

KEMI-TORNION AMMATTIKORKEAKOULU

Tutkimus teräksen EN 1.4512 rajamuovattavuudesta

Advanced Strain Analysis

Päivi Juntunen

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelman opinnäytetyö

Konetekniikka
Insinööri(AMK)

KEMI 2010

ALKUSANAT

Haluan esittää kiitokset kaikille, jotka ovat jollain tapaa vaikuttaneet tämän opinnäytetyön toteutumiseen ja valmistumiseen. Erityiskiitokset opinnäytetyön toimeksiantajalle Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun Tekniikan T&K-osastolle ja siellä erityisesti TkL Timo Kaupille ja ASA:n projektipäällikölle DI Jukka Joutsenvaaralle mielenkiintoisen aiheen tarjoamisesta sekä DI Mari-Selina Kantaselle loistavasta työn ohjauksesta. Suuret kiitokset myös projekti-insinööri Marko Ylitölvalle GOM Aramis–operaattorina / asiantuntijana toimimisesta kokeellisten testausten aikana. Kiitos kuuluu tietysti myös Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun T&K-osaston koko henkilöstölle aina niin iloisesta työilmapiiristä.

Suurimmat kiitokset osoitan avopuolisolleni tuesta ja kannustamisesta tämän opinnäytetyön ja opintojeni aikana.

TIIVISTELMÄ

Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu, Tekniikan yksikkö	
Koulutusohjelma	Kone- ja tuotantotekniikka
Opinnäytetyön tekijä	Päivi Juntunen
Opinnäytetyön nimi	Tutkimus teräksen EN 1.4512 rajamuovattavuudesta
Työn laji	Opinnäytetyö
päiväys	9.12.2010
sivumäärä	50 + 13 liitesivua
Opinnäytetyön ohjaaja	DI Mari-Selina Kantanen
Yritys	Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu, Tekniikka T&K, Advanced Strain Analysis -projekti
Yrityksen yhteyshenkilö/valvoja	TkL Timo Kauppi

Opinnäytetyön lähtökohtana oli selvittää ferriittisen ruostumattoman teräksen EN 1.4512 muovattavuutta rajamuovattavuuden sekä mekaanisten ominaisuuksien avulla. Muovattavuusominaisuuksien ohessa selvitettiin muovattavuuskokeiden toteutustavat teoriassa ja käytännössä laitteilla, jotka sijaitsevat Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun rikkovan aineenکوetuksen laboratoriossa.

Tärkein tavoite oli muodostaa tutkittavalle materiaalille sekä verrokkimateriaaleille rajamuovattavuuskäyrät, jotka toteutettiin Nakajima-testillä. Nakajima-testit suoritettiin Erichsen 145-60 ohutlevyjen muovattavuustutkimuslaitteella ja muovattujen näytteiden venymätarkastelut toteutettiin online-mittauksina GOM:n optista 3D-mittausjärjestelmää ja ARAMIS-sovellusta käyttäen.

Rajamuovattavuustesteissä huomattiin useiden tekijöiden vaikuttavan rajamuovattavuuskäyrän luontiin Aramiksella. Näytteiden pinnan stokastisen maalauksen piti olla erittäin tasalaatuinen, jotta pinnan tunnistaminen kameroilla onnistui moitteettomasti. Lisäksi testattavia näytteitä olisi saanut olla enemmän kuin varatut viisi kpl/geometria.

Rajamuovattavuuskäyrät muodostettiin tutkittavana olleen materiaalin kahdelle levyvahvuudelle sekä kahdelle verrokkimateriaalille. Näytteiden kuvauksissa ilmenneiden ongelmien vuoksi osa rajamuovattavuuskäyrästä muodostettiin suppeammasta näytemäärästä kuin standardi suosittelee. Saaduista tuloksista todettiin, että laadun EN 1.4512 rajamuovattavuus on parempi kuin vertailussa olleen EN 1.4016-laadun. Kokonaan toisesta teräsryhmästä vertailussa ollut syvävetoteräs EN 1.0306:lla oli näitä molempia ruostumattomia teräslaatuja parempi rajamuovattavuus. Materiaalien muovattavuusominaisuuksien kokeellisten testausten perusteella todettiin laadun EN 1.4512 soveltuvan hyvin syvävetosekä venytysmuovaussovelluksiin. Materiaalin korkea rajavetosuhde ja r-arvot olivat todistena sen hyvistä syväveto-ominaisuuksista.

Asiasanat: muovaus, ruostumaton teräs, ohutlevyt.

ABSTRACT

Kemi-Tornio University of Applied Sciences, Technology	
Degree Programme	Mechanical and Production Engineering
Name	Päivi Juntunen
Title	Research of Ferritic Stainless Steel Formability
Type of Study	Bachelor's Thesis
Date	9 December 2010
Pages	50 + 13 appendixes
Instructor	Mari-Selina Kantanen, MSc (Tech.)
Company	Kemi-Tornio University of Applied Sciences, Technology R&D, Advanced Strain Analysis - project
Contact Person/Supervisor from Company	Timo Kauppi, LicSc (Tech.)

The starting point for the thesis was to study the formability of the ferritic stainless steel EN 1.4512 based on the limiting formability and the mechanical properties of material. In addition to the research work the technical realization of the formability tests which were done with the sheet metal testing machine were defined in Kemi-Tornio University of Applied Sciences material testing laboratory.

The most important objective was to create forming limit curve (FLC) of the material EN 1.4512. The limiting formability was tested using the Nakajima test. The forming limit tests were performed with the sheet metal testing machine, Erichsen 145-60, and the stretch examinations of formed samples were performed with as an the GOM's optical 3D measurement system and the application ARAMIS.

There were several problems which affected the creation of the forming limit curve with ARAMIS. The stochastic pattern of the sample surfaces had to be extremely good so that the identification of the surface succeeded. To get the sufficient measurement results there should have been more than five test pieces per geometry.

The FLC was created for the EN 1.4512, EN 1.4016 and EN 1.0306. Some of the forming limit curves have been formed from a smaller number of samples than the standard recommends due to the problems in the descriptions of the samples. However, one can conclude from the obtained results that the limit formability of the steel EN 1.4512 is better compared to the steel EN 1.4016. The deep drawing steel EN 1.0306 in the comparison was better than these both stainless steels in its limit formability. The experimental formability tests showed that the ferritic stainless steel EN 1.4512 suiting extremely well for a deep drawing and forming processes.

Keywords: FLC, forming, stainless steel, sheet metal.

SISÄLLYSLUETTELO

ALKUSANAT	I
TIIVISTELMÄ	II
ABSTRACT	III
SISÄLLYSLUETTELO.....	IV
KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET	VI
1. JOHDANTO	1
1.1. Advanced Strain Analysis -hanke	1
1.2. Opinnäytetyön rajaukset, lähtökohta ja tavoitteet.....	1
2. OHUTLEVYJEN MUOVATTAVUUS	3
2.1. Rajamuovattavuus	4
2.1.1. Nakajima-testi	5
2.1.2. Rajamuovattavuuspiirros.....	7
2.1.3. Rajamuovattavuuskäyrän määrittäminen.....	11
2.2. Erichsenin luku.....	16
2.3. Rajavetosuhde	17
2.4. Vetokokeen avulla määriteltävät ominaisuudet	20
2.4.1. Ohutlevyjen testauksessa käytettävät vetokoesauvat.....	20
2.4.2. Ohutlevyn anisotropia ja muokkauslujittuminen	22
3. FERRIITTISET RUOSTUMATTOMAT TERÄKSET	27
3.1. Ferriittinen ruostumaton teräs EN 1.4512.....	29
3.2. Teräksen EN 1.4512 ominaisuudet	30
4. KOKEELLINEN TUTKIMUS	33
4.1. Testauslaitteisto ja suoritettut testit.....	33
4.2. Testatut materiaalit.....	33
4.2.1. Rajamuovattavuuden kokeellinen määrittäminen	34
4.2.2. Erichsenin luvun kokeellinen määrittäminen.....	35
4.2.3. Rajavetosuhteen kokeellinen määrittäminen.....	36
4.2.4. Mekaanisten ominaisuuksien kokeellinen määrittäminen vetokokeella.....	38
5. TULOKSET, TULOSTEN TARKASTELU JA ESIINTYNEET ONGELMAT.....	39
5.1. Rajamuovattavuus	39

5.1.1.	EN 1.4512 rajamuovattavuus	39
5.1.2.	EN 1.4016 rajamuovattavuus vs. EN 1.4512	41
5.1.3.	EN 1.0306 rajamuovattavuus	42
5.2.	Rajavetosuhde	43
5.3.	Erichsenin luku.....	44
5.4.	Mekaaniset ominaisuudet.....	45
6.	YHTEENVETO	46
7.	LÄHDELUETTELO	47
8.	LIITELUETTELO	50

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

A	Murtovenymä
A_g	Plastinen tasavenymä suurimmalla voimalla
ASA	Advanced Strain Analysis
FEM	Finite Element Method, elementtimenetelmä
FLC	Forming limit curve, rajamuovattavuuskäyrä
FLD	Forming limit diagram, rajamuovattavuusdiagrammi
GOM	Gesellschaft für Optische Messtechnik
IE	Erichsenin luku, Erichsen index
LDR	Limited drawing ratio, rajavetosuhde
K-B	Keeler-Brazier FLD ₀ kaava
n	Muokkauslujittumiseksponentti
r	Plastinen venymäsuhde, normaali anisotropia
\bar{r}	Plastisen venymäsuhteen keskiarvo
R_m	Murtolujuus
$R_{p0,2}$	Plastiseen pitenemään perustuva venymisraja 0,2 % kohdalla, l. myötöraja
SHF	Sheet Holder Force, aihion pidinvoima
T&K	Tutkimus ja kehitys
2B	Sileä pinta: kylmävalssaus, hehkutus, peittäus ja viimeistelyvalssaus
2E	Karhea, mattapinta: Kylmävalssaus, hehkutus, kuulapuhallus ja peittäus
2R	Sileä, kirkas ja heijastava pinta: kylmävalssaus, kiiltohehkutus
Δr -arvo	Anisotrooppisuus tasossa

1. JOHDANTO

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimii Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun Tekniikan yksikön T&K-osasto ja työ tehdään Advanced Strain Analysis -hankkeelle yhteistyössä Outokummun Tornion-tehtaan tutkimuskeskuksen kanssa.

1.1. Advanced Strain Analysis -hanke

Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun tekniikan T&K-osaston materiaalien käytettävyyden tutkimusryhmän projekti Advanced Strain Analysis eli ASA on muovaukseen ja muodonmuutoksiin liittyvän venymäanalysoinnin mittaussovelluksien tutkimushanke. Ohutlevyjen muodonmuutosten online- ja offline-mittaamiseen on Kemi-Tornion ammattikorkeakoululle hankittu GOM:n kamerajärjestelmä, joka on yhtenä tärkeänä sovellusten ja venymien mittaustekniikoiden kehittämisvälineenä ASA-projektissa. Projektin tavoitteena on ratkaista GOM:n optista mittausjärjestelmää käyttäen venymiin, muodonmuutoksiin ja suunnitteluun liittyviä mittausongelmia, joita yhteistyöyrityksissä on ilmennyt. Mittausteknologiaa voidaan soveltaa esim. vetokokeeseen, hitsien muodonmuutosten mittaukseen, muovattujen tuotteiden venymäanalysointiin, roping-pintavikojen havainnointiin, FEM-mallien evaluointiin ja rasiusten alaisten rakenteiden muodonmuutosten mittaamiseen. /15, s. 3-4/

1.2. Opinnäytetyön rajaukset, lähtökohta ja tavoitteet

Opinnäytetyön aihe on yksi ASA-projektiin liittyvä muovattavuuden, muodonmuutosten, mittauksen ja venymäanalysoinnin kokonaisuus. Työn lähtökohtana on tutkia Outokummun ferriittisen ruostumattoman teräksen EN 1.4512:ta muovattavuutta Erichsen 145-60 ohutlevyjen muovattavuustutkimuslaitetta, Zwick Allround 250kN -vetokonetta ja GOM:n ARAMIS-laitteistoa yhteistyössä soveltaen.

Tavoitteena on muodostaa materiaalin EN 1.4512 rajamuovattavuuskäyrä (FLC) Nakajima-muovattavuuskokeiden ja ARAMIS-mittaustulosten avulla. Lisäksi selvitetään kyseisen materiaalin normaalianisotropia, anisotrooppisuus tasossa, myötöraja, murtolujuus, murtovenymä, tasavenymä ja muokkauslujittumiseksponentti n vetokokeiden avulla. Näiden lisäksi selvitetään muovattavuutta kuvaavat Erichsenin luvut kupinvenytyskokeella ja rajavetosuhde Swiftin kuppikokeella. Rajamuovattavuuden verrokkimateriaalina käytetään kiiltohehkutettua EN 1.4016 -terästä sekä EN 1.0306 (DX 54D) -syvävetoterästä.

Työssä perehdytään rajamuovattavuuskäyrän (FLC) määrittämiseen ja tulkintaan, ohutlevyjien muovattavuustesteihin, sekä ferriittisen ruostumattoman teräksen muovattavuusominaisuuksiin. Lisäksi tavoitteena on tuottaa käytännön työohjeet rajamuovattavuuden määrittämiseen Nakajima-testin avulla.

Opinnäytetyön rajaus

Tutkittava materiaali on ferriittinen ruostumaton teräs EN 1.4512 (1 ja 1,5 mm), jonka rajamuovattavuutta verrataan kiiltohehkutettuun ferriittiseen ruostumattomaan teräkseen EN 1.4016 (0,5 mm) sekä sinkittyyn syvävetoteräkseen EN 1.0306 (0,6 mm).

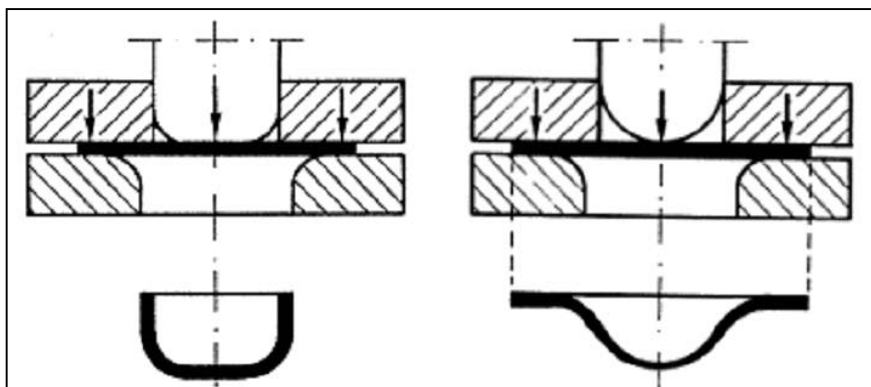
Tutkittavista laaduista valmistetaan olemassa olevien ohjeiden/standardien mukaiset näytehiot Torniossa Jaloterässtudiolla. Näytteet testataan standardien mukaan. Materiaaleille suoritettavat testit ovat:

- Nakajima (FLC) testi (EN 1.4016, EN 1.4512 ja EN 1.0306)
- Erichsen no:27 (EN 1.4512)
- Vetokoe (EN 1.4512)
- Swift (EN 1.4512)

Nakajima-testissä ja vetokokeessa käytetään venymien mittaukseen, r -arvojen määrittämiseen ja rajamuovattavuuskäyrän muodostamiseen GOM-laitteistoa ja ARAMIS-ohjelmistoa.

