189	4.515
0.26	1.777	5.071	2.564	6.102
0.34	0.756	6.033	0.953	6.357
0.34	0.621	6.303	2.006	5.567
0.34	0.773	5.433	1.755	5.065
0.4	2.395	6.408	1.737	7.584
0.4	3.246	5.384	2.105	5.703
0.4	2.008	5.249	1.647	6.625
0.45	0.773	4.657	0.596	4.61
0.45	0.603	7.15	0.398	5.803
0.45	1.396	7.192	1.214	6.089
0.63	0.862	6.287	1.865	6.023
0.63	0.837	6.892	1.974	6.49
0.63	0.664	6.07	1.745	5.445

Taulukko 13. Leikkausreunan pinnankarheuden R_a -arvot [μm] teräkselle L355 eri leikkausvälyksillä [mm].

Välys [mm]	L355_pi		L355_po	
	kiillott.	murtunut	kiillott.	murtunut
0.26	0.908	4.123	1.159	4.601
0.26	1.095	3.537	1.307	2.899
0.4	0.576	4.034	1.838	4.446
0.4	0.548	3.598	3.062	3.122
0.4	0.718	4.584	1.818	3.465
0.42	1.896	3.301	1.771	2.735
0.42	3.59	4.476	2.472	2.573
0.42	1.856	3.822	1.747	3.417
0.58	1.866	4.995	1.801	4.557
0.58	2.136	3.911	2.324	3.539
0.58	1.733	3.971	1.588	3.352
0.66	1.712	6.068	1.73	7.093
0.66	2.522	4.397	2.342	5.652
0.66	1.675	4.635	1.607	5.112

Taulukko 14. Leikkausreunan pinnankarheuden R_a -arvot [μm] teräkselle K420 eri leikkausvälyksillä [mm].

Välys [mm]	K420_pi		K420_po	
	kiillott.	murtunut	kiillott.	murtunut
0.26	0.752	5.152	2.318	4.693
0.26	0.83	5.563	3.091	4.013
0.34	1.335	5.253	2.386	5.644
0.34	1.832	7.059	1.61	6.455
0.34	1.714	7.082	2.707	6.117
0.4	1.602	6.304	0.72	9.022
0.4	1.664	8.572	0.715	5.158
0.4	1.435	8.39	0.676	9.846
0.45	0.965	7.385	2.412	5.444
0.45	1.128	8.814	1.292	8.302
0.45	1.475	9.749	2.095	8.56
0.63	1.651	8.452	2.291	7.167
0.63	2.156	7.428	2.002	5.276
0.63	1.94	7.379	2.046	

Taulukko 15. Leikkausreunan pinnankarheuden R_a -arvot [μm] teräkselle L420 eri leikkausvälyksillä [mm].

Välys [mm]	L420_pi		L420_po	
	kiillot.	murtunut	kiillot.	murtunut
0.26	2.42	4.467	1.318	5.107
0.26	2.92	5.084	0.488	4.339
0.39	1.494	4.246	1.564	4.345
0.39	2.311	3.61	2.3	3.81
0.39	1.748	3.616	1.849	3.816
0.42	1.03	5.337	1.81	3.085
0.42	1.038	5.622	2.223	3.809
0.42	1.013	5.728	2.223	3.364
0.53	0.858	6.831	1.584	5.362
0.53	0.868	4.616	2.232	6.294
0.53	1.163	5.627	1.75	4.344
0.66	0.492	7.874	1.566	6.224
0.66	1.027	7.554	2.188	5.322
0.66	0.98	7.708	1.556	5.019

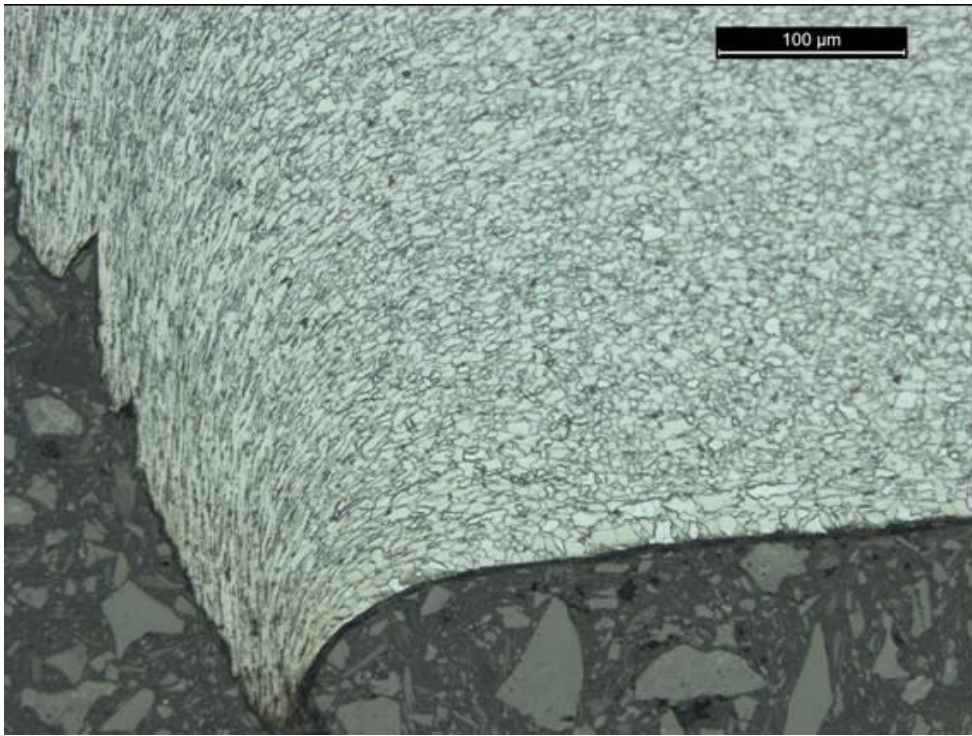
9 TULOSTEN TARKASTELO

9.1 Leikkausreunan ominaisuudet

Näytteiden leikkaus eri leikkausvälyksillä onnistui hyvin. Leikkausvälysten tarkkuus on jonkin verran epätarkka, koska välykset mitattiin käsin käyttämällä rakotulkkia. Kuitenkin levyleikkurin levynpaksuutta nostettaessa leikkausvälyskin kasvoi. Leikkausreunan kuvaaminen ja kiillottuneen alueen mittaaminen suoritettiin onnistuneesti. Leikkausreunaan syntyneet eri osat ovat seurausta leikkausprosessista ja leikkausreunasta voidaan havaita prosessin vaikutuksesta syntyneitä eri osia, kuten kiillottuneen ja murtuneen pinnan sekä jäysteen (kuvat 26 - 27).

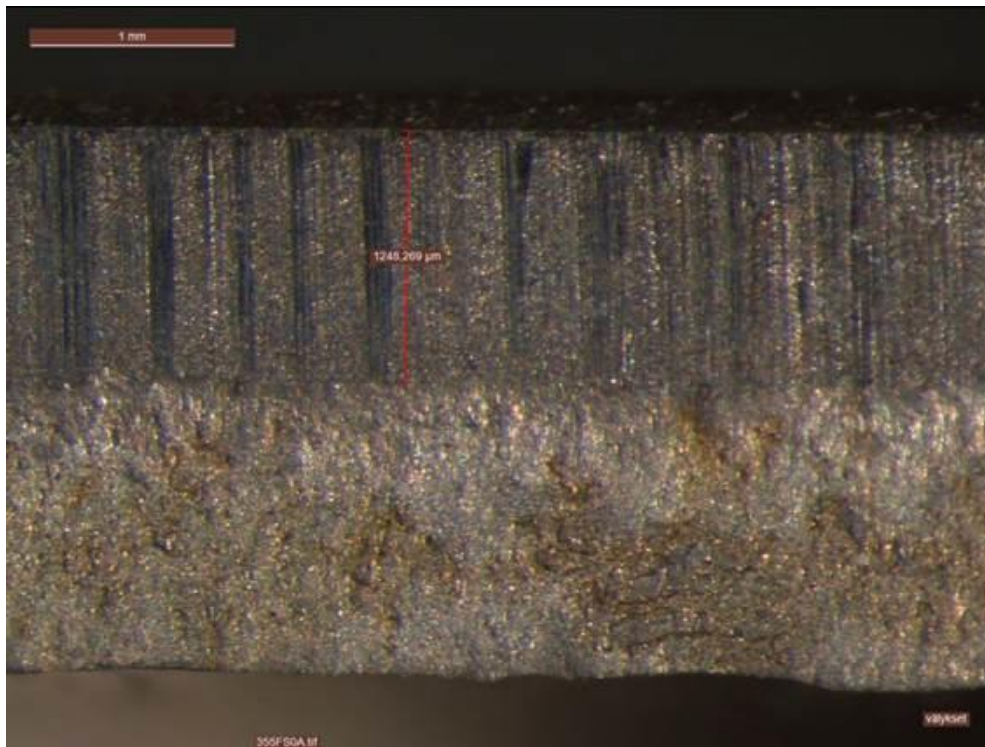


Kuva 26. Leikkausprosessissa syntyneet leikkauspinnan osat: A) kiillottunut ja B) murtunut alue.