2. OHUTLEVYJEN MUOVATTAVUUS

Ohutlevyjen muovaustavat voidaan jakaa levyyn kohdistuvien muovaavien jännitysten mukaan kahteen eri menetelmään, syvävetoon ja venytysvetoon (kuva 1). Syvävedossa muovattava aihio liukuu pidinten välistä painimen painaessa sitä muotoonsa eikä levyn ohenemista tapahdu. Syväveto tehdään hallitusti sopivan pientä pidinvoimaa käyttäen ja syntyvän kupin halkaisija on pienempi kuin alkuperäisen aihion ja sen seinämän paksuus pysyy samana tai voi jopa kasvaa hiukan. Syvävedossa voidaan muovausta jatkaa edelleen käyttämällä pienempää painimen halkaisijaa, tätä kutsutaan jatkovedoksi, joka mahdollistaa syvempien tuotteiden valmistuksen. Jatkovedon onnistumista voidaan parantaa palauttamalla syvävedetyn kappaleen plastiset ominaisuudet välihehkuttamalla. Esimerkiksi ruostumattoman teräksen jatkoveto helpottuu, kun syvävedettyä kappaletta hehkutetaan yli 1000 °C:een lämpötilassa. Hehkutuksen jälkeen tummunut kappaleen pinta täytyy puhdistaa ja uudelleen passivoida kemiallisella käsittelyllä ennen jatkovetoa. Venytysmuovaus poikkeaa syvävedosta siten, että aihio muovautuu venymällä sekä säteen että tangentin suuntaisesti levyn ohetessa muovausalueelta. Riittävän suuren pidinvoiman ansiosta aihion reunat pysyvät pidinten välissä aihion pinta-alan kasvaessa. Näitä molempia muovaustapoja voi esiintyä käytännön levynmuovausprosessissa samanaikaisesti. /4/, /18, s. 58-62/



Kuva 1. Syvävedon ja venytysvedon periaatteet/18, s.58/

Hyvällä muovattavuudella tarkoitetaan materiaalin kykyä kestää plastista muodonmuutosta ilman paikallista kuroumaa tai murtumaa. Tärkeimmät ohutlevyjen muovattavuusominaisuuksista kertovat tekijät ovat materiaalin muokkauslujittumiseksponentti n , muodonmuu-

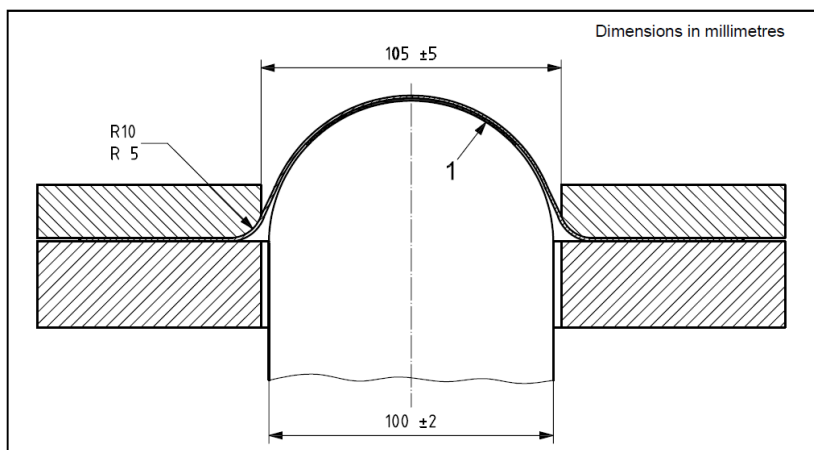
tosnopeuden arvo m ja plastisen venymäsuhteen arvo r , jotka saadaan selville yksiakσιαalisella vetokokeella. Mitä suurempia nämä arvot ovat, sitä parempi on levyn muovattavuus. Muovattavuudesta kertovat myös materiaalille syvävetotestauksilla määriteltävä rajave-tosuhde (LDR) ja Ericseenin testin tuloksena saatava Erichsenin luku. Vetokokeisiin ja si-muloiviin kokeisiin perustuvat yksittäiset parametrit antavat tietynlaisen kuvan ohutlevyn muovattavuudesta, mutta ne eivät välttämättä riitä todellisen muovausprosessin onnistumi-sen arvioimiseen. Käytännön muovausprosessissa muodostuu ohutlevyyn kaksiakσιαalista jännitystä ja levyn eri osissa tapahtuu erityyppistä sekä voimakkuudeltaan erisuuruista muokkautumista. Siksi onkin syytä määrittää ohutlevyn muovattavuuden rajat tason suun-taisella venytysmuovaustestauksella ja havainnollistaa ne rajamuovattavuuskäyrän (For-ming Limit Curve, FLC) avulla./22, s. 52-56/,/25/

2.1. Rajamuovattavuus

Ohutlevyjen rajamuovattavuuden määrittelyn historia ulottuu aina 1940-luvulle asti, jolloin Gensamer julkaisi vuonna 1946 ensimmäiset rajamuovattavuuspiirroksat. Nykyään tunne-tun rajamuovattavuuspiirrostyypin kehittämisen aloitti Keeler-niminen tutkija jo vuonna 1965. Tämän pohjalta kehitystyötä jatkoi Goodwin 60-luvun loppuun asti ja siksi tätä ra-jamuovattavuusdiagrammia (FLD) kutsutaankin Keeler-Goodwin -diagrammiksi. Yli 40 vuoden aikana useat tutkijat ovat kehittäneet uusia tapoja ja kriteerejä ohutlevyjen raja-muovattavuuden tutkimus- ja mittausmenetelmiin. Nykyään jo standardoidut rajamuovat-tavuustestit ovat saaneet nimensä näiden tutkijoiden nimistä, kuten Marciniack- ja Nakaji-ma-testit. Standardoiduilla testausmenettelyillä on pyritty saamaan selkeät ohjeet raja-muovattavuuden määrittämiselle, jotta eri tutkimuspaikoissa saadut tulokset olisivat vertai-lukelpoisia keskenään. Materiaalien rajamuovattavuuspiirroksia voidaan hyödyntää tutki-muksissa, joissa tutkitaan käytännön muovauksissa esiintyviä ongelmia. Suurena apuna rajamuovattavuuspiirroksat ovat FEM-simuloinnissa, jossa usein ongelmana on materiaalin repeytymisen arviointi, joka ilman rajamuovattavuuskäyrää on arvioitava paksuusjakaumi-en perusteella./6, s.241/,/10/,/22, s. 52-56/

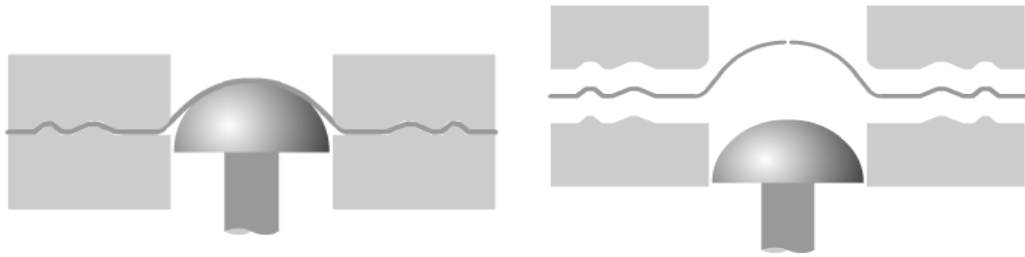
2.1.1. Nakajima-testi

Ohutlevyn rajamuovattavuuden kokeelliseen määrittämiseen käytetään mm. Nakajima-testiä. FLC:n määrittämiseen Nakajima-testillä on olemassa standardi ISO 12004-2. Standardin mukaan Nakajima-testissä ohutlevyn vahvuuksille 0,3 mm - 4 mm käytetään puolipallon muotoista halkaisijaltaan 100 mm olevaa painintyökäluä sekä pidinrengasta, jonka sisähalkaisija on 105 mm tai suurempi kuin painimen halkaisija + 2,5 kertaa testattavan materiaalin vahvuus (kuva 2).



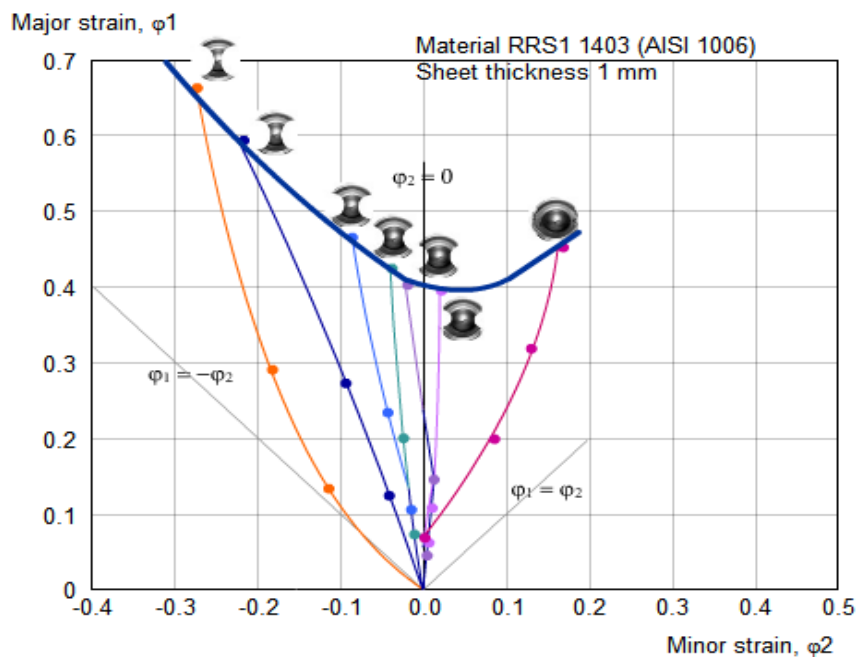
Kuva 2. Nakajima-testin standardinmukaisten työkalujen mitat/13/

Nakajima-testin periaatteena on muovata venymämittauksia varten kuvioituja ohutlevynäytteitä puolipallon muotoisella painimella nopeudella $1,5 \pm 0,5$ mm/s niin kauan, että näyte murtuu (kuva 3). Muovauksen aikana aihion liukuminen pitäisi estää mahdollisimman hyvin, jotta voitaisiin saavuttaa lähes lineaarinen venymä. Liukumisen estämiseksi käytetään pyällettyjä aihion pidinrenkaita (kuva 3), joiden väliin näyteaiho puristetaan riittävän suurella voimalla. Kitkan haitallinen vaikutus muovaustapahtumassa tulee estää oikeanlaisella voitelulla ja käyttämällä painimen ja näyteen välissä standardin suosittelemaa muovikalvoa. Murtuman muodostuminen muovatun näyteen korkeimman kohdan alueelle on mahdollista juuri kitkaa vähentävän riittävän voitelun ja muovikalvojen avulla. Standardin mukaan murtuman tulisi sijaita korkeintaan 15 mm:n etäisyydellä muovatun kuvun laelta.



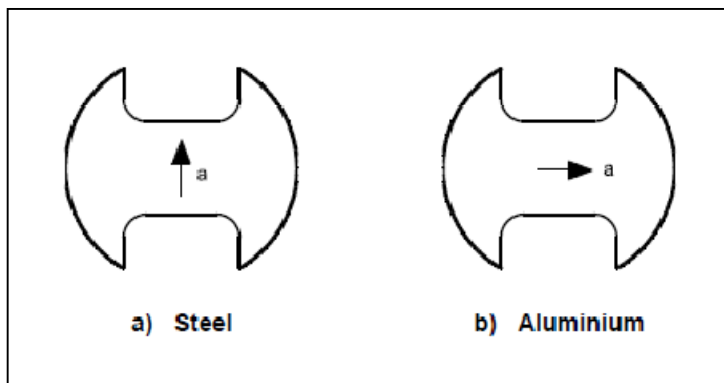
Kuva 3. Nakajima-testin periaate/31/

Rajamuovattavuuskäyrän määrittämiseen Nakajima-testillä käytetään standardin mukaan vähintään viittä eri geometrian omaavaa näytettä, jota kutakin on vähintään kolme kappaletta. Näytteet voivat olla muodoiltaan ns. circular shaft -tyylisiä (kuva 4), joiden kavennuskohdat on toteutettu eri säteisillä kaarilla. Suositeltavampaa on kuitenkin käyttää ns. parallel shaft -tyylistä näytettä, jossa näytteen kavennus on toteutettu yhdensuuntaisella suoralla osuudella (kuva 5). Näytteen kavennetun kohdan leveyttä vaihtelemalla saadaan muodostettua muovaustuloksista kuvassa 4 esitetyn kaltainen rajamuovattavuuskäyrä. Pääasiassa pehmeitä teräksiä testattaessa voidaan käyttää myös erilevyisiä suorakaiteen muotoisia näyteaihoita.



Kuva 4. Testattujen circular shaft -tyylisten näytteiden venymien sijoittuminen rajamuovattavuuspiirroksessa/5/

Käytettäessä standardin 12004-2 mukaista menetelmää, pääsuunta kaikissa testikappaleissa pitäisi olla matalimman päävenymän suuntaisesti, täten myös valssaussuunnan on oltava sama jokaisessa näytteessä, kuva 5. Näytteiden muotoon leikkaaminen tulee toteuttaa menetelmällä, mistä ei aiheudu näytteen pintaan tai reunoihin naarmuja eikä materiaalin ominaisuuksiin vaikuttavia asioita, kuten muokkauslujittumista ja mikrorakenteen muutoksia. Tällaiset työstön aikana syntyneet muutokset näyttemateriaalissa voivat vaikuttaa merkittävästi testaustuloksiin. Näytteen pinta kuvioidaan venymien tarkasteluja varten esim. ympyräverkkokuviolla tai stokastisella (satunnaisella) kuviolla riippuen käytettävästä mittausmenetelmästä. Kuvioinnin täytyy pysyä näytteen pinnassa muovauksen ajan, mutta se täytyy toteuttaa aiheuttamatta pintaan naarmuja tai muita vaurioita. Ympyräverkkokuviointi toteutetaan yleensä elektrolyyttisyövytyksellä ja stokastinen kuviointi spraymaalauksella. Tarkemmat ohjeet näytteiden valmistukseen ja esikäsittelyyn on kerrottu liitteessä 1./13, s. 3-8/

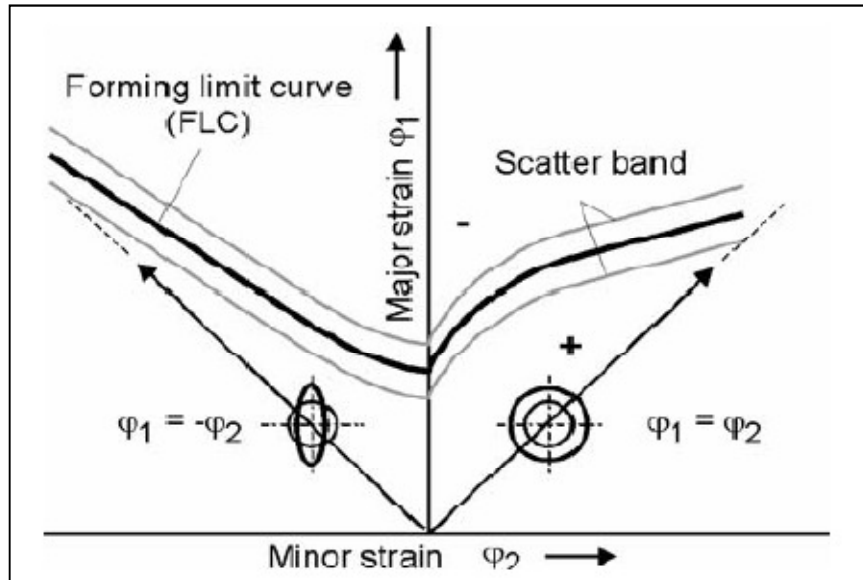


Kuva 5. Yhdensuuntaisilla suorilla osuuksilla kavennetut näytemuodot, joissa on merkitty käytettävä valssaussuunta a) teräkselle ja b) alumiinille/13, s. 6/

2.1.2. Rajamuovattavuuspiirros

Ohutlevyjen rajamuovattavuudesta puhuttaessa käytetään yleensä termejä rajamuovattavuuskäyrä (Forming Limit Curve, FLC) ja rajamuovattavuuspiirros (Forming Limit Diagram, FLD). Usein näillä tarkoitetaan samaa asiaa ja ne liittyvätkin toisiinsa siten, että rajamuovattavuuspiirros sisältää yhden tai useamman materiaalin rajamuovattavuuskäyrän, joka erottaa toisistaan onnistuneet ja murtumaan johtaneen muovauksen hajonnan (kuva 6).