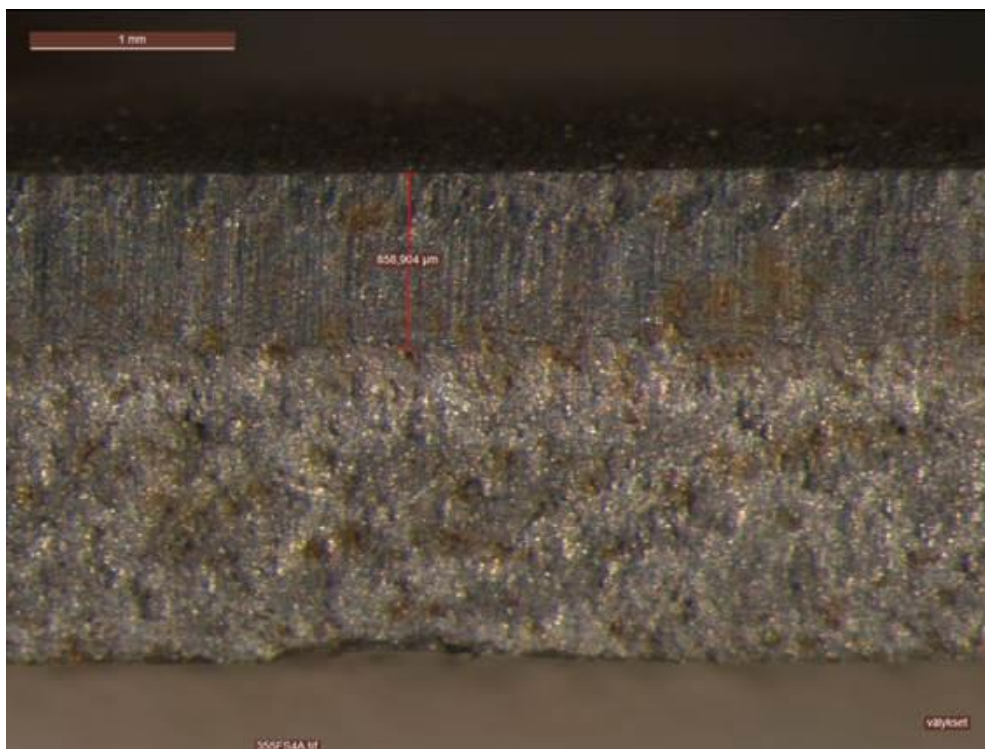


Kuva 27. Leikkausprosessissa reunan alapintaan muodostunut jäyste.

Kiillottuneen pinnan mittaustuloksista (taulukko 4) voidaan huomata, että pienemmän välyksen omaavissa näytteissä kiillottuneen alueen koko on suurempi kuin suuren välyksen omaavilla. Etenkin ero pienimmän ja suurimman välyksen välillä on huomattava, kuten nähdään kuvista 28 ja 29.

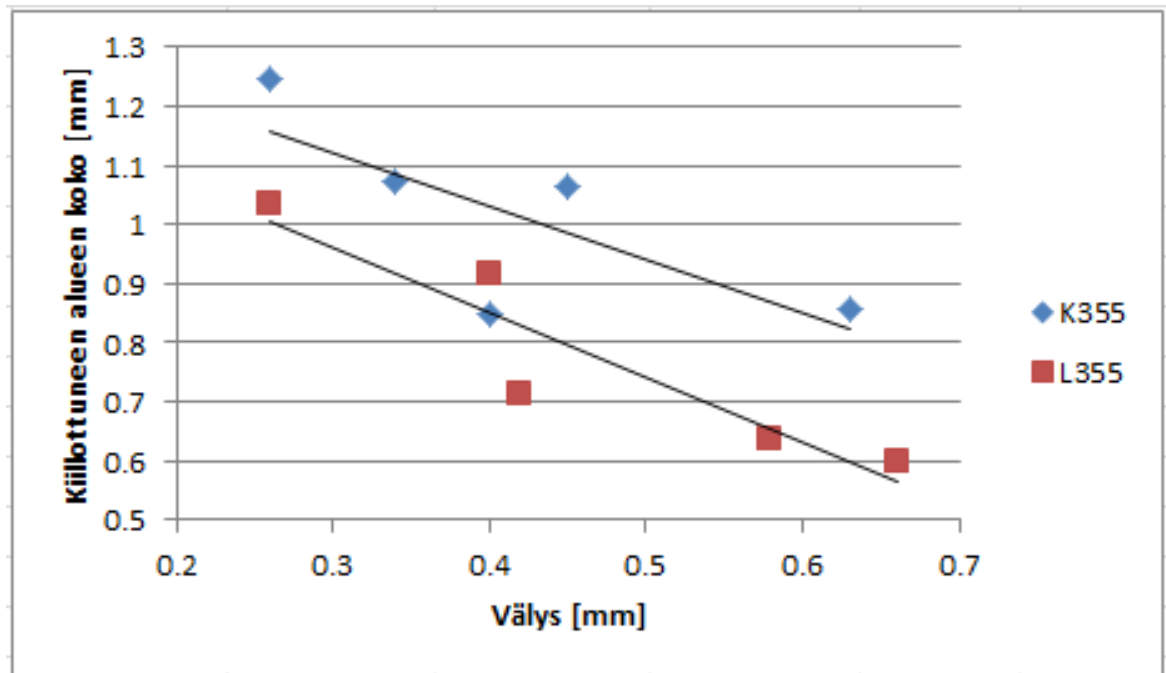


Kuva 28. Koeteräksen 355 leikkausreuna pienimmällä välyksellä leikattuna. Mittajana on sijoitettu kiillottuneelle alueelle.

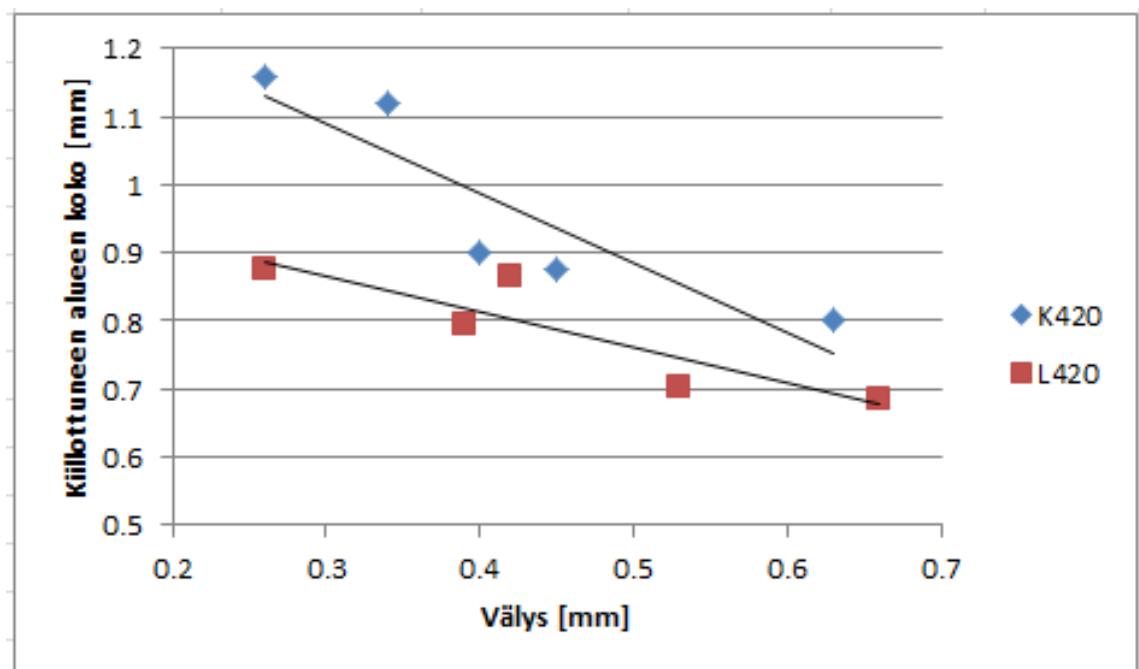


Kuva 29. Koeteräksen 355 leikkausreuna suurimmalla välyksellä leikattuna.

Tuloksista nähdään myös ero tutkittujen terästen välillä. Teräksillä K355 ja 420 kiillottuneen alueen koko pysyy suurempana välystä nostettaessa teräksiin L355 ja L420 verrattuna.



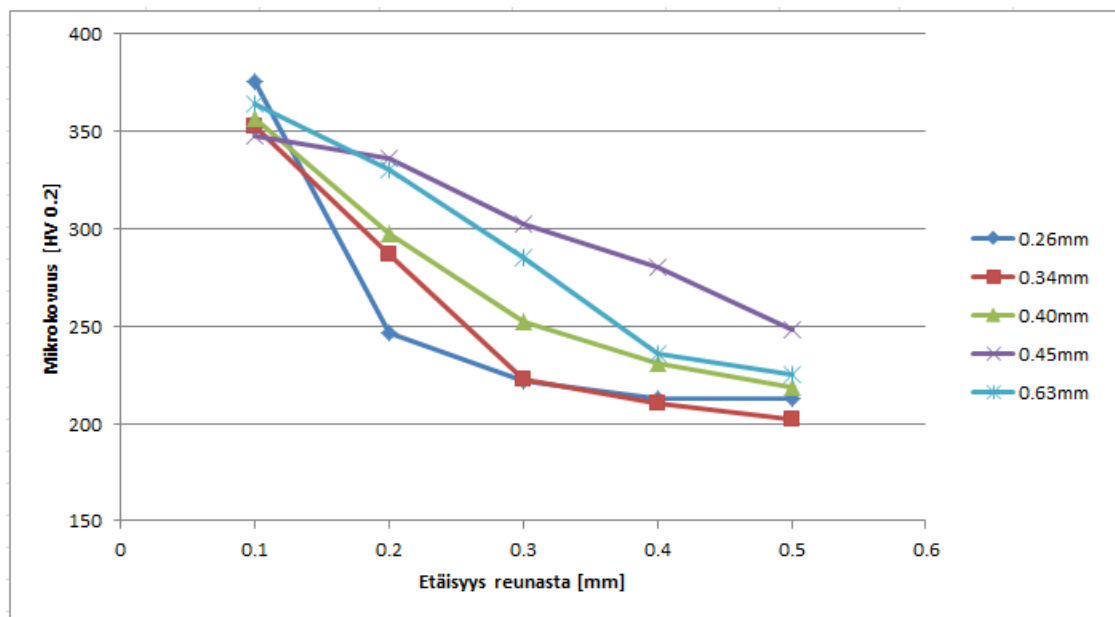
Kuva 30. K355:n ja L355:n välinen ero kiillottuneen alueen koossa.