Toisin sanoen rajamuovattavuuskäyrä määrittää kriittisen muovattavuuden rajan metallisen materiaalin murtumiselle./6/,/22, s.53/

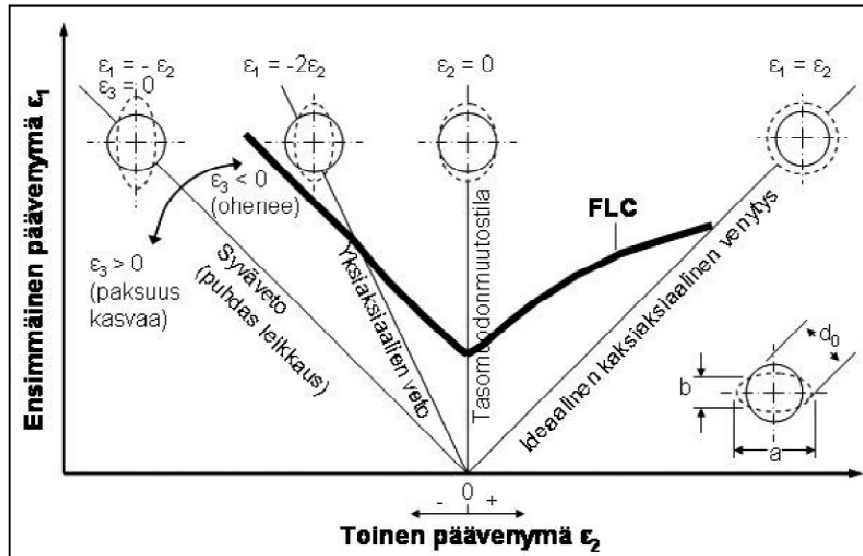


Kuva 6. Rajamuovattavuuspiirros, jossa on rajamuovattavuuskäyrä hajonta-alueineen./6/

Rajamuovattavuuskäyrän ominaisasema, muoto ja hajonta-alue rajamuovattavuuspiirroksessa riippuvat useista kokeellisista olosuhteista ja materiaalin ominaisuuksista. Ensisijaisesti vaikuttavia asioita ovat kokeessa käytettävien työkalujen muodot, näytteiden geometriat, kitkan vaikutus, ohutlevyn paksuus ja muut sen ominaisuudet. Materiaaliominaisuuksien vaikutus johtuu yksinkertaisesti materiaalin kemiallisesta ja mekaanisesta koostumuksesta, muokkauslujittumiseksponentista sekä anisotropiasta./6/

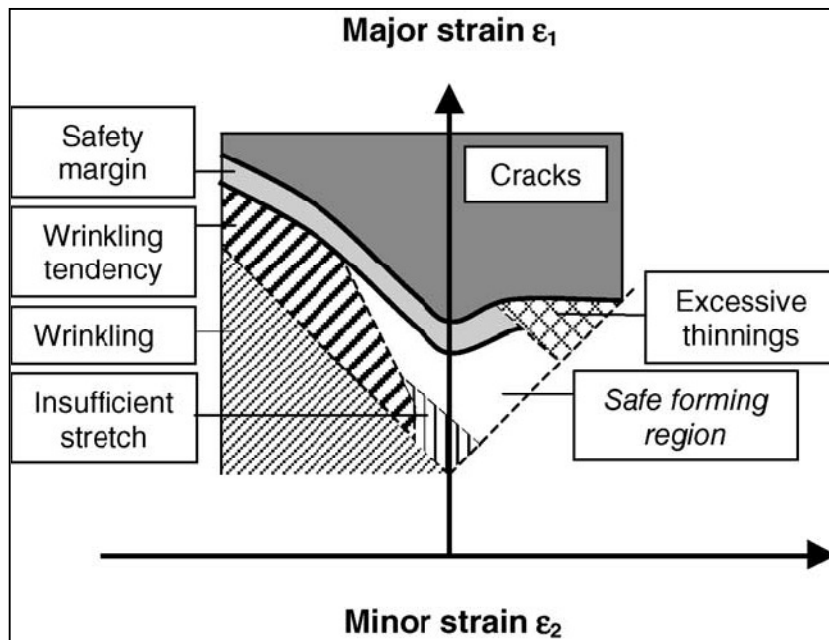
Rajamuovattavuuspiirroksen (FLD) avulla voidaan havainnollisesti ja kattavasti määrittellä ohutlevyn muovattavuuden rajat tason suuntaisten venymien avulla erityyppisissä muovausolosuhteissa. Rajamuovattavuudella voidaan havainnollistaa sekä hajanainen että paikallinen kurouma. Hajanaista kuroumaa ilmenee, kun homogeeninen muodonmuutos loppuu ja materiaali saavuttaa maksimijännityksen, tällöin kuroutumista tapahtuu molempiin suuntiin. Paikallista kuroumaa esiintyy puolestaan tämän jälkeen, kun tietyn suuntainen venymä materiaalissa lähestyy nollaa, joten silloin kuroutumista tapahtuu vain paksuus-suunnassa ilman leveyden kutistumista. Rajamuovattavuuspiirros esitetään ns. päävenymä-koordinaatistossa, jonka pystyakselilla on ensimmäinen päävenymä ϵ_1 ja vaaka-akselilla

toinen päävenymä ε_2 (kuva 7). Päävenymät valitaan valssaussuunnan suuntaisesti ja sitä vasten kohtisuoraan./10/,/16/,/22, s.52-56/



Kuva 7. Rajamuovattavuuspiirros päävenymäkoordinaatistossa /22, s.52/

Päävenymät ε_1 ja ε_2 ilmoitetaan yleensä rajamuovattavuuspiirroksessa todellisina venyminä, joskus käytetään myös suhteellista venymää. Positiiviset venymäarvot pysty akselin oikealla puolella merkitsevät venyttävää muodonmuutosta, joten sitä puolta kutsutaankin venytysmuovauspuoleksi. Idealisessa kaksiaksiaalisessa venytyksessä levyn tasossa vaikuttavat jännitykset ja niitä vastaavat venymät ovat positiivisia ja samansuuruisia. Pysty akselille muodostuu ns. tasomuodonmuutostila, joka syntyy kun toinen päävenymä ε_2 häviää. Tämä tasomuodonmuutostilan kohta on rajamuovattavuuskäyrän alin piste, joten tässä tilassa syntyy yleisimmin murtumia muovaustapahtumassa. Pysty akselin vasemman puolen päävenymistä toinen on negatiivinen, mikä tarkoittaa puristavaa muodonmuutosta, ja sitä puolta kutsutaankin syvävedopuoleksi. Negatiivisella puolella tulee tietyssä vaiheessa vastaan raja, jossa paksuussuuntainen venymä ε_3 häviää, tällöin voidaan puhua puhtaasta syvävedosta./13/,/22, s.52-56/



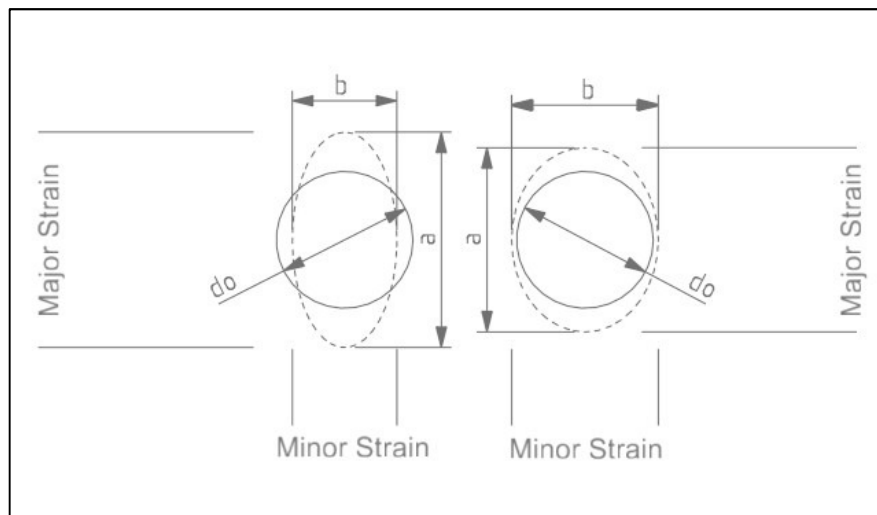
Kuva 8. Rajamuovattavuuskäyrästä nähdään turvallisen muovauksen rajat/9/

Rajamuovattavuuspiirrosta käytetään monissa ohutlevyjen muovaukseen liittyvissä tehtävissä, kuten arvioitaessa saavutettavaa muovaustulosta, valittaessa sopivaa materiaalia muovausprosessiin ja suunniteltaessa muovausmenetelmää. Tuotteen venymien analysoinnissa mitataan tehdystä kappaleesta päävenymät ja verrataan niitä kyseisen levy materiaalin rajamuovattavuuskäyrään. Vertailun avulla voidaan selvittää, kuinka lähellä kappaleen venymätila on muovattavuuden kriittisiä rajoja ja millaisia ongelmia muovaustapahtumassa voi esiintyä (kuva 8). Näin nähdään, ilmeneekö tuotteen joissakin osissa mahdollisesti liiallista ohenemista, rypistymistä ja soveltuuko kyseinen materiaali muovauskohteeseen. Rajamuovattavuuskäyrän avulla voidaan myös tarkistaa, voitaisiinko materiaalin soveltuvuutta vielä parantaa esimerkiksi optimoimalla joitain muotoja tai käyttämällä muovauksessa lisävoitelua sen sijaan, että siirryttäisiin kalliimpaan paremmin muovattavaan materiaaliin. Mikäli kappaleesta mitatut venymät jäävät huomattavasti alle materiaalin rajamuovattavuuskäyrän, voidaan parhaimmassa tapauksessa siirtyä jopa halvempaan materiaaliin. Monimutkaisten muovattavien ohutlevykappaleiden muovausta analysoidaan usein myös numeeristen laskelmien eli FEM:n (elementtimallin) avulla, jolloin rajamuovattavuuskäyrän olemassaolo on erittäin hyödyllistä. Rajamuovattavuuspiirrosta käytetään numeeristen laskentojen tulosten arviointiin, sillä muovaussimuloinneissa laskettujen tulosten avulla

ohutlevyjen repeytymistä on erittäin vaikea arvioida ilman rajamuovattavuuskäyrää./9/,/22, s. 52-54/

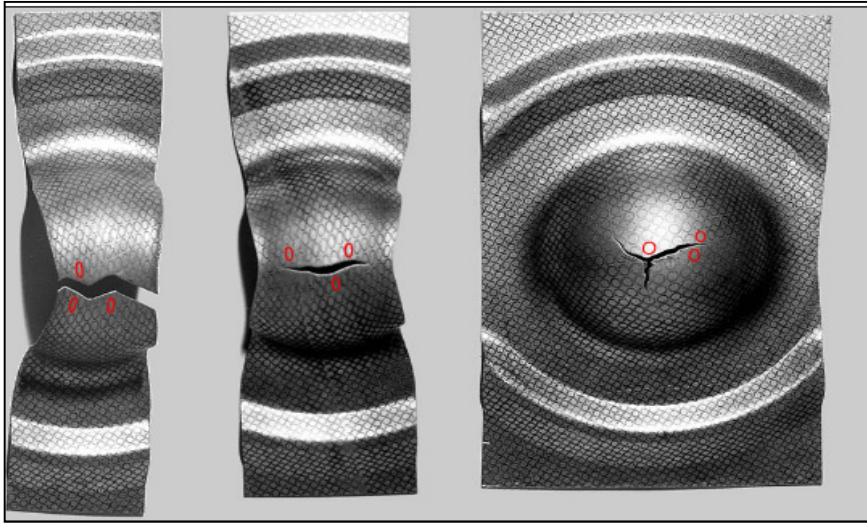
2.1.3. Rajamuovattavuuskäyrän määrittäminen

Rajamuovattavuuskäyrän kokeelliset päävenymät ilmennetään yksinkertaisimmillaan esimerkiksi käyttämällä ympyräverkkoanalyysia. Siinä testattavien näytteiden pintaan merkattujen tai syövytettyjen ympyräverkkokuvioiden siirtymiä tarkastelemalla saadaan mitattua muovauksessa tapahtuneet venymät.



Kuva 9. Ellipsien iso- ja pikkuakselit

Ympyräverkkokuvio koostuu saman halkaisijan omaavista säännöllisissä riveissä olevista ympyröistä, jotka muovauksen aikana venyvät ellipseiksi. Mittaamalla ellipsien iso- ja pikkuakselien pituudet a ja b (kuva 9) standardin määrittelemältä alueelta muovatun murtuneen ohutlevyn pinnalta (kuva 10) voidaan laskea vastaavat todelliset päävenymät kaavojen 1 ja 2 avulla tai suhteelliset venymät kaavojen 3 ja 4./18, s. 61-62/



Kuva 10. Ympyräverkkokuvioidut näytteet, joista mitataan ellipsien iso- ja pieni halkaisija murtuman rajalta./31/

Murtumaan rajoittuvien, kuroutuneiden ja ehjien ellipsien mitatut, erilaisilla symboleilla merkityt venymäarvot sijoitetaan koordinaatistoon. Ehjien ellipsien, turvallisella alueella sijaitsevien pisteiden yläpuolelle saadaan muodostettua rajamuovattavuuskäyrä (kuva 11). /10, s. 241-242/,/17/

$$\varepsilon_1 = \ln\left(\frac{a}{d_0}\right) \quad (1)$$

$$\varepsilon_2 = \ln\left(\frac{b}{d_0}\right) \quad (2)$$

$$e_1 = \frac{a - d_0}{d_0} \quad (3)$$

$$e_2 = \frac{b - d_0}{d_0} \quad (4)$$

missä ε_1 on ensimmäinen todellinen päävenymä

ε_2 on toinen todellinen päävenymä

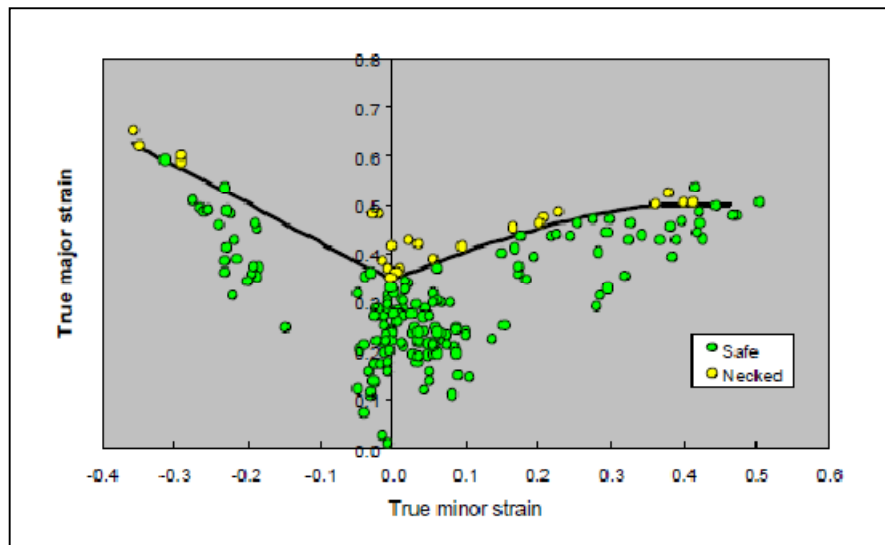
e_1 on ensimmäinen suhteellinen päävenymä

e_2 on toinen suhteellinen päävenymä

a on ellipsin isoakselin pituus

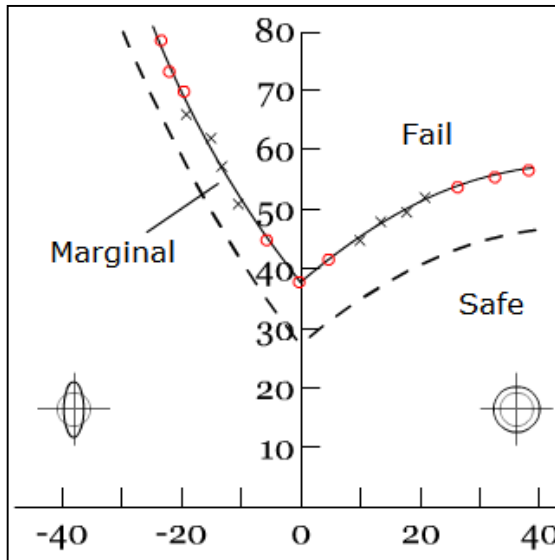
b on ellipsin pikkuakselin pituus

d_0 on alkuperäisen ympyrän halkaisija/22, s. 53/



Kuva 11. Erään teräslaadun rajamuovattavuuskäyrä todellisten venymien mukaan/24/

Kuten kuvasta 11 voidaan havaita, muodostetaan rajamuovattavuuskäyrä vaurioituneiden alueiden venymien ja ehjien alueiden venymien välille. Tätä rajaa ei voida kuitenkaan pitää käytännön muovausten suunnittelussa turvallisena rajana, koska muovauksen onnistumisen mittana ei välttämättä ole pelkästään levyn repeytymisen välttäminen, vaan kriteerinä voi olla myös paikallinen kuroutuminen tai levyn oheneminen, jotka tulevat näkyviin levyn pinnassa. Siksi käytännön suunnittelussa käytetään turvallisuusmarginaalin verran kokeellisesti määritetyn rajamuovattavuuskäyrän alapuolella olevaa rajakäyrää (kuva 12). Yleinen käytetty turvallisuusmarginaali rajakäyrälle on noin 10 % kokeellisen rajamuovattavuuskäyrän alapuolella./22, s. 53/



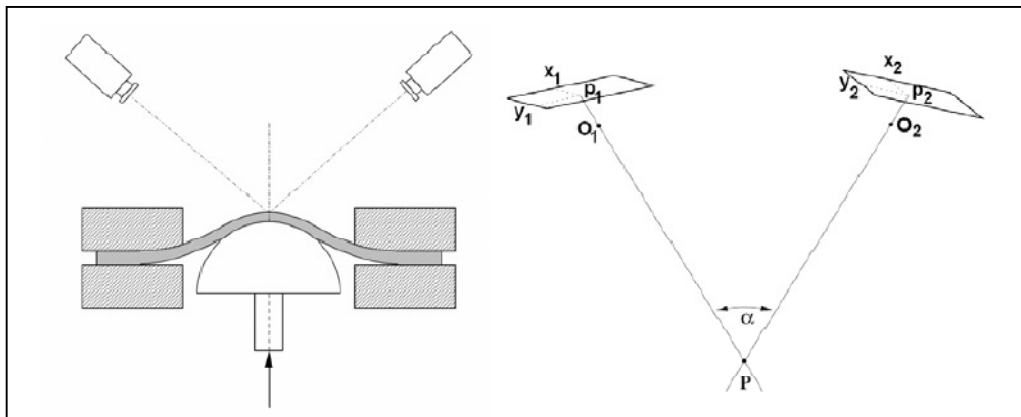
Kuva 12. Ylempi käyrä on kokeellisesti määritelty ja alempi turvallisuusmarginaalin ver-
ran alempana oleva suunnittelussa käytettävä rajakäyrä./31/