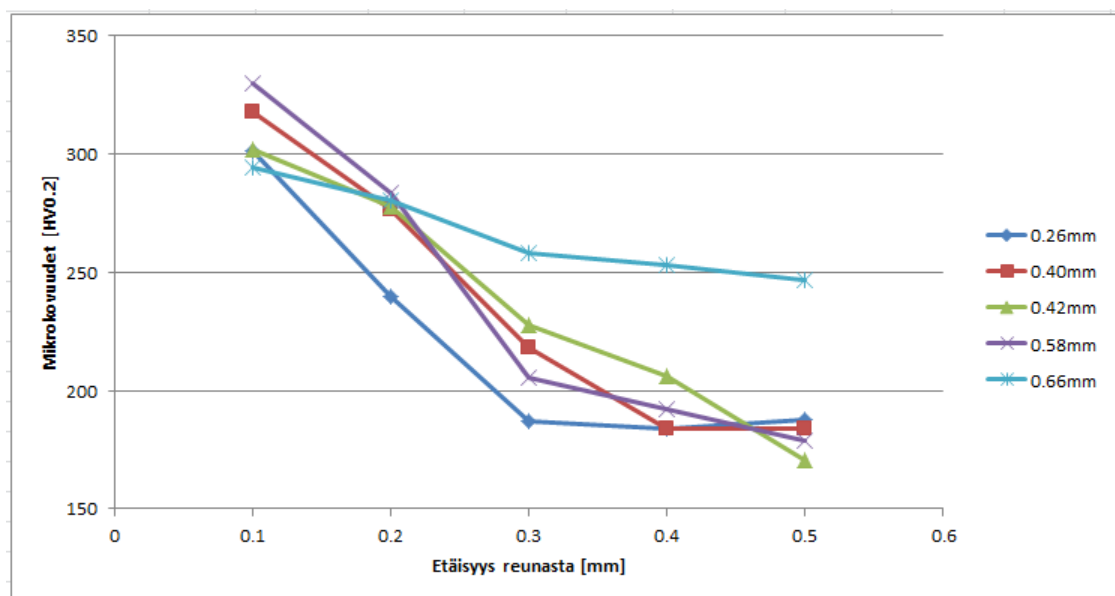
Kuva 31. K420:n ja L420:n välinen ero kiillottuneen alueen koossa.

Kovuusmittauksia tehtiin viidestä kohdasta 0,1 mm:n etäisyydeltä reunasta 0,1mm välein. Tulokset on esitetty taulukoissa 9-12. Tuloksista nähdään, että leikkausvälyksellä

on vaikutusta leikkausreunan lujittumiseen. Useimmissa tapauksissa suuremmalla välyksellä teräkseen muodostuu leveämpi leikkaukselle altistunut alue eli leikkausreuna on kovempaa pidemmältä etäisyydeltä. Tästä esimerkkinä kuvissa 32 ja 33 on annettu terästen K355 ja L355 kovuudet. Kuvista nähdään, että pienemmällä välyksellä perusaineen kovuus saavutetaan aikaisemmin kuin suurella välyksellä leikattuna. Kirjallisuuden mukaan leikkaukselle altistunut alue (SAZ) kontrolloi muovattavuutta reiänlaajennustestissä. Suuri leikkaukselle altistunut alue vaikuttaa muovattavuuteen laskevasti (Pathak, Butcher & Worswick 2013, 218).



Kaavio 32. K355:n kovuudet eri välyksillä pitkittäin valssaussuuntaan leikattuna.



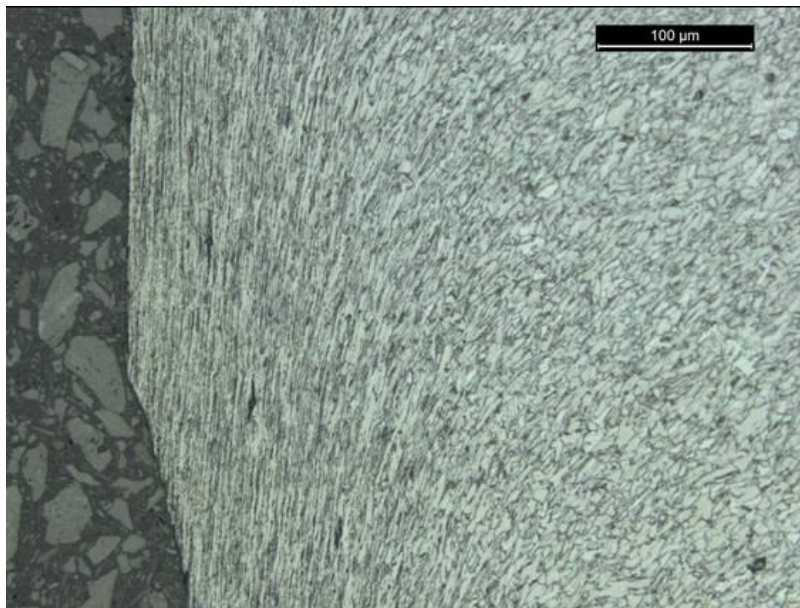
Kuva 33. L355:n kovuudet eri välyksillä pitkittäin valssaussuuntaan leikattuna.

Lisäksi tuloksia vertailtaessa nähdään, että samaa lujuusluokkaa olevien terästen kovuuksien prosentuaalinen ero reunimmaisen mittapisteen ja perusaineen välillä on teräksillä K355 ja K420 pienempi kuin teräksillä L355 ja L420 (taulukko 16).

Taulukko 16. Prosentuaalinen ero kovuuksien välillä.

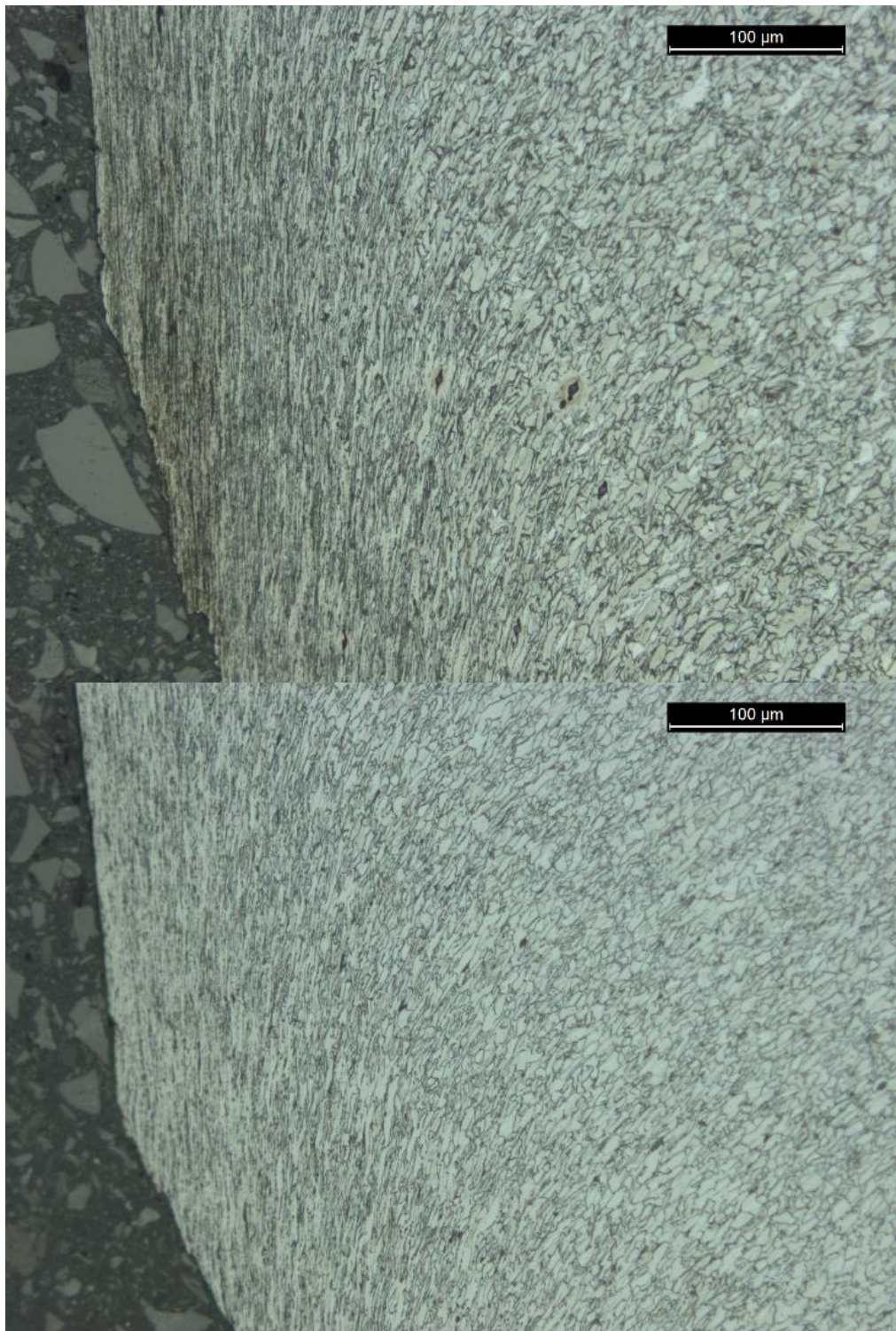
Välys	L355	K355	L420	K420
pienin	55 %	47 %	61 %	52 %
suurin	56 %	48 %	52 %	53 %

Leikkausreunan mikrorakennetutkimuksien tuloksia on esitelty esimerkein kuvissa 24 - 25. Mikrorakennekuvista nähdään, kuinka leikkausprosessi vaikuttaa mikrorakenteeseen leikkausreunassa (kuva 34). Mikrorakenne litistyy ja venyy voimakkaasti leikkauksen suuntaan lähellä reunaa. Noin 200 µm etäisyydellä reunasta mikrorakenne on jo hyvin lähellä normaalia perusainetta. Voimakkaasti muokkautuneella alueella voi nähdä mikro-onkaloita, jotka ovat muodostuneet todennäköisesti sulkeumien yhteyteen.