Tasomuodonmuutostilan alueelle pysty akselille tai sen lähetyville sijoittuvaa rajamuovat-
tavuus käyrän alinta pistettä kutsutaan FLD_0 - tai FLC_0 -kohdaksi, joka on kriittisin piste
ohutlevyn muovausprosessissa. Hiiliteräksillä tämä piste sijaitsee yleensä aika tarkoin pysty-
akselilla, mutta ruostumattomilla teräksillä se sijoittuu hieman pysty akselin oikealle puo-
lelle. FLC_0 -kohdan määrittämiseen on olemassa esimerkiksi ns. Keeler-Brazier (K-B)-
kaava, jolla saadaan levyn paksuuden ja muokkauslujittumiseksponentti n :n avulla lasken-
nallisesti selville rajakäyrän alin kohta (kaava 5). K-B-kaavan avulla lasketun FLC_0 -
pisteen kautta voidaan piirtää kyseisen materiaalin rajamuovattavuuskäyrä olettaen, että
käyrän muoto pysyy samana kuin vastaavilla ohutlevytyypeillä./16/,/22, s.54/,/24/

$$FLC_0^{True} = \ln \left\{ 1 + [23,3 + 14,13t] \frac{n}{0,21} \right\} \quad ; n \leq 0,21 \quad (5)$$

missä FLC_0^{True} on rajamuovattavuuskäyrän alin kohta
 t on levyn paksuus
 n on muokkauslujittumiseksponentti (15–20 %)

Nykyään rajamuovattavuuskäyrän määrittelyä helpottamaan on kehitetty mittauslaitteistoja, joiden tietokoneohjelmistot liitettyinä kamerajärjestelmiin mittaavat venymät ja laskevat tulokset muovaustapahtumista. Yksi tällainen standardin ISO 12004-2 mukaisia suosituksia laskennassa käyttävä 3D-mittausanalyysointilaite on GOM:n ARAMIS-sovellus. Tämä sovellus on kehitetty nykyajan tarpeisiin ohutlevyjen ominaisuuksien määrittämiseen tarkasti, toistettavasti ja tehokkaasti. Tämä järjestelmä sisältää tietokoneyksikön lisäksi kaksi CCD-kameraa ja valaistuslaitteiston, jotka sijoitetaan kuvaamaan muovaustapahtumaa (kuva 13). ARAMIS-ohjelman kanssa käytettävä FLC-testausmenetelmä on Nakajima-testi, jonka suorittamisessa käytetään vähintään viittä eri geometrian omaavaa näytettä, jota jokaista laatua on vähintään kolme kappaletta. Näytteiden pinnan kuvioinnissa käytetään ympyräverkkokuvion sijaan stokastista kuviointia. Tämän levyn pintaan maalatun kuvioinnin avulla ARAMIS mittaa ja laskee levyn venymiä muovauksen aikana otettavien kuvien avulla. /6/,/7/,/8, s. 5-6/



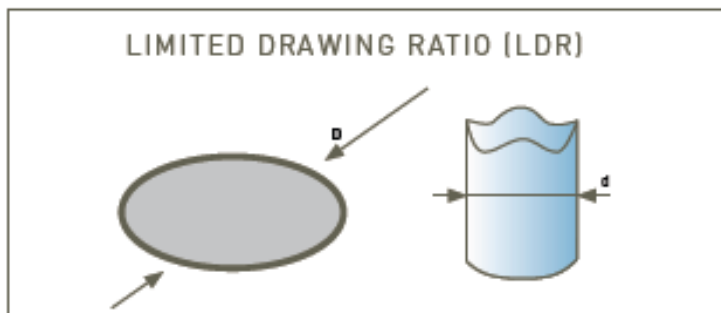
Kuva 13. Periaatekuva kameramittausjärjestelmästä/30/

Käytettäessä rajamuovattavuuskäyrän määrittämiseen optista mittausjärjestelmää, kuten ARAMIS:ta on tärkeää käyttää oikein valmistettuja näytteitä sekä suorittaa muovausprosessi ja kuvaus oikein. Liitteessä 1 on tarkemmat ohjeet näytteiden valmistamiseen ja kokeen suorittamiseen rajamuovattavuuskäyrän määrittämiseksi Erichsen-muovattavuustutkimuslaitteella ja ARAMIS-venymämittausanalyysointilaiteella.

painuman syvyys mitattuna painimen liikkeen perusteella ja se mitataan 0,1 mm tarkkuudella. Koe toistetaan kolme kertaa ja mitattujen tulosten keskiarvo on Erichsenin luku IE. Erichsenin luku ilmoitetaan millimetreinä./27, s. 4,8/

2.3. Rajavetosuhde

Yksi tärkeimmistä ohutlevyn syvävedettävyyttä kuvaavista arvoista on rajavetosuhde (LDR). Rajavetosuhde on vakio, joka riippuu materiaalista ja sen valmistusprosessista. Sen avulla määritellään, mikä on suurin mahdollinen aihion ulkohalkaisija vedettävälle syvävetotuotteelle. Rajavetosuhteen arvo on siis suurimman mahdollisen aihion halkaisijan suhde kupin halkaisijaan, jolloin syvävedon tuloksena on ehjä kuppi (kuva 15 ja kaava 6). Maksimiarvo rajavetosuhteelle saadaan vertaamalla painimen halkaisijaa alkuperäisen aihion halkaisijaan (kaava 7), tätä menetelmää käytetäänkin yleensä rajavetosuhdetta määrittäessä. Maksimirajavetosuhteen arvoa voidaan käyttää apuna esimerkiksi tarvittavan syvävetoaihion kokoa määriteltäessä./10, s. 220/,14/



Kuva 15. Rajavetosuhde (LDR) /14/

$$LDR = \frac{D}{d} \quad (6)$$

missä LDR on rajavetosuhde
 D on aihion halkaisija

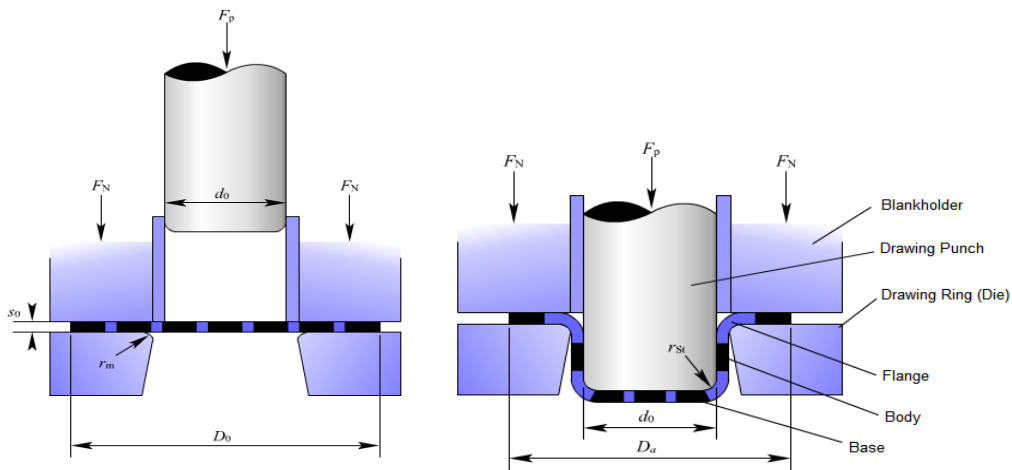
d on kupin halkaisija /14/

$$LDR_{\max} = \frac{D_0}{d_0} \quad (7)$$

missä LDR_{\max} on rajavetosuhde maksimi

D_0 on aihion halkaisija

d_0 on painimen halkaisija /5/



Kuva 16. Swiftin kuppikokeen periaate /5/

Rajavetosuhdetta testataan Swiftin kuppikokeella, jonka periaate on esitetty kuvassa 16. Tietyn halkaisijan omaavalla tasapaisella painimella (d_0) painetaan aihiota (D_0), joka on pidinrenkaiden välissä puristettuna sopivalla voimalla. Aihion halkaisijaa kasvatetaan niin kauan, että muovattava kuppi murtuu. Käytettäessä halkaisijaltaan 50 mm:n paininta valitaan testattavat aihiot esimerkiksi väliltä 90 - 120 mm. Rajavetosuhde lasketaan viimeisen ehjän kupin koeaihion halkaisijan mukaan kaavaa 6 tai 7 käyttäen. Swiftin koetta tehtäessä tulee valita testissä käytettävä vetorengas (drawing die) oikealla sisähalkaisijalla, jolloin painimen ja renkaan välyys on riittävän suuri esim. 1,4 kertaa vedettävän ohutlevyn vahvuus. Swiftin kokeella saatava rajavetosuhde on yleensä hieman suurempi kuin mikä todellisessa käytännön prosessissa on mahdollista saavuttaa./17/

Rajavetosuhdetta testattaessa on tärkeää käyttää sopivaa aihion pidinvoimaa, jotta päästäisiin parhaimpaan tulokseen ilman rypyttymistä ja murtumia. Pidinvoiman optimoimiseksi Swiftin kokeessa erikokoisille, -paksuisille ja -lujuisille aihioille on kehitetty laskentakaava, jonka avulla voidaan arvioida pidinvoiman tarvetta (kaava 8). Pidinvoiman arvioimiseksi on olemassa myös helpompi laskukaava, jossa ei oteta huomioon materiaalin paksuutta (kaava 9) /3/, /26, s. 171/

$$F_b = 10^{-3} c \left[(DR * 1)^3 + \frac{0,005 * d_0}{t_0} \right] S_u \quad (8)$$

missä F_b on aihion pidin voima
 c on kokeellinen etäisyyskerroin, 2-3
 DR on aihion halkaisijan suhde painimen halkaisijaan, D/d
 d_0 on aihion halkaisija
 t_0 on alkuperäinen aihion paksuus
 S_u on vetomurtolujuus /3/

$$F_b = \frac{\pi}{4} * (D^2 - d^2) * p \quad (9)$$

missä F_b on aihion pidin voima
 D on aihion halkaisija
 d on painimen halkaisija
 p on vetomurtolujuuden avulla laskettu pidin paine, joka teräkselle on 2,5 N/mm² /26, s.171/

Syvävedolla muovattuihin kupprien helmoihin muodostuu usein harjanteita, joita kutsutaan korviksi (kuva 15). Korvia voi muodostua kaksi, neljä tai kuusi riippuen materiaalin anisotrooppisuudesta. Korvien korkeus ja sijainti valssaussuuntaan nähden (0°, 45° tai 90°) liittyy suoraan materiaalin Δr -arvoon. Mikäli Δr -arvo on suurempi kuin nolla muodostuvat korvat 0° ja 90°:n kohdalle ja mikäli Δr -arvo on pienempi kuin nolla syntyvät korvat 45°:n kohdalle. /10, s. 228-229/

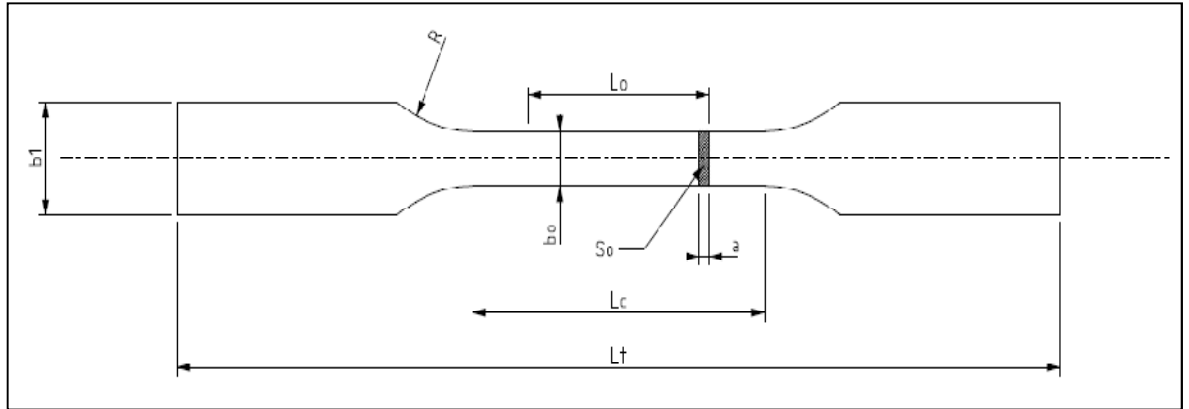
2.4. Vetokokeen avulla määriteltävät ominaisuudet

Vetokokeen avulla saadaan yhteys voiman ja venymän välille, joten sillä saadaan selville tietoa aineen lujuudesta ja sen kyvystä sietää plastista muodonmuutosta. Kummallakin näistä on merkitystä materiaalin muokkauksen kannalta. Materiaalin lujuus määrää muovaukseen tarvittavan voiman ja sitkeysominaisuudet kertovat, soveltuuko materiaali ylipäättänsä muovaukseen./17/

Vetokokeessa koesauvaa vedetään yleensä katkeamiseen asti siten, että siitä voidaan määrittää haluttuja mekaanisia arvoja. Standardissa SFS-EN ISO 6892-1 (korvaa SFS-EN 10002-1:en) on kerrottu mekaanisten ominaisuuksien määrittelytavat huoneenlämpötilassa alueella 10 - 35 °C suoritettulle vetokokeelle. Valvotuissa koeolosuhteissa vetokokeet tehdään +23 °C ± 5 °C lämpötilassa. Standardissa on esitetty myös suositukset tietokoneohjautun vetokokeen suorittamiseen. Nykyaikaisilla vetokoneilla saadaan ekstensiometriä ja tietokoneohjelman avulla määritettyä koesauvasta lähes kaikki tarvittavat mekaaniset ominaisuudet. Tällaisia ohjelmasta suoraan saatavia ominaisuuksia ovat esimerkiksi plastiseen pitenemään perustuva venymisraja eli myötöraja $R_{p0,2}$, murtolujuus R_m , plastinen tasa-venymä suurimmalla voimalla A_g , murtovenymä A ja muokkauslujittumiseksponentti n . Apuna mekaanisten ominaisuuksien mittauksissa ja tarkentamisessa voidaan käyttää esim. GOM:n optista mittausanalysointia.

2.4.1. Ohutlevyjen testauksessa käytettävät vetokoesauvat

Vetokokeessa testattavan koesauvan mitat ja muodot riippuvat testattavan materiaalin muodoista ja mitoista. Metallilevyjä testattaessa voidaan käyttää koesauvana työstettyä tai työstämätöntä koesauvaa. Työstettyihin koesauvoihin työstetään kavennus eli koepituus, jonka tulee liittyä kiinnityspäihin riittävän suurella pyöristyksellä. Suositeltavaa on käyttää työstettyä ns. suhdesauvaa (kuva 17), jonka alkumittapituus L_0 ja suoran osan poikkipinta-ala S_0 täyttävät ehdon $L_0 = k\sqrt{S_0}$, missä k on verrannollisuuskerroin vakio 5,65 tai ohuimmille levyille 11,3. Käytettäessä ei-suhdesauvaa, on kuitenkin syytä käyttää mitoituksessa standardin määrittelemiä ohjeita./28/



Kuva 17. Työstetty vetokoesauva

Testattavan ohutlevyn vahvuudesta johtuen täytyy pyöristyssäteen R (kuva 17) olla koepituuden ja kiinnityspäiden liitäntäkohdassa seuraavanlainen:

- Ohuet 0,1 – 3 mm vahvuiset koesauvat $R \geq 20\text{mm}$.
- Vähintään 3 mm vahvuiset koesauvat $R \geq 12 \text{ mm./28/}$

Koepituuden L_c tulee olla vähintään kolmea millimetriä vahvemmillä koesauvoilla kaavan 10 mukainen ja ohuemmillä koesauvoilla vähintään kaavan 11 mukainen.

$$L_c = L_0 + 1,5\sqrt{S_0} \quad (10)$$

$$L_c = L_0 + \frac{b_0}{2} \quad (11)$$

missä L_c on koepituus

L_0 on alkumittapituus

S_0 on koesauvan suoran osan poikkipinta-ala ennen koetta/28/

Standardissa SFS-EN ISO 6892-1 on lisäksi määritelty koesauvojen valmistuksessa huomioon otettavat seikat, suositellut mitat, testausolosuhteet, sekä koesauvojen mittaamiseen ja kiinnittämiseen liittyvät seikat ennen vetokoetta oikeiden tulosten saamiseksi.