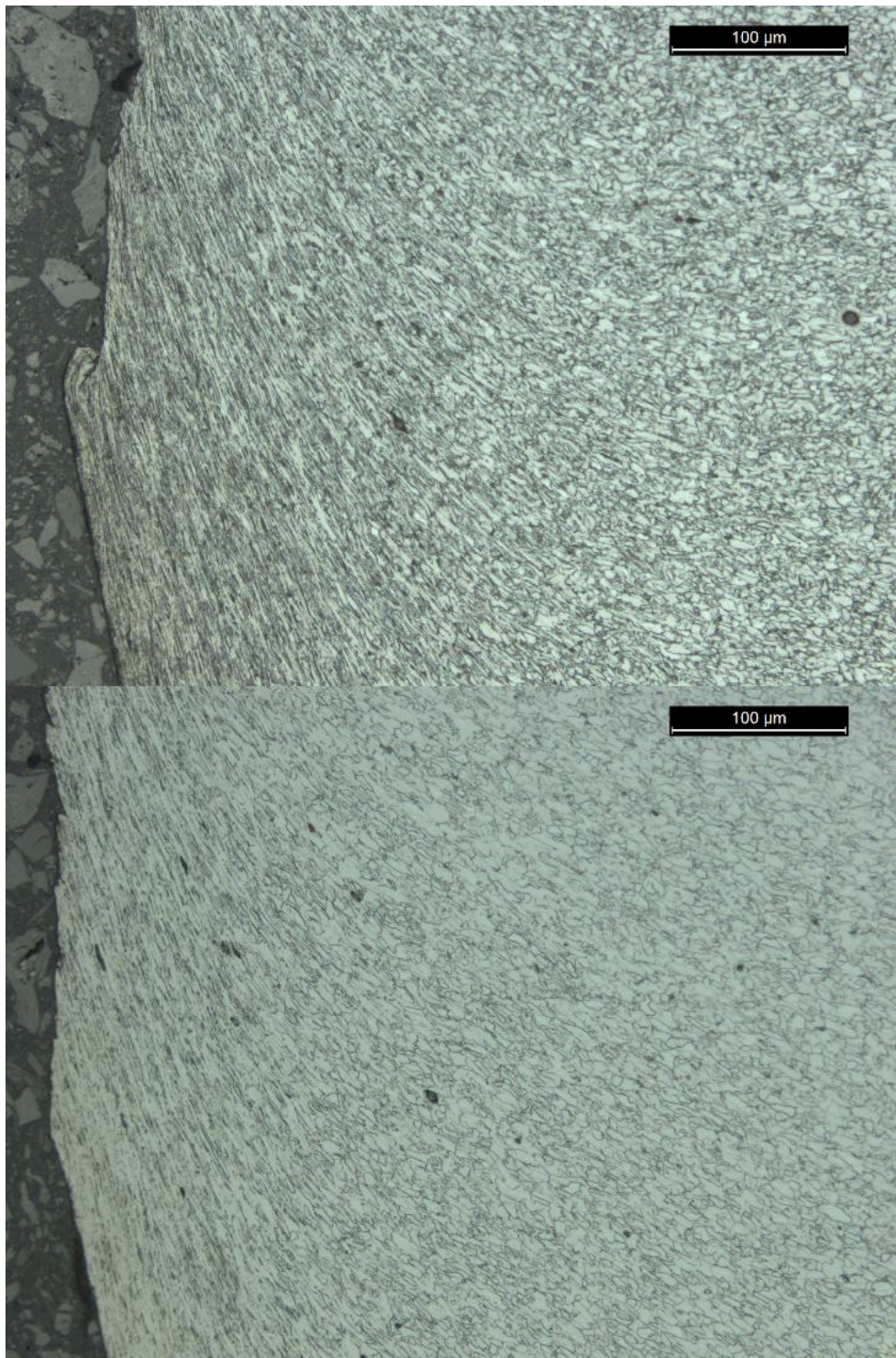
Kuva 34. Leikkausprosessin vaikutus mikrorakenteeseen lähellä leikkausreunaa.

Eroavaisuuksia terästen K355 ja L355 välillä ei löydy huomattavasti, mutta teräksen K355 rakenne on hieman tiheämpää ja alirakeisempää (kuva 35).



Kuva 35. Ero K355 ja L355:n mikrorakenteiden välillä.

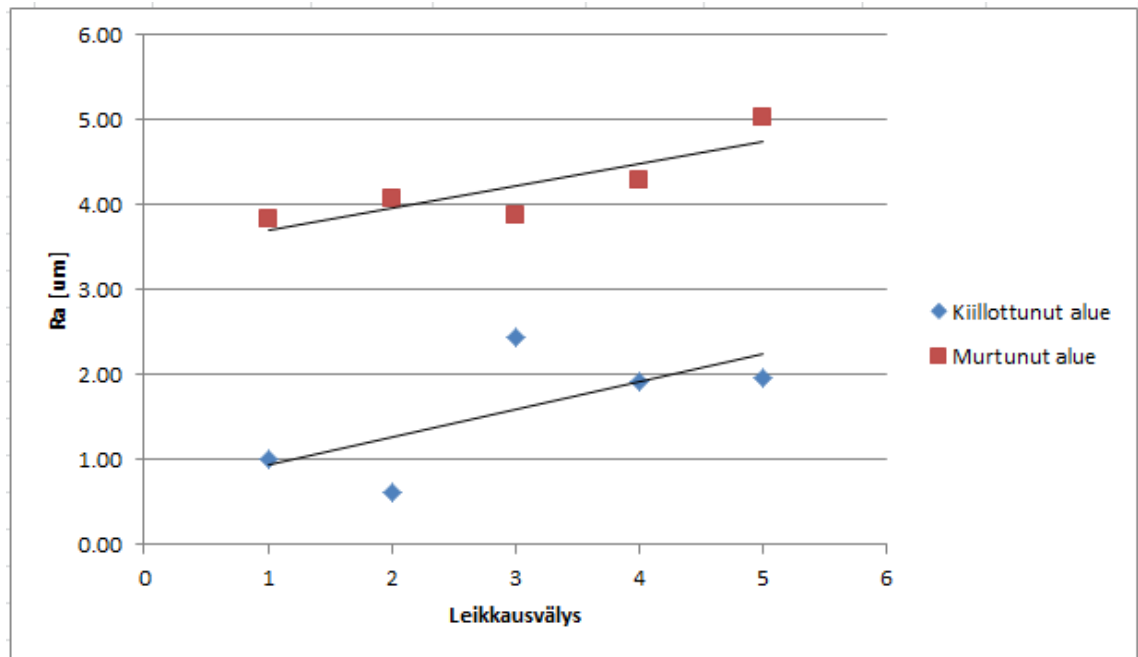
Myös terästen K420 ja L420 välillä on samanlaisia eroavaisuuksia (kuva 36). Rakenne leikkausreunan takana on koeteräksellä tiheämpää ja alirakenteisempää.



Kuva 36. Ero K420 ja L420:n mikrorakenteiden välillä.

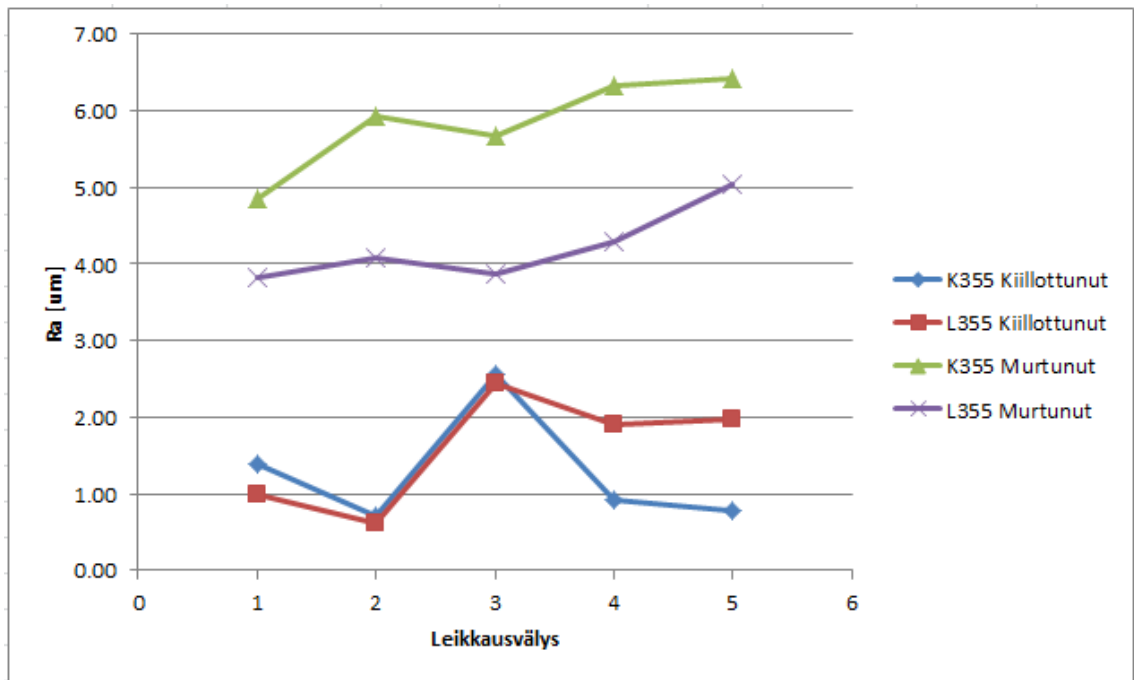
Leikkausreunojen mikrorakenteessa nähdään mikrorakenteen litistymistä lähellä reunaa. Myös kovuuskokeiden tulosten (taulukot 9 - 12) perusteella voidaan sanoa, että reunas-
sa on tapahtunut muokkauslujittumista. Kovuuskokeista saadut prosentuaaliset erot eri materiaalien välillä (taulukko 16) kertovat, että teräkset K355 ja K420 muokkauslujittu-
vat hieman vähemmän kuin teräkset L355 ja L420.

Leikkausreunan pinnankarheet mitattiin onnistuneesti. Karheet mitattiin yhteensä kuudesta kohdasta näytettä, kolme kiillottuneesta pinnasta sekä kolme murtuneesta pinnasta. Tulokset tehdyille mittauksille ovat esitetty taulukoissa 12 - 15. Mittaustuloksista nähdään, että suuremmalla välyksellä leikattujen reunojen pinnankarheet ovat hieman suurempia kuin pienellä välyksellä leikatut (kuva 37). Paremman venytyssärmättävyyden saamiseksi tulee ottaa huomioon pinnankarheet ja välyksen suuruus, sillä mitä pienempi välys, sitä sileämpi leikkausreuna.

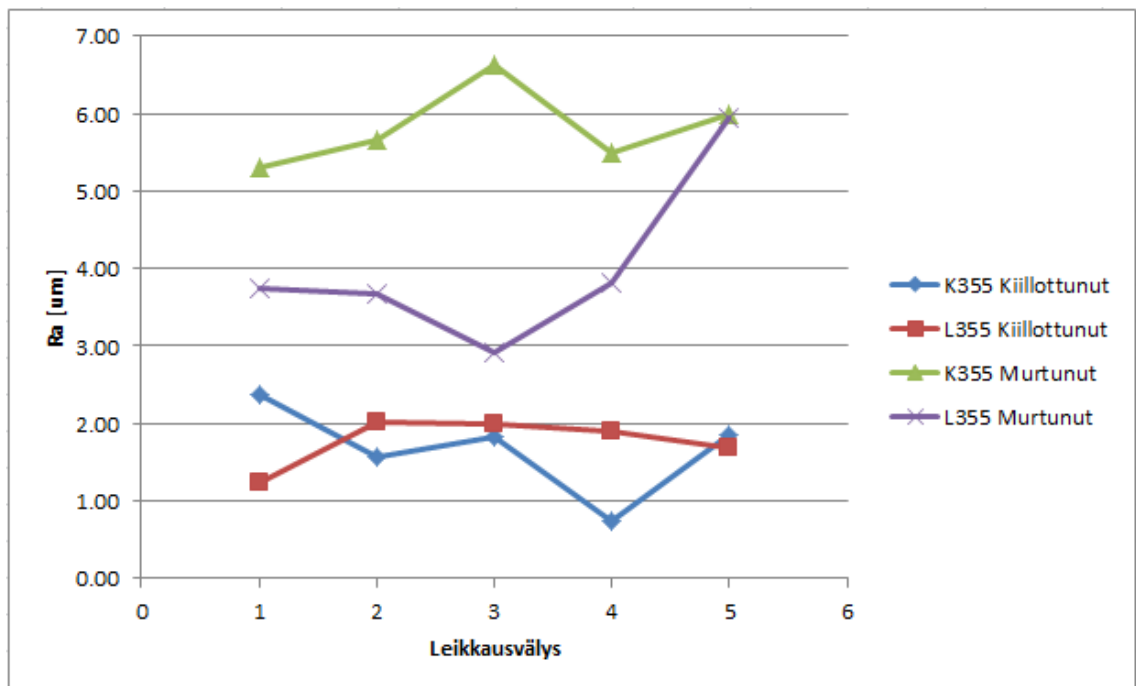


Kuva 37. Välyksen vaikutus teräksen L355 pinnankarheusarvoihin.

Koemateriaalien välillä pinnankarheusarvoissa on hieman eroavaisuuksia. Teräksen K355 murtuneen alueen karheet ovat huomattavasti suurempia kuin L355:n. Kiillottuneen alueen karheet ovat kuitenkin samaa luokkaa.

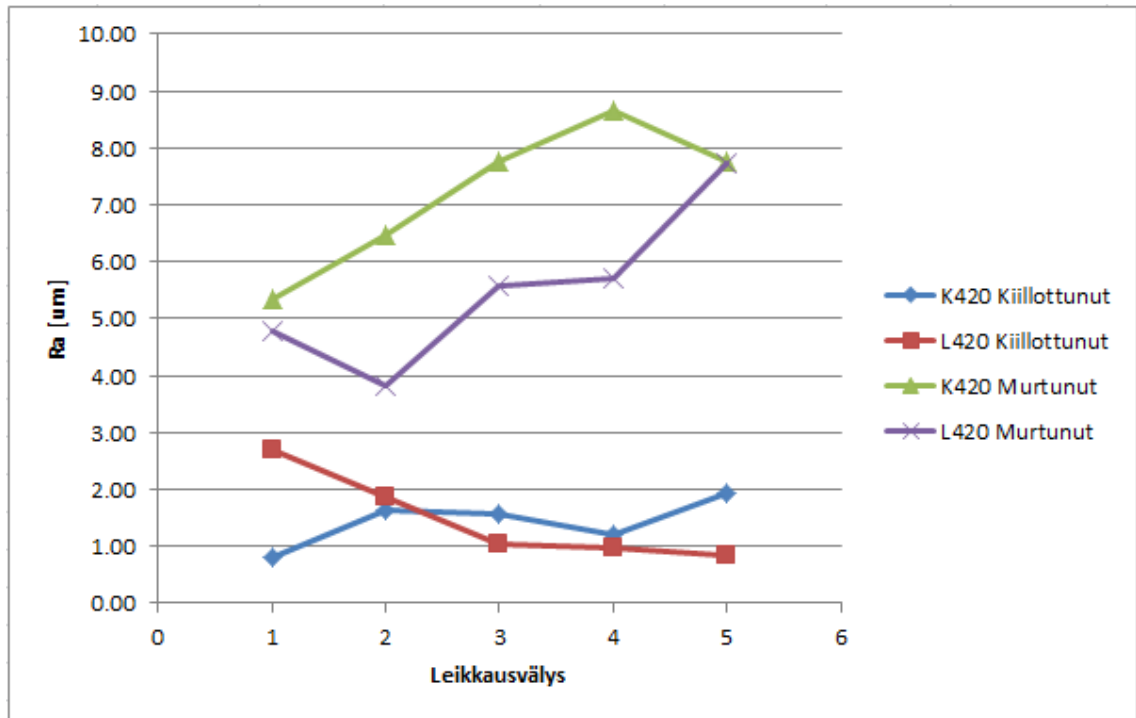


Kuva 38. L355:n ja K355:n pinnankarheuksien välinen ero pitkittäin valssaussuuntaan leikatuilla näytteillä.

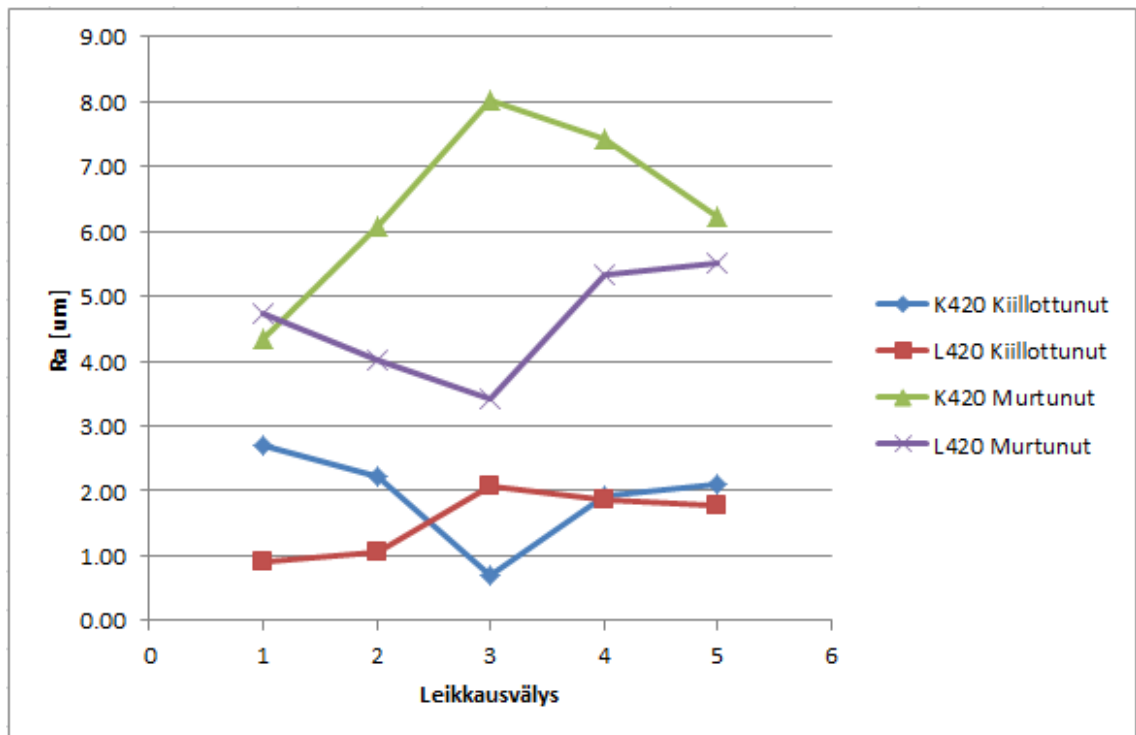


Kuva 39. L355:n ja K355:n pinnankarheuksien välinen ero poikittain valssaussuuntaan leikatuilla näytteillä.