2.4.2. Ohutlevyn anisotropia ja muokkauslujittuminen

Levyn sopivuutta eri muovausprosesseihin voidaan arvioida ensisijaisesti sille määriteltävien r - ja n -arvojen avulla. Muokkauslujittumiseksponentin arvo n Hollomonin yhtälössä (kaava 12) kertoo, kuinka paljon materiaali voi venyä ennen kuroutumista eli sitä käytetäänkin venytysmuovattavuuden mittana. n -arvon ollessa yksi on materiaali elastista, hyvin venyvää ja se muokkauslujittuu voimakkaasti, joten se on hyvää venytysmuovauksessa. Materiaalin venytysmuovausominaisuudet ovatkin suoraan verrannollisia sen muokkauslujittumiskykyyn. Toisin sanoen mitä suurempi on n -eksponentin arvo, sitä ohuemmaksi voidaan levy venyttää. Muokkauslujittumiseksponentti, kuten myös K :n arvo, saadaan selville vetokokeesta tietokoneohjelman antamista tuloksista, mutta ne voidaan määrittää myös jännitys-venymäpiirroksen avulla. /17/

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (12)$$

missä σ on todellinen rasitus
 K on lujuuskerroin
 ε on todellinen venymä
 n on muokkauslujittumiseksponentti /12, s. 2./

Isotrooppisella materiaalilla plastinen venymäsuhde r on 1, jolloin sen ominaisuudet ovat joka suuntaan samat. Levyn muovaamisen kannalta olisi kuitenkin pyrittävä valmistamaan sellaista anistrooppista levyä, jonka r -arvo on noin 1,4. Tämä mahdollistaa levyn muovaamisen niin, että levy venyy, mutta ei tyssäänny paksuussuunnassa. Parhaimman syvävedettävyyden takaa mahdollisimman suuri keskimääräinen r -arvo. Plastinen venymäsuhde r määritellään vetokokeessa tapahtuvan poikittais- ja paksuussuuntaisen venymän suhteeksi (kaava 13). Mikäli aineen tilavuus ei muutu vetokokeen aikana, merkitsee se sitä, että poikkileikkauksen eri suuntiin tapahtuvien venymien summa on nolla. Tämän avulla saadaan johdettua r -arvon määrittämiseen kaava, jossa käytetään leveys- ja pituussuuntaisia venymiä (kaava 14). /17/

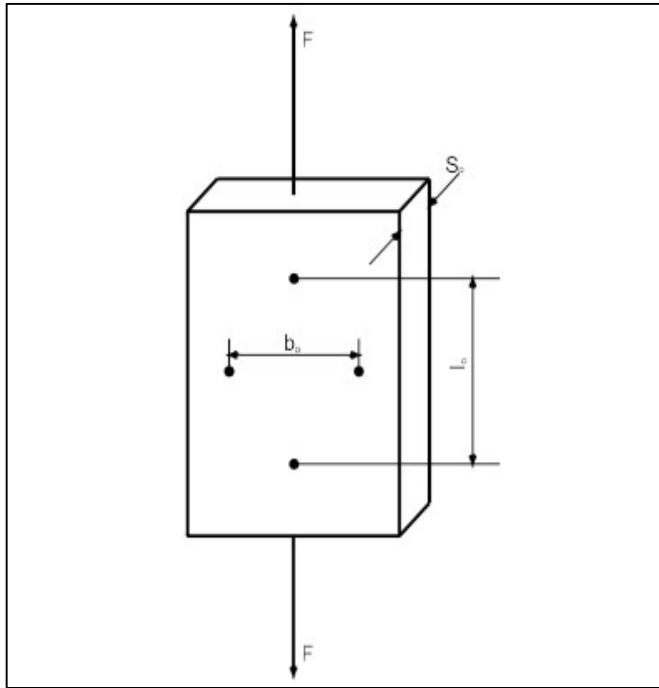
$$r = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_a} \quad (13)$$

missä r on plastinen venymäsuhde, normaalianisotropia
 ε_b on koesauvan leveyssuuntainen todellinen plastinen venymä ja
 ε_a on koesauvan paksuussuuntainen todellinen plastinen venymä. /11/

$$r = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{l_0 b_0}{lb}} \quad (14)$$

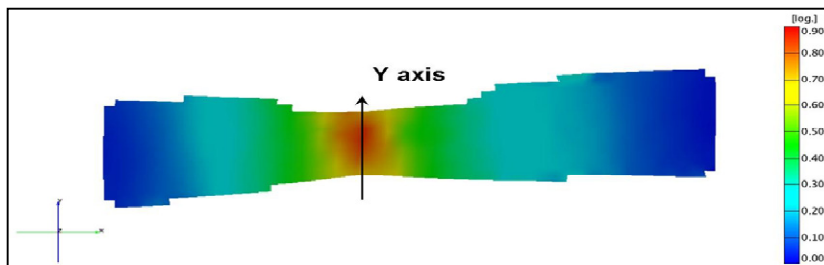
missä r on plastinen venymäsuhde,
 b on koesauvan mittaleveys testin jälkeen
 b_0 on koesauvan alkuperäinen mittaleveys,
 l_0 on koesauvan alkuperäinen mittapituus ja
 l on koesauvan mittaleveys testin jälkeen. /11/

Yksinkertaisimmillaan vetokoe r -arvon määrittämiseksi tehdään merkitsemällä vetokoesauvan pintaan tietyllä etäisyydellä olevat venymämittausmerkit (kuva 18). Näytettä venytetään esimerkiksi 15 %, jonka jälkeen mittausmerkkien etäisyydet mitataan. Käyttämällä vetokokeessa pitkittäisiä ja poikittaisia ekstensiometrejä saadaan r -arvot suoraan vetokoneen tietokoneohjelmasta, jolloin ei manuaalisia mittauksia välttämättä tarvita.



Kuva 18. Mittauspisteet sauvan pinnalla

Plastisen venymäsuhteen määrittämisessä voidaan käyttää apuna optista mittauslaitteistoa, kuten ARAMIS:ta. Mittauslaitteiston käyttö helpottaa ja tarkentaa huomattavasti ϵ -arvon määrittystä, koska manuaalisia mittauksia ei tarvitse tehdä ja mahdollisen kuroutumisen paikkaa koesauvan alueella ei tarvitse tietää etukäteen. ARAMIS-mittauslaitteiston avulla voidaan kohdistaa mittausalue juuri oikealle venymäalueelle, toisin kuin käytettäessä paikallaan olevia ekstensiometrejä (kuva 19). /30/



Kuva 19. Todellinen venymäalue Aramiksella kuvattuna/30/

Normaalin plastisen venymäsuhteen laskemisessa käytetään kaavaa 13, josta johdetaan edelleen tilaavuuden muuttumattomuutta hyväksi käyttäen kaava 15. Koska tiedetään, että $\varepsilon_a = -(\varepsilon_l + \varepsilon_b)$, voidaan venymien mittaaminen Aramiksen avulla suorittaa kohtisuoraan näytteen pintaan nähden, eikä paksuuden muutosta tarvitse mitata samanaikaisesti. /30/

$$r = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_a} = -\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_l + \varepsilon_b} \quad (15)$$

missä ε_b on koesauvan leveysuuntainen todellinen plastinen venymä,
 ε_a on koesauvan paksuussuuntainen todellinen plastinen venymä ja
 ε_l on koesauvan pituussuuntainen todellinen plastinen venymä. /30/

Valssattu teräslevy on yleensä anisotrooppista tason suunnassa, siksi sen syvävedettävyyttä kuvaavaa keskimääräistä r-arvoa määritettäessä käytetään valssaussuuntaan nähden pitkitäin, poikittain ja 45°:n kulmassa leikattuja vetokoesauvoja. Näistä erisuuntaisista vetokoesauvoista määritellään jokaisesta erikseen plastisenvenymäsuhteen arvo r, joka merkitään alaindeksillä asteiden mukaan valssaussuuntaan nähden. Alaindeksiin merkitään standardin ISO 10113:n mukaan myös plastisen venymän prosentuaalinen kohta, jolta mittaus on suoritettu, esim. $r_{45/20}$. Plastisen venymäsuhteen keskiarvo lasketaan saatujen r-arvojen avulla kaavan 16 mukaisesti. Luotettavan plastisen venymäsuhteen keskiarvon saavuttamiseksi on käytettävä jokaisen erisuuntaisen r-arvon mittaamisessa venymää samalta alueelta. /10/, /11/

$$\bar{r} = \frac{r_{0/20} + 2r_{45/20} + r_{90/20}}{4} \quad (16)$$

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

Levyn anisotrooppisuus tason suunnassa saadaan käyttämällä samoja mitattuja r -arvoja, kuin plastisen venymäsuhteen keskiarvon laskemisessakin. Δr -arvon ollessa nolla sen syvävedettävyysominaisuudet ovat parhaat mahdolliset, koska levy on tällöin isotrooppista tason suunnassa. Tasoanisotropian laskennassa käytetään kaavaa 17. /10, s.228./

$$\Delta r = \frac{r_{0/20} + r_{90/20} - 2r_{45/20}}{2} \quad (17)$$

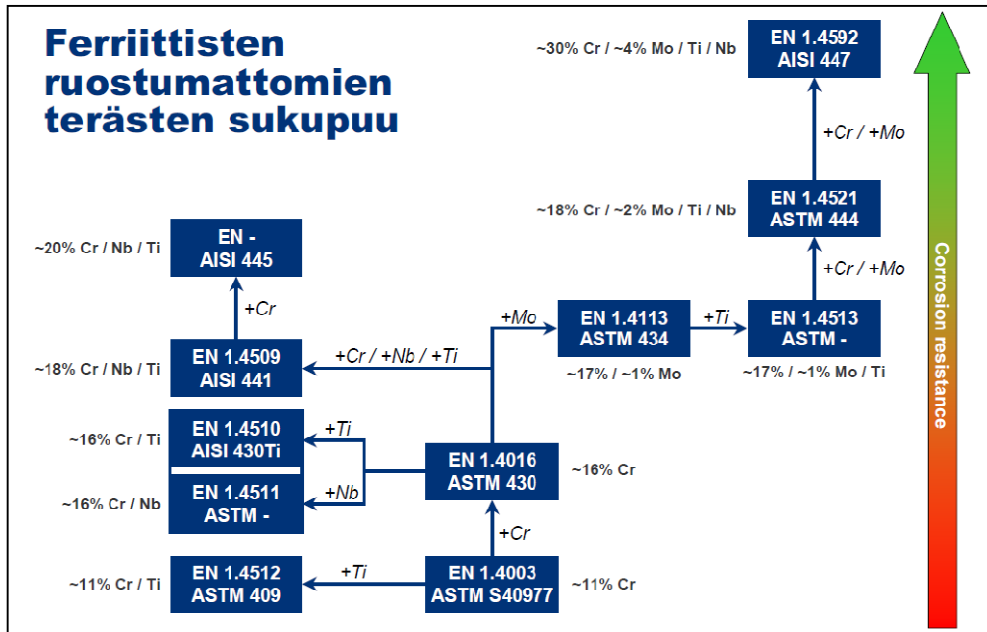
missä, $r_{0/20}$ on plastinen venymäsuhte valssaussuunnan suuntaisesti työstetystä koesauvasta,
 $r_{45/20}$ on plastinen venymäsuhte 45 asteen kulmassa valssaussuuntaan nähden työstetystä koesauvasta,
 $r_{90/20}$ on plastinen venymäsuhte kohtisuoraan valssaussuuntaan nähden työstetystä koesauvasta/11/

3. FERRIITTISET RUOSTUMATTOMAT TERÄKSET

Ruostumattomiksi teräksiksi kutsutaan teräslaatuja, joiden kromipitoisuus on vähintään 10,5 (paino) % ja hiilipitoisuus enintään 1,2 %. Suuren kromipitoisuuden ansiosta teräkselle muodostuu huomattava vastustuskyky korroosiota vastaan, teräksen pintaan muodostuu itse korjautuva oksidikerros eli passiivikalvo. Ruostumattomien terästen kromipitoisuus voi vaihdella 10,5 %:sta 29 %:iin laadusta riippuen. Yleisimmin käytetyissä ruostumattomissa teräslaaduissa on kromia noin 18 %. Ruostumattomat teräkset voidaan jakaa neljään pääryhmään niihin seostuksen avulla saadun kiderakenteen perusteella. Kiderakenteen perusteella jaotellut ruostumattomien terästen pääryhmät ovat:

- austeniittiset ruostumattomat teräkset, Fe-Cr-Ni, C < 0,1 %
- ferriittiset ruostumattomat teräkset Fe-Cr, C < 0,1 %
- austeniittis-ferriittiset eli duplex-teräkset Fe-Cr-Ni
- martensiittiset ruostumattomat teräkset Fe-Cr, C > 0,1 % /20, s. 7./

Näistä edellä mainituista ruostumattomien terästen ryhmistä austeniittiset laadut ovat olleet käytetyimpiä, mutta niihin seostetun nikkelin vuoksi ovat ne hinnaltaan kalliita. Korvaamalla austeniittinen ruostumaton teräs ferriittisellä laadulla, joka ei sisällä nikkeliä, voidaan saada aikaan suuriakin säästöjä etenkin silloin, kun nikkelin hinta on korkealla. Ferriittiset ruostumattomat teräkset jakaantuvat kromipitoisuuden ja lisättyjen seosaineiden mukaan useisiin eri laatuihin (kuva 20), jotka omaavat erilaisia ominaisuuksia. Ferriittisiin ruostumattomiin teräslaatuihin seostetaan kromin lisäksi esim. molybdeenia, titaania ja niobia. Näillä seostusaineilla pyritään korvaamaan austeniittisissä laaduissa seosaineena käytetty arvokas nikkeli menettämättä materiaalin hyviä ominaisuuksia. Austeniittisiin laatuihin verrattuna ferriittisillä on korkeampi myötölujuus, alhaisempi murtovenymä ja vähäisempi muokkauslujittumiskyky. Yleisimpiä käytettyjä ferriittisiä ruostumattomia teräslaatuja ovat 1.4016 ja 1.4510 sekä alhaisemman kromipitoisuuden omaava 1.4003./1/,/2/,/20, s. 10-15/



Kuva 20. Ferriittisten ruostumattomien terästen sukupuu/21/

Fysikaalisilta ominaisuuksiltaan ferriittinen ruostumaton teräs on verrattavissa tavanomaisimpiin hiiliteräksiin, mutta korroosion kestävyydeltään se on huomattavasti parempaa. Korroosio-ominaisuudet riippuvat kromipitoisuudesta, joten korkean kromipitoisuuden omaavat laadut ovat kestävämpiä. Ferriittisten ruostumattomien terästen käyttölämpötila-alue on melko rajallinen, siksi varsinkin matalissa lämpötiloissa käytettävien hitsattujen rakenteiden iskutiheys on syytä varmistaa, koska ne ovat alttiita haurasmurtumille. /1/,/14/,/20, s. 10-15/

Taulukko 1. Pääteräsryhmien muovausominaisuudet/14/,/21/

	Hiiliteräkset	Ferriittiset RST	Austenittiset RST
Mikrorakenne	TKK	TKK	PKK
Muokkauslujittuminen	Matala	Matala	Korkea
Syväveto	Erinomainen	Hyvä	Hyvä
Venyysmuovaus	Hyvä	Hyvä	Erinomainen
Takaisinjousto	Matala	Matala	Korkea
Ridging/roping	Ei esiinny	Mahdollinen	Ei esiinny
Hauraus alh. lämpötilassa	(Mahdollinen)	Mahdollinen	Ei esiinny

Ferriittisten ruostumattomien terästen muovattavuusominaisuudet ovat kohtuullisen hyvät, varsinkin titaanistabiloidun 17 % kromia sisältävän laadun. Taulukosta 1 voidaan nähdä joitakin ferriittisen ruostumattomien terästen muovattavuusominaisuuksia verrattuna austeniittiseen ruostumattomiin teräksiin. Syvävedossa ferriittiset laadut ovat ominaisuuksiltaan austeniittisten tasolla, mutta venytysmuovauksessa eivät ominaisuudet yllä aivan niin hyviin tuloksiin johtuen niiden alhaisemmasta muokkauslujittumiskyvystä. Ferriittisillä ruostumattomilla teräslaaduilla ilmenee muovauksessa helposti myös ns. ridging- tai roping-ilmiötä, kuten kuvassa 21 vasemmalla. Roping-ilmiössä syvävedetyn tuotteen pintaan muodostuu valssaussuunnan mukaisia viivoja tai harjanteita, jotka vaikeuttavat valmiin tuotteen pinnan viimeistelyä./14/