Myös terästen K420 ja L420 pinnankarheuksien välillä on huomattava ero murtuneen alueen karheuksissa. Kiillottuneiden alueiden pinnankarheudet ovat samaa luokkaa.



Kuva 40. L420:n ja K420:n pinnankarheuksien välinen ero pitkittäin valssaussuuntaan leikatuilla näytteillä.



Kuva 41. L355:n ja K355:n pinnankarheuksien välinen ero poikittain valssaussuuntaan leikatuilla näytteillä.

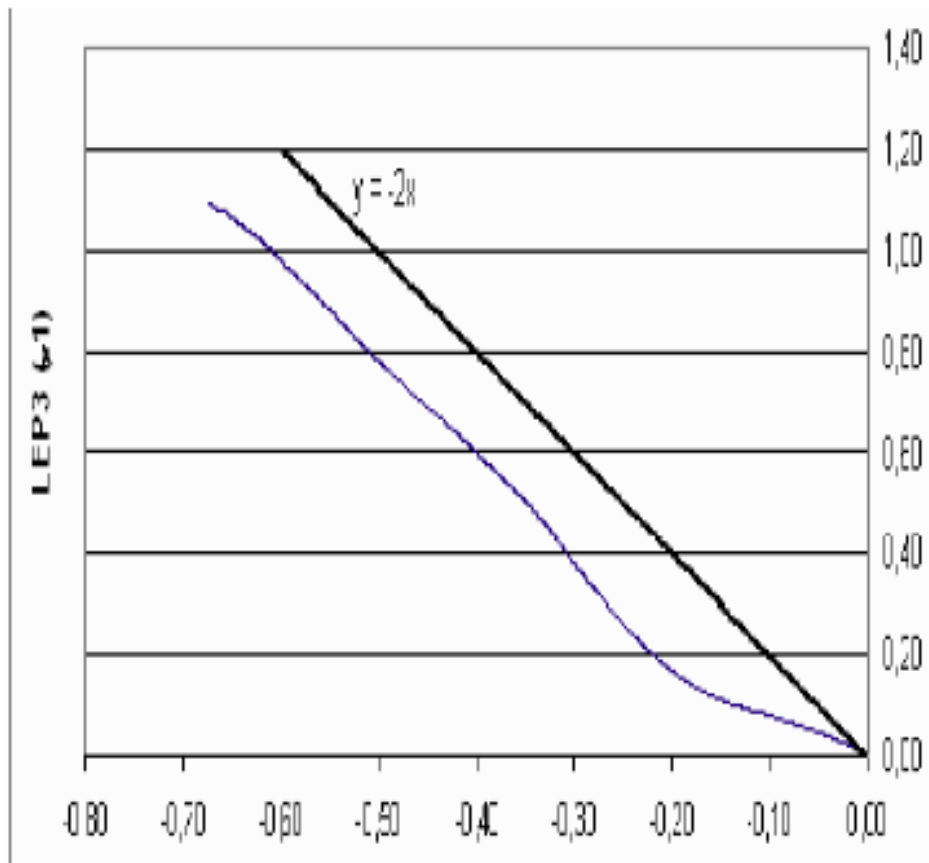
9.2 Reiänlaajennuskyky

Kaikki eri koemateriaaleille suoritettut KWI-testit onnistuivat hyvin. Murtumat havaittiin hyvin niin silmämääräisesti kuin koneenkin avulla. Muodostuneen reiän sisähalkeukset mitattiin kahdesta eri kohdasta ja niiden keskiarvolla laskettiin reiänlaajennussuhde kaavaa 1 käyttämällä. Tulokset on esitetty taulukoissa 5-8. KWI-reiänlaajennustesti ei tuottanut samoja huomattavasti parempia tuloksia kuin aiemmin teräksille K355 ja K420 tehty ISO 16630 standardin mukainen reiänlaajennustesti. Ero tuloksien välillä on esitetty taulukossa 17. Koeteräksille K355 ja K420 KWI-testi antoi alhaisemman reiänlaajennussuhteen kuin verrokkiteräksillä. Kuitenkin ISO-standardin mukaiset testit antoivat huomattavasti suuremman reiänlaajennussuhteen koeteräksille K355 ja K420 (Vierelä 2013, Tekninen raportti).

Taulukko 17. Reiänlaajennussuhteen ero koemateriaalien välillä KWI-reiänlaajennustestillä sekä ISO-standardin mukaisella testillä suoritettuna.

Teräs	Reiänlaajennussuhde [%]	
	KWI - testi	ISO - testi
K355	62.9	114.05
L355	67.8	73.8
K420	58.1	121.03
L420	65.8	81.2

ISO-standardin mukaisella testillä päästään korkeampiin reiänlaajennussuhteisiin kuin KWI-testillä. Tämä on selitetty sillä, että ISO-testin alussa reiänlaajennusta tapahtuu sisempänä materiaalissa pakottaen sitä ulospäin. Tässä tilassa reiän reunassa ei ole puhdasta vetoa, vaan se on lähempänä yksiaksiaalista puristusta (kuva 42). Venymäpolku jatkuu puhtaana vetona, mutta leikkauspiste rajamuovattavuuskäyrässä on enemmän vasemmalla verrattuna KWI-testin jatkuvaan vetokuormitukseen (Col & Jousserand 2008, 204).



Kuva 42. ISO – testin alussa venymäpolku on lähellä yksiakiaalista puristusta (Col & Jousserand 2008, 204).

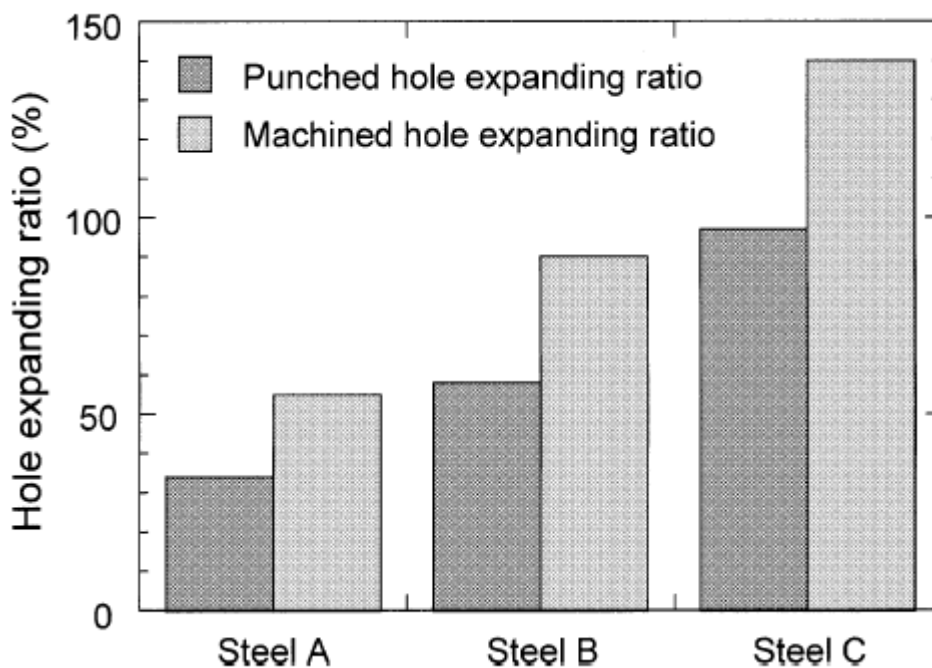
ISO-standardin mukaisella testillä saadut paremmat muovausarvot johtuvat siitä, että rasitus aloitetaan jo valmiina olevasta puristustilasta. Tämä havainto viittaa siihen, että kartiomaisella muodolla voi olla vaikutusta kun selvitetään laajennuksen tasoa muiden parametrien ollessa vakio. Tämä osoittaa sen, että ISO-standardin mukaisen testin tulokset voivat johtaa virheellisiin päätelmiin, jos niitä käytetään suoraan vertaamaan materiaalin venytyssärmättävyyttä. (Col & Jousserand 2008, 205.)