Kuva 21. Roping-pinta verrattuna onnistuneeseen pintaan /14/

Näiden roping-ongelmien poistamiseksi onkin kehitetty esimerkiksi titaanistabiloituja laatuja, kuten ferriittinen ruostumaton teräs EN 1.4512, jolla on stabiloinnin ansiosta erittäin hyvät ominaisuudet syvävetosovelluksissa. Alhaisemman muokkauslujittumisen vuoksi ferriittisillä ruostumattomilla teräksillä esiintyy myös rypyttymistä tai poimuttumista, joka ilmenee muovatun tuotteen helmoissa, tätä voidaan osittain hallita oikean pidinvoiman valinnalla sekä vetorenkkaan pyöristyksen muodolla. /14/

3.1. Ferriittinen ruostumaton teräs EN 1.4512

Ferriittisiin ruostumattomiin teräksiin kuuluva EN 1.4512 (ASTM 409) on titaanistabiloitu 11,5 prosenttia kromia sisältävä teräslatu. Se on tyypillinen taivutuksessa ja muovauksessa käytetty materiaali. Autoteollisuudessa sitä käytetään autojen pakokaasujärjestelmissä, kuten katalysaattoreissa, äänenvaimentimissa, pakoputkissa ja niiden kannatinosissa. Ra-

kennusten rakenteissa EN 1.4512 terästä käytetään kohteissa, joissa on vaihteleva lämpötila. Hitsattaessa EN 1.4512 laatua voidaan käyttää samoja menetelmiä ja lisäaineita kuin austeniittisen 300-sarjan hitsauksessa. Titaanistabiloinnin ansiosta materiaalilla on hyvä vastustuskyky muutosvyöhykkeen (HAZ) herkistymistä vastaan. Lämmöntuonti hitsauksessa on kuitenkin pidettävä mahdollisimman pienenä./23/

3.2. Teräksen EN 1.4512 ominaisuudet

Materiaalin kemiallisella koostumuksella on tuotannon prosessiparametrien lisäksi suuri merkitys sen ominaisuuksiin. Eri ainesosat ja niiden seostussuhteet vaikuttavat niin mekaanisiin kuin muovattavuusominaisuuksiinkin. Taulukossa 2 on esitetty laadun EN 1.4512 tärkeimmät ainesosat. Esimerkiksi titaani- ja niobistabiloinnilla saadaan vähennettyä esimerkiksi ferriittisissä laaduissa syvävedossa usein ilmenevää roping-ilmiötä./4/

Taulukko 2. Tyypillinen EN 1.4512 teräksen kemiallinen koostumus/23/

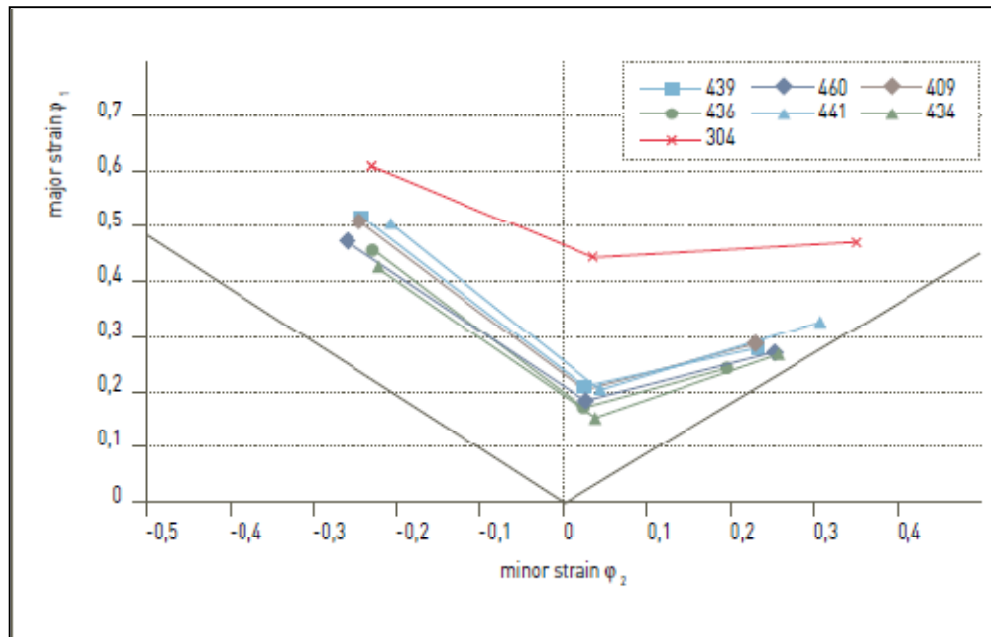
	C	Cr	Ni	Ti	Fe
EN 1.4512	0,01	11,5	0,1	0,2	Bal.

Laadun 1.4512 lujuusominaisuudet (taulukko 3), kuten myötöraja ($R_{p0,2}$) ja alhainen muokkauslujittuminen ovat verrattavissa austeniittiseen 1.4301 laatuun. Stabiloinnin johdosta 1.4512 laadun r-arvo on korkeampi verrattuna esimerkiksi stabiloimattomaan 1.4016 laatuun. Näiden ominaisuuksien johdosta se on erittäin hyvä materiaali syvävetoon ja muihin vastaaviin muovattavuussovelluksiin./23/

Taulukko 3. Kylmävalssatun materiaalin mekaaniset ominaisuudet/1/,/23/

	$R_{p0,2}$	R_m	A	n	r	Δr
	(N/mm ²)	(N/mm ²)	%			
EN 1.4512	min. 210/220	380...560	min. 25	0,16-0,23	1,5	0,3

Ferriittinen ruostumaton teräs EN 1.4512 soveltuu erittäin hyvin kylmämuovaukseen. Taivutussovelluksissa taivutussäteenä voidaan käyttää kohtalaisen pientä taivutussädettä. Muovattavuusominaisuudet ovat hieman heikkomat kuin austeniittisella EN 1.4301 laadulla (304). Sen sijaan muihin ferriittisiin laatuihin nähden tämän rajamuovattavuus on parhaimmasta päästä (kuva 22)./14/,/29/



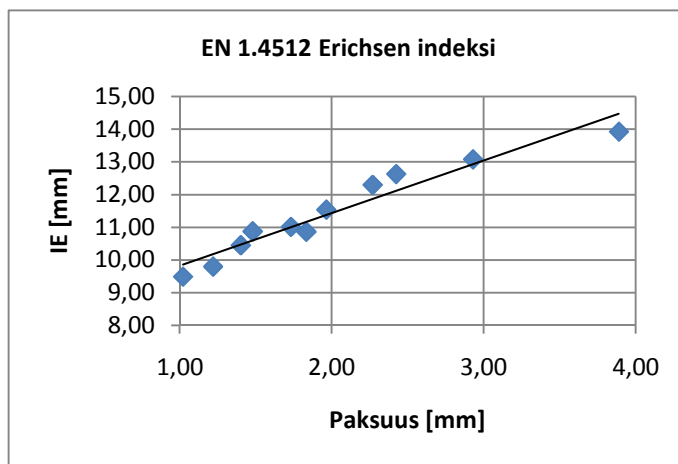
Kuva 22. Ferriittisten ruostumattomien terästen rajamuovattavuus verrattuna austeniittiseen 304 laatuun/14/

EN 1.4512:n hyvistä venytysmuovausominaisuuksista kertoo myös sen Erichsenin luku (taulukko 4), joka on verrattuna laadun EN 1.4016 IE arvoon hieman korkeampi, joten sen venytysmuovausominaisuudet ovat paremmat. Ohutlevyn paksuus vaikuttaa IE-arvoon lineaarisesti, kuten voidaan havaita kuvasta 23.

Taulukko 4. Terästen EN 1.4512 ja EN 1.4016 Erichsenin lukuja (Thyssen Krupp) /29/

Paksuus [mm]	IE [mm] EN 1.4512	IE [mm] EN 1.4016
0,5	9	8,2
1	10	9,2
1,5	11	10,2
2	12	11

Outokummun testaamat Erichsenin indeksin tulokset (kuva 23) laadulle EN 1.4512 on kerätty ensimmäisistä tuotantomittakaavan koesulatuksista. Tuon ajankohdan jälkeen on tehty kyseisen teräslajin osalta kehitystyötä tuotantoprosessiin liittyen. Niillä on aina jossain määrin vaikutusta myös muovattavuusominaisuuksiin. Tavoitteena on ollut tietenkin edelleen parantaa jo hyväksi todettua tasoa./19/



Kuva 23. Erichsen indeksi EN 1.4512 (Outokumpu Tornio)/19/

Kuten jo edellä mainittiin, on laadulla EN 1.4512 suurempi r-arvo kuin EN 1.4016 laadulla. Korkeampi r-arvo kertoo paremmasta syvävedettävyydestä, kuten myös korkeampi rajavetosuhde, joka laadulla EN 1.4016 (430) on noin 2,15 ja laadulla EN 1.4512 (409) jopa 2,2 (kuva 24). /2/



Kuva 24. Ferriittisten ruostumattomien terästen rajavetosuhdearvoja verrattuna austeniittiseen 304 laatuun/14/.

4. KOKEELLINEN TUTKIMUS

Edellä esiteltyyn teoriaan pohjautuen suoritettiin vastaavia muovattavuuteen liittyviä kokeita Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun rikkovan aineenkoetuksen laboratoriossa. Suoritetuilla kokeilla oli tarkoitus selvittää kokeellisesti, kuinka ferriittinen ruostumaton teräs EN 1.4512 käyttäytyy venytysmuovauksessa ja syvävedossa. Saatujen tulosten avulla voidaan helpottaa kyseisen materiaalin valintaa eri muovausprosesseihin sekä helpottaa käytettävien koemenettelyjen soveltamista tulevaisuudessa vastaaviin testeihin.

4.1. Testauslaitteisto ja suoritettut testit

Testaukset suoritettiin Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun rikkovan aineenkoetuksen laboratoriossa seuraavilla laitteistoilla:

- Erichsen 145–60 ohutlevyjen muovattavuustutkimuslaite, jolla testattiin rajaveistosuhde, rajamuovattavuus, Erichsenin luku.
- Zwick Allround-floor 250 kN vetokone, jolla suoritettiin vetokoe materiaalin mekaanisten ominaisuuksien sekä n- ja r-arvojen määrittämiseksi.
- GOM-venymäanalysaattori, jota käytettiin online-mittauksiin rajamuovattavuuden määrittämisessä sekä vetokokeen aikaisissa mittauksissa r-arvojen määrittämiseksi.

4.2. Testatut materiaalit

Edellä mainitut kokeet suoritettiin ferriittiselle ruostumattomalle teräkselle EN 1.4512 levyvahvuuksille 1,0 ja 1,5 mm, sekä lisäksi tehtiin rajamuovattavuuden määrittäminen 0,5 mm vahvalle EN 1.4016 kiiltohehkutetulle ferriittiselle ruostumattomalle teräkselle ja 0,6 mm vahvalle EN 1.0306 syvävetoteräkselle. Testattavat näytteet valmistettiin Torniossa Jaloterässtudiolla toimitettujen piirustusten ja ohjeiden mukaan (liitteet 2/1,2/2,3/1 ja 3/2). Naka-

jima–testin näytteet leikattiin levytyökeskuksella lukuun ottamatta EN 1.4016 laatua, joka työstettiin laserleikkauksella. Vetokoesauvat leikattiin ensin levytyökeskuksella ja sen jälkeen koneistettiin lopullisiin mittoihin.

4.2.1. Rajamuovattavuuden kokeellinen määrittäminen

Testaus suoritettiin standardin ISO 12004-2 mukaan taulukon 5 mukaisille näytteille. Testattuja näytegeometrioita oli viisi ja kutakin geometriaa (liite 2/1) viisi samanlaista jokaisesta levyvahvuudesta. Näytteet leikattiin levystä viiden peräkkäisen näytteen sarjoina levyn leveydestä (liite 2/2).

Taulukko 5. Nakajima–testin näytteet

Menetelmä		Materiaali		Näyteaiho (Liite)	
Testi	Laite	Laatu	paksuus [mm]	Geometria	Määrä
FLC	Erichsen 145-60	EN 1.4512	1	A	5
Nakajima	Gom/Aramis			B	5
				C	5
				D	5
				E	5
		EN 1.4512	1,5	A	5
				B	5
				C	5
				D	5
				E	5
		EN 1.4016	0,5	A	5
				B	5
				C	5
				D	5
				E	5
		EN 1.0306	0,6	A	5
		(DX 54)		B	5
				C	5
				D	5
				E	5

Näyteaihiot puhdistettiin etanolilla ja maalattiin epäsäännöllisellä spray-maalauksukuviolla ennen testauksia. Testaukset suoritettiin Erichsen 145-60 -laitteella

yhteistyössä GOM:n kamerajärjestelmän kanssa liitteenä olevan ohjeen mukaisesti (liite 1). Näytteet testattiin yksi geometria kerrallaan, käyttäen jokaisen näytteen testauksessa näytteen ja painimen välissä kahta ohutta teflonkalvoa ja yhtä 3 mm:n vahvuista pehmeää PVC-levyä sekä niiden jokaisella pinnalla rasvaa. Lisäksi painimen pää ja näytteen alapinta voideltiin ohuesti rasvalla.

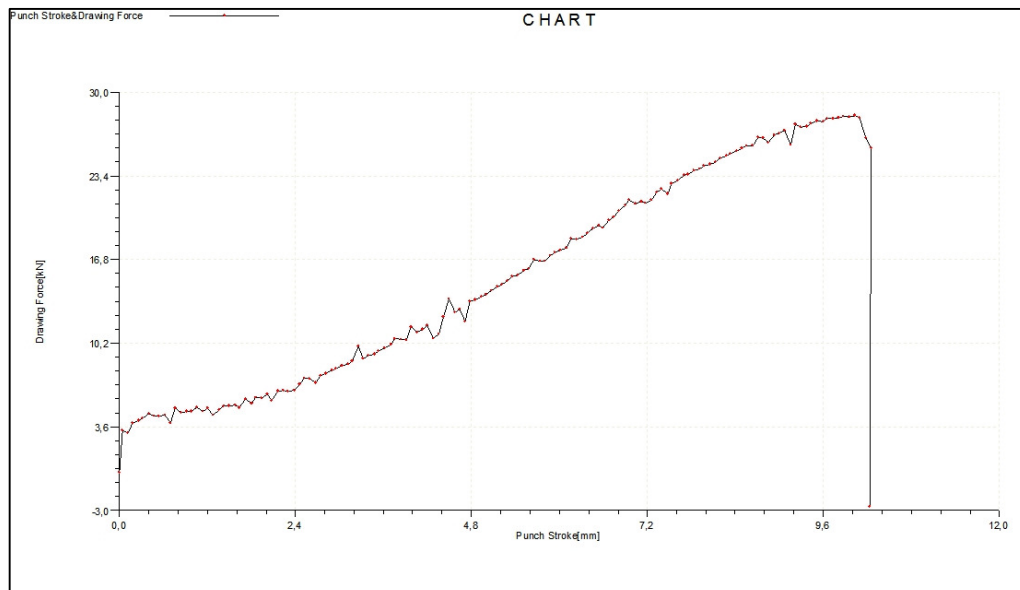
4.2.2. Erichsenin luvun kokeellinen määrittäminen

Erichsenin luvun määrittämisessä materiaalille EN 1.4512 käytettiin standardissa SFS-EN ISO 20482 annettuja ohjeita. IE-luku määriteltiin taulukossa 6 esitetyille levyvahvuuksille, testausmenetelmänä oli Erichsen no. 27, jolla testattavat sallitut levyvahvuudet olivat 0,1 mm:stä 2,0 mm:iin. Näyteaihiaina käytettiin 100 mm leveää valssaussuuntaan leikattua suikaletta, johon suoritettiin kolme onnistunutta koetta 100 mm välein (kuva 41, liite 4/4).

Taulukko 6. Erichsenin kupinvenytystestin näytteet ja parametrit

Menetelmä		Materiaali		Näyteaiho		Koe	
Testi	Laite	Laatu	Paksuus [mm]	Leveys [mm]	Näyteväli [mm]	SHF [kN]	v [mm/min]
IE no:27	Erichsen	EN 1.4512	1	100	100	10	15
		EN 1.4512	1,5	100	100	10	15

Näyteaihiot voideltiin ohuesti molemmin puolin ennen kokeita standardin suosittelemalla grafiittirasvalla kitkan pienentämiseksi. Näytteet koestettiin Erichsen 145-60 ohutlevyjen muovattavuustutkimuslaitteella käyttämällä taulukossa 6 olevia pidinvoima- ja nopeusparametreja. Testauksessa käytetyt pidin- ja vastinrenkaat sekä painin olivat testille Erichsen no. 27 annetun standardin ohjeen mukaiset.