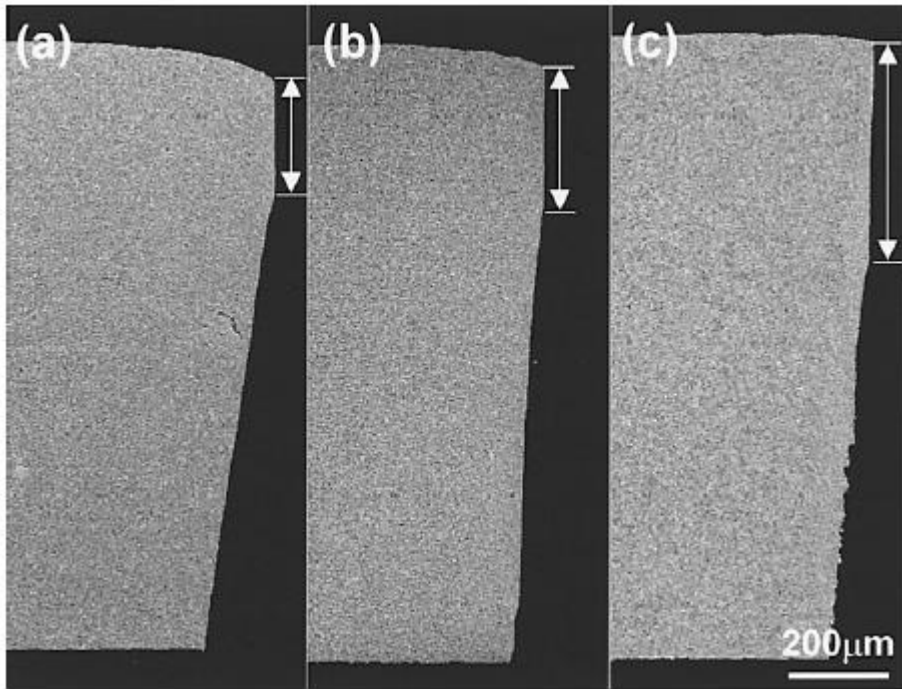
9.3 Venytyssärmättävyys

Työssä tehtyjen tutkimuksien perusteella koeterästen parempiin reiänlaajennussuhteisiin ja parempaan venytyssärmättävyyteen vaikuttavat koeteräsiin leikkausprosessissa leikkausreunaan syntynyt suurempi kiillottunut alue, koeterästen leikkausreunan alhaisempi lujittuminen. Teoria ISO-standardin mukaisen testin ja KWI-testin välisistä eroista kuitenkin on tärkein selitys koeterästen huomattavasti suuremmalle reiänlaajennussuhteelle.

Koeteräs 355 ja 420:n suuremmat kiillottuneen alueen koot voivat olla yksi vaikuttava tekijä, kun etsitään syitä huomattavasti paremmalle venytyssärmättävyydelle verrattuna verrokkiteräksiin. Etenkin siksi, että mitä suurempi kiillottunut alue leikkausprosessissa syntyy, sitä vähemmän prosessissa tapahtuu murtumista. Lisäksi kiillottuneen ja murtuneen alueen kokoerot vaikuttavat leikatun reunan pinnanlaatuun. Pienemmällä leikkausvälyksellä saadaan suurempi kiillottunut alue kuin suurella leikkausvälyksellä. (Kutuniva 2011, 17.) Aikaisemmissa tutkimuksissa (Hasegawa ym. 2004, 605) on todettu, että suuremman reiänlaajennussuhteen ja karheuden omaava teräs omaa myös korkeamman kiillottuneen alueen, kuten nähdään taulukosta 18 verrattuna kuvaan 43.

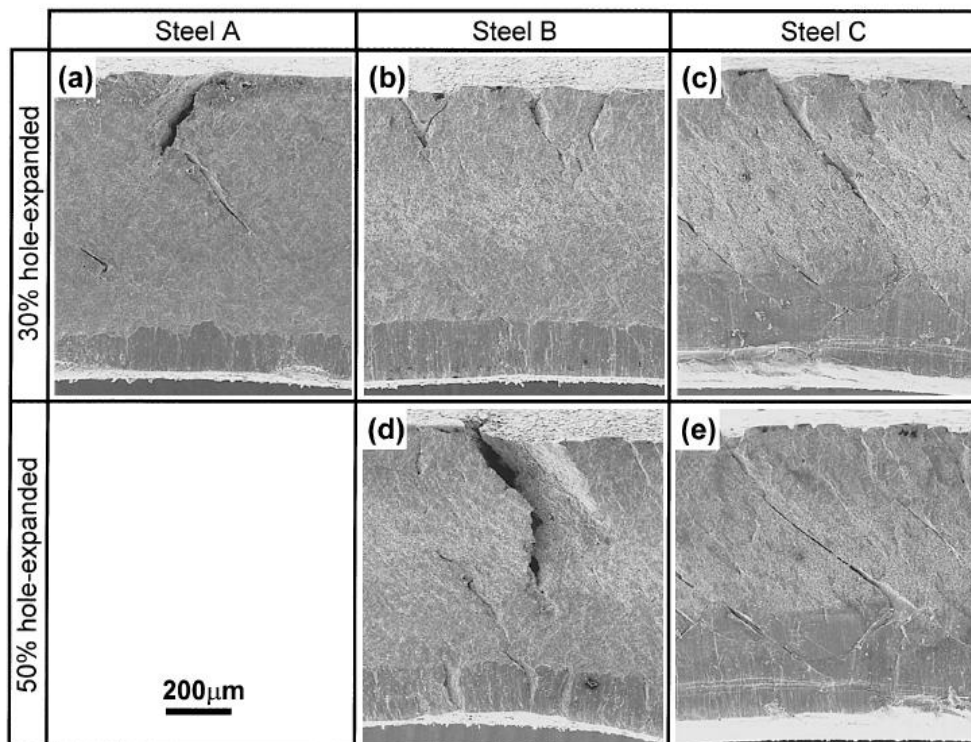
Taulukko 18. Reiänlaajennussuhteiden ero A, B ja C terästen välillä (Hasegawa, Kawamura, Urabe & Hosoya 2004, 605).





Kuva 43. Hasegawan tutkimuksen A, B ja C terästen kiillottuneen alueen ero (Hasegawa ym. 2004, 605).

Lisäksi on tutkittu säröjen etenemistä murtuneessa pinnassa keskeytetyillä reiänlaajennuskokeilla ja kuten kuvasta 44 voidaan huomata, C teräkseen säröjä syntyy suuremmalle alueelle ja reikää venytettäessä C teräksen suurempi kiillottunut alue vastustaa paremmin säröjen etenemistä.



Kuva 44. Säröjen eteneminen A, B ja C teräksissä (Hasegawa ym. 2004, 606).

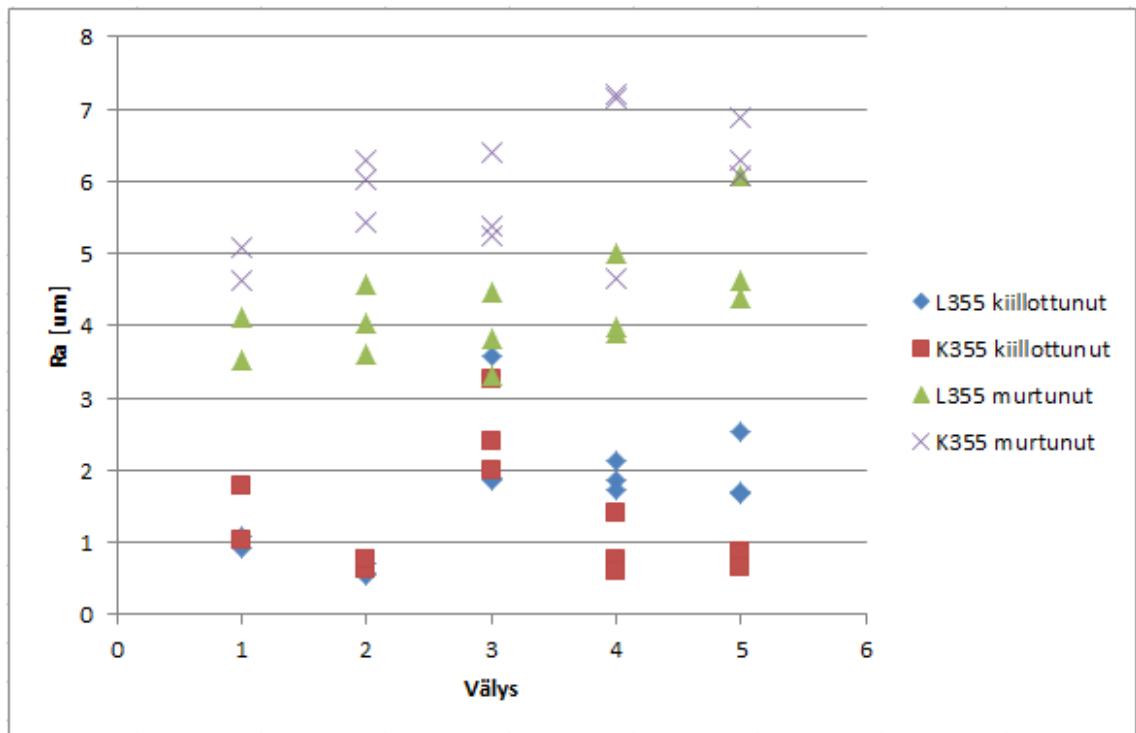
C teräs omaa myös suuremman murtolujuuden ja pienemmän venymän kuin A ja B teräs (taulukko 19), ja sama kaava toistuu myös koeterästen ja verrokkiterästen välillä (Hasegawa ym. 2004, 605).

Taulukko 19. Hasegawan tutkimuksen terästen veto-ominaisuudet. YP = murtolujuus, Elongation=venymä (Hasegawa ym. 2004, 605).