Kuva 25. Painimenliike (vaaka-akselilla) ja muovausvoima (pystyakselilla) Erichsenin testistä

Painuman syvyyden arvot saatiin suoraan painimen liikkeen mukaan Erichsen-laitteeseen kuuluvasta MES-ohjelmistosta (kuva 25). Standardin mukaan tuli painuman syvyys mitata siinä pisteessä, jossa painuman laelle on syntynyt läpimurtuma, josta näkyy valo läpi. Erichsen-laitteessa oli käytettävä testauksen lopussa viivettä, joka aiheutti maksimivoiman pysymisen viiveen ajan ja näin ollen läpimurtuma saatiin aikaiseksi. Viiveen pituus saatiin selville muutamalla testi kokeella ja sopiva arvo tälle testatulle ferriittiselle ruostumattomalle teräkselle oli 0,5-0,7 s.

4.2.3. Rajavetosuhteen kokeellinen määrittäminen

Rajavetosuhdetestaukset suoritettiin ferriittiselle ruostumattomalle teräkselle EN 1.4512 Erichsen 145-60 ohutlevyjen muovattavuustutkimuslaitteella. Testaukset suoritettiin taulukon 7 mukaisille näytteille, joiden halkaisijoiden vaihteluväli oli yksi millimetri. Näyteaihioiden halkaisijoiden mittoja arvioitaessa käytettiin apuna kuvasta 24 saatua tietoa vastaavan laadun 409 LDR-arvosta, joka oli hieman alle 2,20. Rajavetosuhteen laskenta-kaavaa 7 käyttämällä saatiin selville, että halkaisijaltaan 50 mm:n painimelle saadaan aihi-
on halkaisijaksi 110 mm käytettäessä maksimi rajavetosuhteen arvona 2,20. Olemassa ole-

van tiedon perusteella tiedettiin, että rajavetosuhde pienenee paksumpaan levyvahvuuteen siirryttäessä, joten voitiin arvioida aihoiden koot alkaen ohuimmasta materiaalista käyttäen hyväksi edellä mainittua aihion halkaisijaa.

Taulukko 7. Rajavetosuhdekokeissa käytetyt aihiot ja parametrit

Menetelmä		Materiaali		Näyteaihio		Koe		
Testi	Laite	Laatu	Paksuus [mm]	Ø [mm]	Määrä	Toistot	Rengas	SHF [kN]
Swift	Erichsen	EN 1.4512	1	110–119	30	3*Ø	52,24 (1)	16–28
50mm		EN 1.4512	1,5	109–114	18	3*Ø	54,80 (2)	16–24

Syvävetorenkaat valittiin kokeisiin materiaalin vahvuuden mukaan, mutta 1,5 mm:n vahvuisille levyille oli käytettävä paksummalle (2 mm) materiaalille tarkoitettua rengasta. Suuremman renkaan vaikutus testin tuloksiin oli lähinnä kupin ulkopinnan muodossa, joka oli hieman ulospäin pullistunut. Taulukossa 7 renkaan dimensiosarakkeessa oleva lukema on renkaan sisähalkaisijan mitta ja suluisissa on ilmoitettu kyseisen renkaan sallittu levyvahvuus.

Aihion pidinvoimaa arvioitaessa käytettiin apuna pidinvoiman laskentakaavaa 8, koska sillä saatava voima oli pienempi kuin kaavalla 9 saatava arvo. Pidinvoimien laskennassa käytettiin etäisyyskertoimen arvona kolmea ja vetomurtolujuuden arvona 470 N/mm^2 . Näiden laskettujen pidinvoimien arvojen avulla helpotettiin testauksen aikaisten parametrien valintaa testausohjelmassa. Ennen kokeiden suoritusta näyteaihiot puhdistettiin liasta ja metallipölystä sekä poistettiin mahdolliset jäysteet reunoista. Aihoiden toiselle pinnalle laitettiin ohut muovikalvo (PE-LD), jonka tarkoituksena oli rasvan lisäksi vähentää kitkaa ja estää aihion pinnasta irtoavan materiaalin takertuminen vetorenkkaan pintaan, mikä ferriittisellä ruostumattomalla teräksellä on osoittautunut ongelmaksi syvävedossa. Koetta varten näyteaihioiden molemmat pinnat voideltiin ohuesti rasvalla. Jokaista levyvahvuuden halkaisijaa kohti tehtiin kolme toistoa, jotta saatiin luotettavuutta tuloksiin.

4.2.4. Mekaanisten ominaisuuksien kokeellinen määrittäminen vetoko- keella

Vetokokeet suoritettiin Zwick Allround-floor 250 kN -vetokoneella ja venymien mittaukseen käytettiin ekstensiometrien lisäksi Aramis-mittausanalysointia venymien online-mittauksiin. Kokeet suoritettiin ferriittiselle ruostumattomalle teräkselle EN 1.4512, josta testattiin vahvuudet 1 ja 1,5 mm. Testatusta materiaalista valmistetut työstetyt vetokoesauvat olivat liitteen 3/1 piirustuksen mukaiset. Työstettyjen kavennettujen vetokoesauvojen päämitat on valittu standardin suosittelemien arvojen mukaan. Koepituus (L_c) vetokoesauvoissa oli 110 mm ja ekstensiometrien mittavälinä käytettiin 80 mm, jotta saatiin kameroille näkyvä mittausalue riittävän laajaksi.

Taulukko 8. Testatut vetokoesauvat

Vetokoe				
Materiaali		Valssaussuunta		
laatu	paksuus	0°	45°	90°
EN 1.4512	1	5	5	5
	1,5	5	5	5

Vetokoesauvoja oli viisi kutakin tyyppiä (taulukko 8) ja ne oli leikattu levyistä 0°, 45° ja 90°:een -suuntaisesti valssaussuuntaan nähden (liite 3/2). Vetokoesauvat maalattiin stokastisella spray-maalauskuviointilla ennen koetta ARAMIS-mittauksia varten. Vetotapahtumat kuvattiin Aramiksella (kuva 37, liite 4/2). Kuvatuista kuvista määritettiin r-arvot valitsemalla vertailuun alkutilanteen kuva ja 15 %:n venymän kohdalla otettu kuva. Vetotapahtuman loppupään kuvista selvitettiin muodostuvan kurouma-alueen esiintyminen, jotta voitiin piirtää pitkittäinen ja poikittainen referenssimittaviiva tämän alueen kohdalle (kuva 38, liite 4/3). ARAMIS-ohjelmasta saatiin suoraan selville mittaviivojen alku- ja loppupituudet (l_0 , b_0 , l ja b), joista laskettiin r-arvot kaavaa 14 käyttäen. Kesimääräinen r- ja Δr -arvo laskettiin lopuksi kaavoja 16 ja 17 käyttäen.

5. TULOKSET, TULOSTEN TARKASTELU JA ESIINTYNEET ONGELMAT

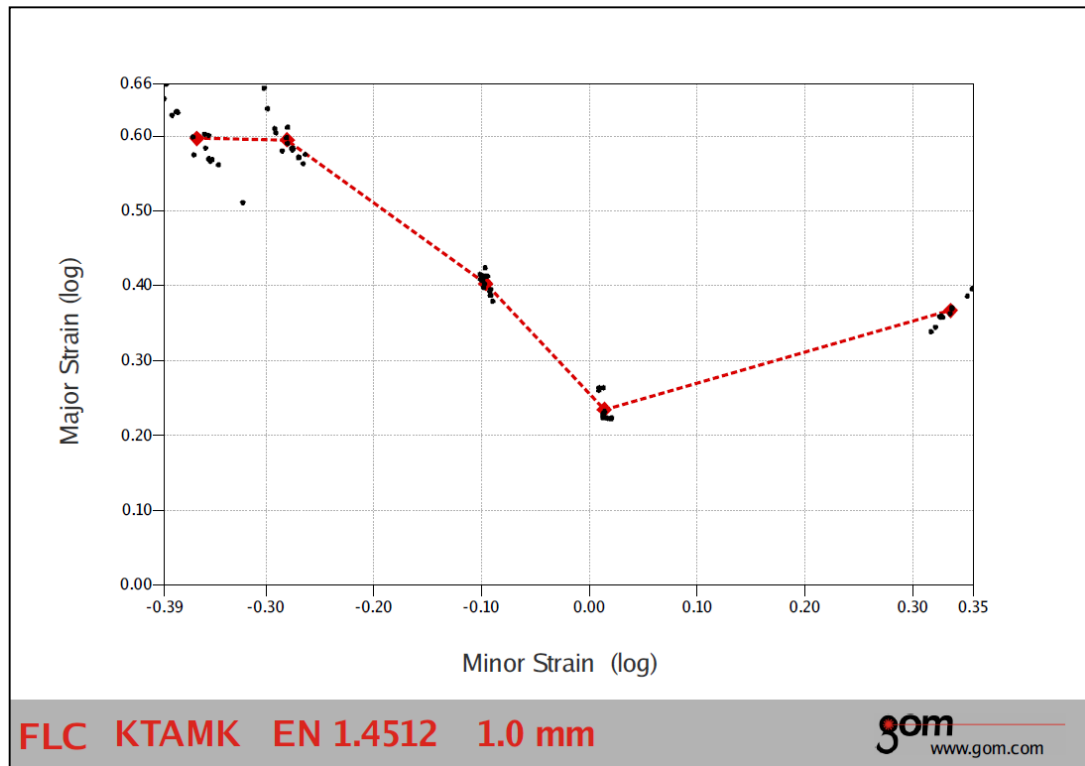
5.1. Rajamuovattavuus

Rajamuovattavuustestaukset osoittautuivat melko haasteellisiksi, koska kokeiden aikana esiintyi erilaisia ongelmia sekä materiaalin käyttäytymisen, stokastisen maalauksen ja kuvauksen osalta. Vaikka kitkan poistamiseksi käytettiinkin materiaalin ja painimen välissä standardin suosittamaa monimutkaisempaa voitelumenetelmää, oli ongelmana joissakin näytegeometrioissa repeämän sijoittuminen liian kauas kuvun laelta. Tämä ongelma esiintyi B-geometrian näytteissä, jotka sijoittuvat rajamuovattavuuskäyrän alimpaan pisteeseen. Stokastisen maalauksen tasainen laatu oli tärkeä tekijä kuvausten onnistumisessa. Näytteiden maalauksen liian vaimeat kontrastit sekä liian suuret maaliroskeet huononsivat Aramiksella tunnistaa näytteen pinta ja näin aiheuttivat epätarkkuutta sen tuottamiin kuviin, joihin aiheutui tunnistamattomia alueita. Suurempia kuvauksissa ilmenneitä muovausten loppuvaiheen tunnistusongelmia esiintyi varsinkin A-geometrian näytteissä, vaikka stokastisen maalauksen kuviointi oli samanlainen kuin muiden näytteiden. Kuvauslaadun parantamiseksi kamerajärjestelmä uudelleen tarkennettiin ja kalibroitiin useaan kertaan, maalattiin näytteet uudelleen, kokeiltiin suuremman halkaisijan omaavia muoveja painimen ja näytteen välissä sekä muutettiin näytteen pidinvoimaa. Ongelmaan ei löydetty syytä, joten voidaan vain arvailla, vaikuttaisiko mahdollisesti jokin ulkoinen tekijä kyseiseen asiaan.

5.1.1. EN 1.4512 rajamuovattavuus

Materiaalin EN 1.4512 rajamuovattavuustestauksissa esiintyi ongelmia, jotka vaikeuttivat käyrän generointia. A-geometrian näytteiden muovaustapahtuman kuvauksissa ilmeni Aramiksella selittämättömiä tunnistusongelmia, jotka aiheuttivat kuviin reikiä eli tunnistamattomia kohtia (kuva 35, liite 4). Näiden näytteiden tuloksia, joissa tunnistamattomat alueet olivat suuria, ei voitu käyttää rajamuovattavuuskäyrän muodostamiseen. Joidenkin

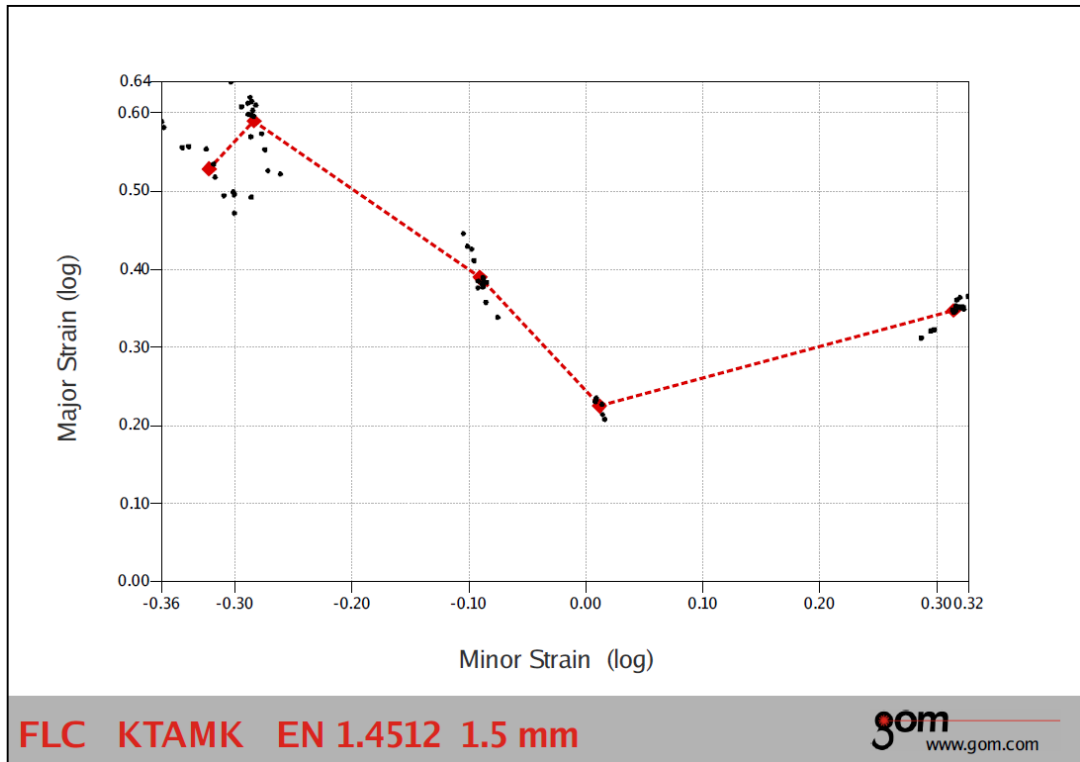
näytteiden kohdalla, joissa esiintyi pienempiä reikiä, jouduttiin kuvia paikkaamaan, jotta niistä saatiin käyttökelpoiset käyrän muodostamiseen.



Kuva 26. FLC EN 1.4512 (2B 1,0 mm)

Vahvuudeltaan 1 mm olevan laadun EN 1.4512 (kuva 26) rajamuovattavuuskäyrän luomisessa on käytettyjen näytteiden määrä riittävä, vaikka ongelmia esiintyikin A-geometrian näytteissä. Näitä kokonaisia näytteitä testattiin ongelmien vuoksi ylimääräisiä niin monta, että saatiin vähintään kolme käyttökelpoista muovaustulosta.

Vahvemman 1,5 mm paksun levyn testaukset olivat myös ongelmallisia A-geometrian tunnistamisongelmien vuoksi, joten siitä muodostettu rajamuovattavuuskäyrä (kuva 27) on muodostettu vajaasta näytemäärästä. Tämän vahvemman laadun EN 1.4512 rajamuovattavuuskäyrä vastaa muodoltaan ohuemman levyn käyrää lukuun ottamatta syvävetopuolen viimeisen näytegeometrian tuloksia, jotka jäävät hieman alemmas.