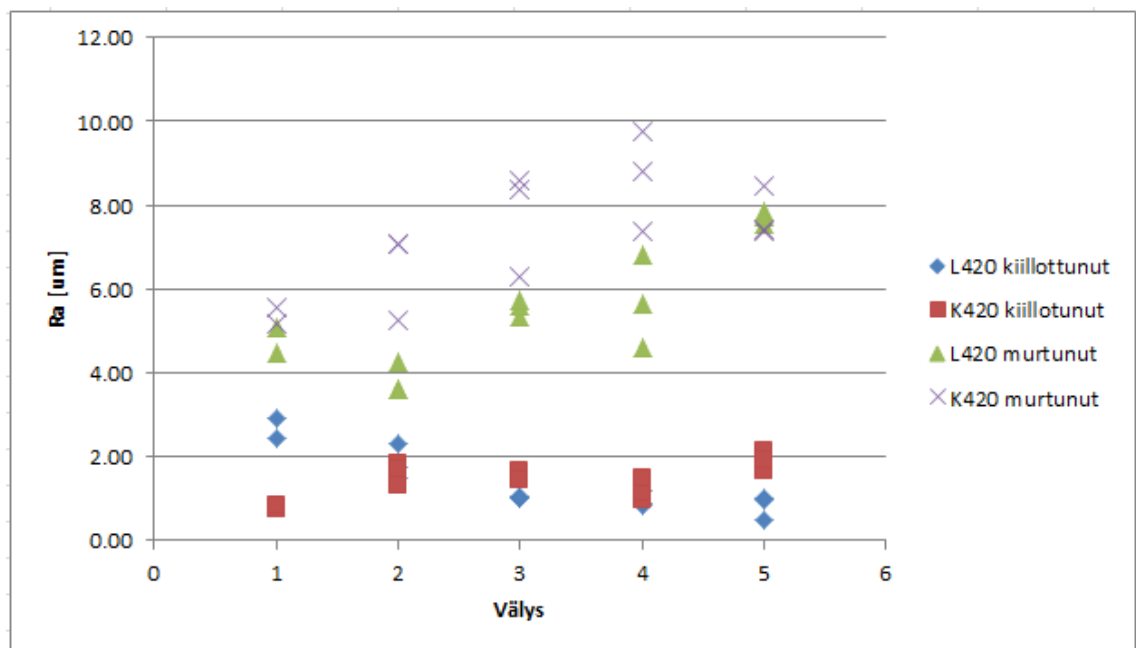
Steel	YP (MPa)	TS (MPa)	Elongation (%)
A	638	1017	19
B	783	1028	15
C	995	1068	5

Teorian mukaan mitä vähemmän teräksessä on tapahtunut lujittumista, sitä parempi venytyssärmättävyys teräksellä on (Gutiérrez 2012, 9). Lujittumista on tapahtunut vähemmän teräksillä K355 ja K420 taulukon 16 mukaan ja tämä voisi olla yksi niiden huomattavasti parempaan reiänlaajennussuhteeseen vaikuttavista tekijöistä. Kovuuksien välisiä eroja ja yhteyttä reiänlaajennuskykyyn voitaisiin jatkossa tutkia lisää esimerkiksi mittaamalla mikrokovuudet leikkausreunasta pituussuunnassa jäysteestä kiillottuneen pinnan yläreunaan asti. Tällöin saadaan tietoa myös kovuuksien vaihtelusta lujittuneella alueella eri leikkausreunan osien välillä.

Koemateriaalien pinnankarheuksien perusteella ei voida sanoa, että sillä olisi vaikutusta teräksien K355 ja K420 huomattavasti parempiin reiänlaajennussuhteisiin verrattuna verrokkiteräksiin. Päinvastoin, murtumat ydintyvät helpommin karkeissa pinnoissa, mikä vaikuttaa laskevasti reiänlaajennuskykyyn. Lisäksi kun murtunut alue on karkea ja jäyste terävä, murtumia esiintyy herkemmin venytyssärmäyksessä. Täytyy ottaa huomioon myös tulosten hajonta (kuvat 43 - 44) terästen välillä sekä pinnankarheuksien arvot ovat μm :nä eli käytännössä ero karheuksien välillä on todella pieni.



Kuva 43. Pinnankarheudet Laser 355MC:n ja koeteräs 355:n välillä.



Kuva 44. Pinnankarheudet Laser 420MC:n ja koeteräs 420:n välillä.

Kuitenkin reiänlaajennuskykyä kappaleessa 9.2 tarkasteltaessa esille tullut teoria reiänlaajennustestien välisistä eroista on tärkein selitys terästen K355 ja K420 paremmalle reiänlaajennussuhteelle. Muiden parametrien ollessa vakio, pistimen kartiomaisella muodolla voi olla eniten vaikutusta muovattavuusarvoihin (Col & Jousserand 2008, 205).

Jatkossa voitaisiin kuitenkin tutkia lisää leikkausreunaa. Kovuusmittauksia voisi tutkia mittaamalla kovuudet myös pituussuunnassa leikkausreunasta. Myös murtumien etenemistä materiaaleissa voitaisiin tutkia tekemällä keskeytettyjä reiänlaajennuskokeita niin ISO – standardin mukaisesti kuin KWI – testillä. Myös yksi keino selvittää reiänlaajennussuhteiden eroja koemateriaalien välillä on tutkia reiänlaajennustestien näytteiden reikien pintaa stanssauksen jälkeen ja tutkia ovatko reiänlaajennussuhteen erot koemateriaalien välillä oikeasti huomattavan erilaisia, vai johtuuko erot juurikin ISO – standardin mukaisen testin pistimen kartiomaisesta muodosta.

10 POHDINTA

Leikkausreunan vaikutusta muovattavuuteen oli mielenkiintoista selvittää ja teoria leikkausreunasta, sen osista ja vaikutuksesta muovattavuuteen oli minulle täysin uutta asiaa. Teoriaosassa käsitellyt asiat terästen muokkauksesta ja muovattavuusominaisuuksista olivat minulle jo entuudestaan tuttuja. Työssä suoritettut kokeet olivat suurin osa minulle jo entuudestaan tuttuja, mutta opin myös paljon uutta laitteistojen osalta.

Leikkausreunaa ei ole tutkittu aikaisemmin kovinkaan paljon ja tämän takia suurin osa lähteistä oli englannin kielellä, mikä toi haastetta teoriaosuuteen ja myös tulosten tarkasteluun. Perusteellinen perehtyminen englannin kielellä oleviin artikkeleihin auttoi ja englanninkielen taito karttui monilla uusilla sanoilla.

Eroja koeterästen ja Laser – terästen välillä ei löytynyt paljon työssä suoritettujen testien perusteella. Kuitenkin näiden testien perusteella yksi merkittävin selittävä tekijä koeterästen parempaan reiänlaajennussuhteeseen on leikkausprosessissa syntynyt kiillottuneen eli leikkautuneen alueen koko. Myös kovuuskokeiden perusteella voidaan sanoa koeterästen lujittuvan hieman vähemmän, mikä vaikuttaa reiänlaajennussuhteeseen nostavasti. Reiänlaajennustestien välinen ero paljastui kuitenkin tärkeimmäksi selittäväksi tekijäksi terästen K355 ja K420 paremmalle reiänlaajennussuhteelle. Jatkossa voitaisiin suorittaa lisätutkimuksia leikkausreunalle ja tutkia myös pitääkö teoria ISO–testin kartiomaisen pistimen vaikutuksesta paikkansa.

LÄHTEET

- Akola, Toni 2013. Reiänlaajennuskokeiden vertailu. Opinnäytetyö. Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu, Kemi.
- Asnafi, Nader. On stretch and shrink flanging of sheet aluminium by fluid forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999.
- A. Col & P. Jousserand. Mechanisms involved in the hole expansion test. Auto Products Research Centre, 2008.
- Gutiérrez, D. & Al. Strategies to improve stretch-flangeability in advanced high strength steels. Department of Materials Technology CTM Technology Centre, 2012.
- Hasegawa Kohei & Al. 2004. Effects of Microstructure on Stretch-flange-formability of 900MPa Grade Cold-rolled ultra high strength steel sheets. ISIJ International.
- Juntunen, Päivi 2010. Tutkimus teräksen EN 1.4512 rajamuovattavuudesta. Opinnäytetyö. Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu, Kemi.
- Ken-ichiro Mori & Al, 2010. Improvement of stretch flangeability of ultra high strength steel sheet by smoothing of sheared edge. Toyohashi University of Technology.
- Kivivuori, Seppo. Ohutlevy 1/2011. Hakupäivä 13.3.2014.
< http://www.ohutlevy.com/pdf/terasohutlevy_seppo_kivivuori.pdf>
- Kivivuori, Seppo. Ohutlevy 2/2006. Hakupäivä 6.3.2014.
< http://www.ohutlevy.com/pdf/Ohutlevy206_s58-62.pdf>
- Kutuniva, Kari 2011. Pistingeometrian vaikutus ultralujan teräksen lävistysvoimaan. Diplomityö. Oulun yliopisto.
- Martikainen, Lassi. Ohutlevy 2/2006. Hakupäivä 26.3.2014.
< http://www.ohutlevy.com/pdf/Ohutlevy206_s52-56.pdf>
- Pathak, N. & Al. Influence of the sheared edge condition on the hole expansion of dual phase steel. IDDGR 2013 Conference.
- Ruukki Metals Oyn www-sivut. Hakupäivä 1.4.2014.
< <http://www.ruukki.fi>>
- Takahashi M. & Al. High Strength Hot-rolled Steel Sheets for Automobiles. Nippon Steel technical report, 2003.
- Thomas, Daniel J. 2013. Understanding the effects of mechanical and laser cut-edges to prevent formability ruptures during automotive manufacturing.
- Van Tyne, C.J. & Levy, B.S. 2008. Failure During Sheared Edge Stretching. *Journal of Materials Engineering and Performance*.
- Van Tyne, C.J. & Levy, B.S. Sheared Edge Stretching – The Role of the Shear Affected Zone (SAZ). Department of Metallurgical and Materials Engineering, Colorado School of Mines.
- Vierelä, Raimo. Materiaalien käytettävyys. Tekninen raportti. 2013.
- Vierelä, Raimo 2012. Rajamuovattavuustutkimus kuumavalssatulle teräkselle Optim 650 MC. Opinnäytetyö. Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu, Kemi.