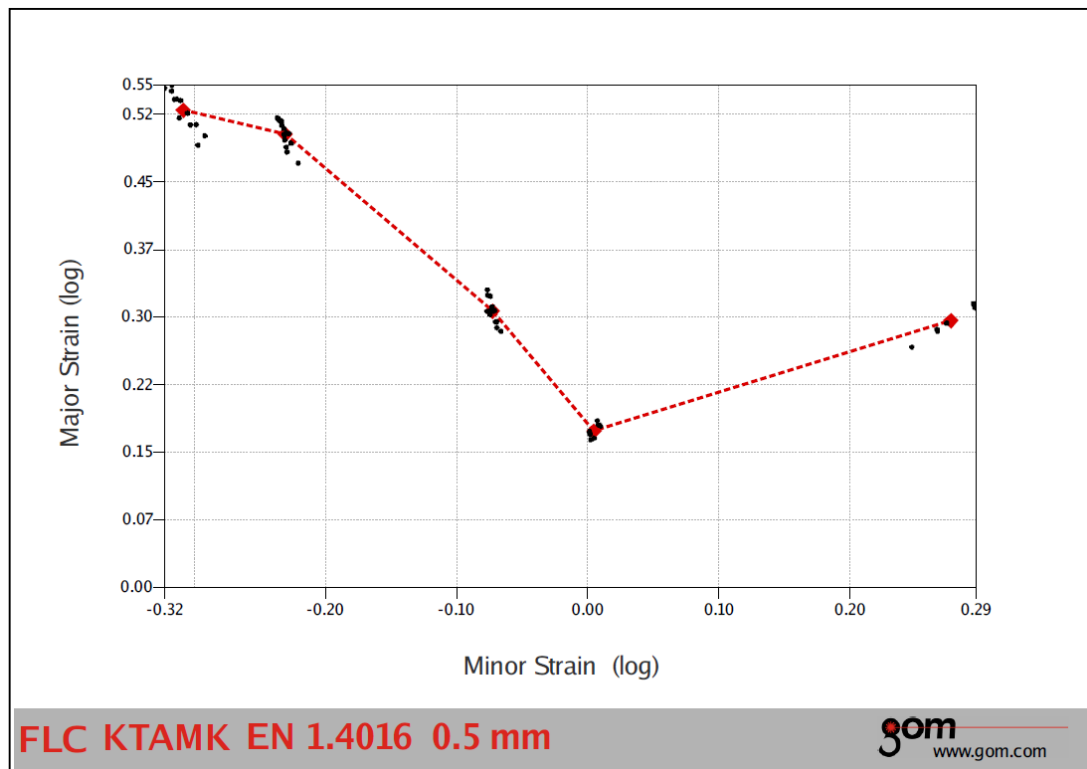


Kuva 27. FLC EN 1.4512 (2E 1,5 mm)

5.1.2. EN 1.4016 rajamuovattavuus vs. EN 1.4512

Kiiltohehkutetun EN 1.4016 rajamuovattavuuskäyrä (kuva 28) vastaa muodoltaan ja sijainniltaan melko lailla kyseiselle materiaalille aikaisemmin määritettyä käyrää. Tämän materiaalin rajamuovattavuustestauksissa ei esiintynyt suurempia ongelmia, mutta jostain syystä käyrän generoinnissa Aramis hylkäsi osan näytteistä, joten käyrä on muodostettu pienemmällä näytemäärällä kuin standardi suosittelee.

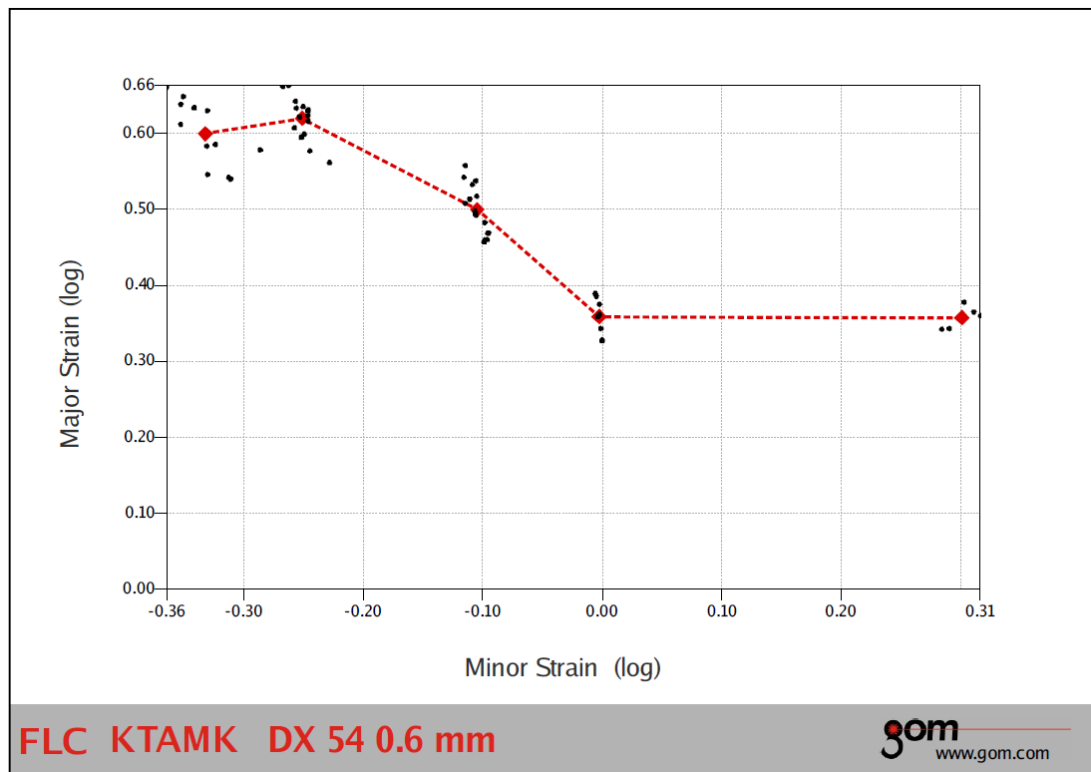
Laadun EN 1.4016 muovattavuusominaisuudet jäivät muodostettujen rajamuovattavuuskäyrien perusteella hieman huonommiksi kuin laadulla EN 1.4512, vaikkakin kyseessä on ohuempi materiaali. Ohutlevyn paksuus vaikuttaa aina jonkin verran rajamuovattavuuskäyrän sijaintiin diagrammissa, joten vertailtavien materiaalien tulisi olla saman vahvuisia. Käyrien muodot ovat molemmilla materiaaleilla melko samanlaiset ja FLC_0 sijaitsee molemmilla materiaaleilla hieman vaaka-akselin nollakohdan oikealla eli positiivisella puolella, niin kuin ruostumattomille teräksille on ominaista.



Kuva 28. FLC EN 1.4016 (2R 0,5 mm)

5.1.3. EN 1.0306 rajamuovattavuus

Sinkityn syvävetoteräksen rajamuovattavuustesteissä suurimmat ongelmat tulosten saamiseksi olivat näytteiden repeäminen liian kaukaa kuvun laelta. Näiden ongelmien vuoksi materiaalin rajamuovattavuuskäyrä (kuva 29) on muodostettu pienemmästä määrästä näytteitä kuin standardi suosittelee. Kaksi leveintä näytegeometriaa osoittautuivat ongelmalliseksi juuri repeämiskohdan sijainnin vuoksi.



Kuva 29. FLC EN 1.0306 (DX 54D 0,6 mm)

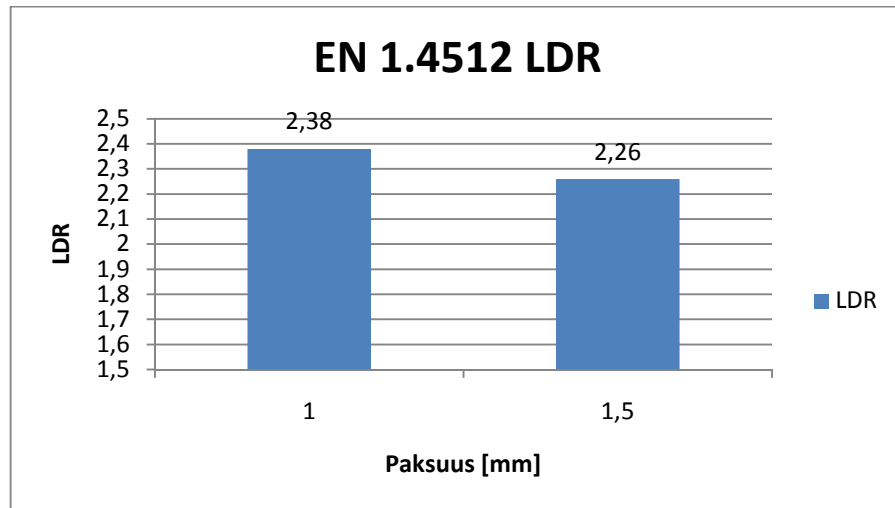
Vertailumateriaalina testattu sinkitty syvävetoteräs EN 1.0306 vaikuttaisi olevan rajamuovattavuuskäyrän mukaan huomattavasti paremmin muovattavaa kuin testatut ruostumattomat teräslaadut.

5.2. Rajavetosuhde

LDR-maksimi-arvot laskettiin viimeisen kolmen sarjan ehjän kupin (kuva 40, liite 4) alkuperäisten aihoiden mukaan kaavaa 7 käyttäen. Yleisesti käytetään kaavan 7 avulla lasketua tulosta, koska sillä saadaan tarkasti maksimi-arvo rajavetosuhteelle. Kaavan 6 käyttämistä hankaloittaa syvävedetyn kupin halkaisijan vaihtelu valssaussuuntaan ja sitä vasten kohtisuoraan sekä korkeussuuntaiset vaihtelut halkaisijassa.

Ohuemmillä levyvahvuuksilla liian alhaiset laskennalliset pidinvoimien arvot aiheuttivat runsasta rypyttymistä kupin helmoihin, joten pidinvoimia oli kasvatettava jopa 10 kN:lla. Paksummilla levyvahvuuksilla laskennallinen pidinvoiman arvo oli sopiva. Korvat muo-

dostuivat syvävedettyihin kuppeihin 0° ja 90° :een kohdalle valssaussuuntaan nähden, joten Δr -arvon tulisi olla suurempi kuin nolla.



Kuva 30. Rajavetosuhde EN 1.4512 (1 mm ja 1,5 mm)

Rajavetosuhteen arvoiksi kahdelle testatulle levyvahvuudelle (kuva 30) saatiin huomattavasti suurempia arvoja kuin kirjallisuuslähteestä saatavalle vertailuarvoille (kuva 24), joka oli noin 2,20.

5.3. Erichsenin luku

Materiaalille EN 1.4512 suoritettujen Erichsenin testien tulokset (taulukko 9) vastaavat kyseisen materiaalin vertailuarvoja, joita on käsitelty kappaleessa 3.1. Erichsen testin suorittaminen Erichsen ohutlevyjen muovattavuustutkimuslaitteella onnistui erittäin helposti standardin määrittämällä ohjeilla ja tarkat tulokset painumien syvyyksistä saatiin helposti Excel-taulukkomuotoon MES-ohjelmistosta.

Taulukko 9. IE-arvot laadulle EN 1.4512

Testi	Laatu	Paksuus	IE [mm]
Erichsen no.27	EN 1.4512	1	10,3
EN ISO 20482	EN 1.4512	1,5	10,9

5.4. Mekaaniset ominaisuudet

Vetokokeesta saadut mekaaniset tulokset ovat laadulle EN 1.4512 annettujen arvojen sallimissa rajoissa. Lähelle nollaa sijoittuva positiivinen Δr -arvo todistaa Swiftin kokeessa havaitun korvien muodostumisen 0° ja 90° :en kohdalle valssaussuuntaan nähden. Melko korkea keskimääräinen r-arvo puolestaan kertoo hyvästä syvävedettävyydestä, joka myös ilmeni rajavetosuhdekokeissa varsinkin 1 mm:ä vahvalla materiaalilla, jonka r-arvo on korkeampi (taulukko 10).

Taulukko 10. EN 1.4512 r-arvot ja mekaaniset ominaisuudet (90°)

Laatu	paksuus	r-arvo					n-arvo		$R_{p0.2}$	R_m	A_g	A_{80mm}
	[mm]	$r_{0/15}$	$r_{45/15}$	$r_{90/15}$	r_{15}	Δr_{15}	n_{10-15/A_g}	n_{2-20/A_g}	MPa	MPa	%	%
EN 1.4512 (2B)	1,0	1,7	1,6	2,6	1,9	0,5	0,18	0,16	361	478	18	31
EN 1.4512 (2E)	1,5	1,2	1,5	2,1	1,6	0,2	0,17	0,16	349	470	17	32

6. YHTEENVETO

Ohutlevyjen rajamuovattavuuden ja muiden materiaaliominaisuuksien selvittäminen oli mielenkiintoinen haastava tehtävä. Muovattavuustutkimusmenetelmiin perehtyminen ensin teorian kautta ja lopuksi kokeellisesti käytännön testeillä toi työhön laajuutta. Kokeelliset testaukset osoittivat, että aina voi esiintyä odottamattomia ongelmia ja viivästyksiä, jotka vaikeuttavat toivottuihin tuloksiin pääsemistä. Työssä päästiin kuitenkin melko hyvin asetettuihin tavoitteisiin, vaikka alkuperäisen projektisuunnitelman mukaista koematriisia ei täysin pystytty toteuttamaan tutkimusmateriaalien ja näytteiden valmistuksen viivästymisten vuoksi. Tärkeimpänä tavoitteena ollut rajamuovattavuuskäyrän määrittäminen saatiin toteutettua testauksissa ilmenneistä ongelmista huolimatta. Rajamuovattavuuskäyrän toteuttamiseksi Erichsen muovattavuustutkimuslaitteella ja GOM:n venymäanalysaattorilla tulevat jatkossa helpottumaan, koska toimintatapa ja mahdollisesti esiintyvät ongelmat ovat tiedossa.

Muovattavuutta, syvävedettävyyttä ja materiaalin mekaanisia ominaisuuksia erilaisilla menetelmillä tutkimalla saatiin selvitettyä laaja-alaisesti tutkitun ferriittisen ruostumattoman teräksen soveltuvuutta muovausprosesseihin. Jatkotutkimuksen aiheita yhdessä materiaalissa kyseisten testien osalta voisi olla paksuuden muutoksen ja pinnanlaatujen käyttäytymisen tarkastelu laajemmalla koematriisilla. Eri materiaalien vertailu saman levyvahvuuden tuotteista voisi myös olla mielenkiintoinen jatkotutkimusaihe varsinkin rajamuovattavuuden ja syvävedettävyyden osalta. Mielenkiintoisena kohteena olisi tietysti myös tarkastella jonkin konkreettisen muovattavan tuotteen venymiä ja tarkastella mille alueella rajamuovattavuuskäyrää siinä esiintyvät venymät sijoittivat.

7. LÄHDELUETTELO

- /1/ ATI Allegheny Ludlum, Stainless Steel AL 409HP, [pdf-dokumentti], [<http://www.alleghenysteeltchnologies.com/ludlum/documents/al409hp.pdf>], 23.9.2010.
- /2/ Charles, J, Mithieux, J.D, Santacreu, P.O, Peger, L, The Ferritic Stainless Steel Family: The Appropriate Answer to Nickel Volatility, [pdf-dokumentti], [http://www.fdp.nl/fil/Ferritic_Stainless_Steels%201.pdf], 31.8.2010.
- /3/ ERC/NSM, How to Draw Round Cups Deeper, [www-dokumentti], [<http://www.thefabricator.com/article/tooladdie/how-to-draw-round-cups-deeper>], 20.9.2010.
- /4/ Euro Inox, Ruostumattomien terästen muovaamisen mahdollisuudet, [pdf-dokumentti], [http://www.euro-inox.org/pdf/map/FormingPotential_FL.pdf], 30.9.2010.
- /5/ European Aluminium Association and Matter, Sheet Forming, [www-dokumentti], [<http://aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=186&pageid=2144416735>], 2.9.2010.
- /6/ Geiger. M, Determination of Forming Limit Diagrams – A New Analysis Method for Characterization of Material Formability, [pdf-dokumentti], [<http://www.sciencedirect.com>], 14.9.2010.
- /7/ Gom, Material Properties: Determination of Process Limitations in Sheet Metal Forming - Forming Limit Diagram, [pdf-dokumentti], [www.gom.com], 15.9.2010.
- /8/ Gom, Aramis User Manual – Software, 2008.
- /9/ Holmberg et al., Evaluation of Sheet Metal Formability by Tensile Tests, [pdf-dokumentti], [<http://www.sciencedirect.com>], 20.10.2010.
- /10/ Hosford, William F, Caddel Robert M, Metal forming: Mechanics and Metallurgy, 3rd edition, Cambridge University Press, 2007.
- /11/ ISO 10113, Metallic Materials – Sheet and Strip – Determination of Plastic Strain Ratio, Second Edition, International Standard, 2006.
- /12/ ISO 10275, Metallic Materials – Sheet and Strip – Determination of Tensile Strain Hardening Exponent, Second Edition, International Standard, 2007.
- /13/ ISO 12004-2, Metallic Materials – Sheet and Strip – Determination of Forming-Limit Curves, First Edition, International Standard, 2008.

- /14/ ISSF, The Ferritic Solution, [pdf-dokumentti], [http://www.euro-inox.org/pdf/map/The_ferritic_solution_EN.pdf], 31.8.2010.
- /15/ Joutsenvaara, Jukka, Kauppi, Timo, Advanced Strain Analysis - projektisuunnitelma, Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu, 2010.
- /16/ Kilfoil, Leo Joseph, In-plane Plane Strain Testing to Evaluate Formability of Sheet Steels Used in Tubular Products, [pdf-dokumentti], [http://qspace.library.queensu.ca/bitstream/1974/731/1/Kilfoil_Leo_J_200709_MSCE.pdf], 15.9.2010.
- /17/ Kivivuori, Seppo, Muokkaustekniikan perusteet, [pdf-dokumentti], [https://noppa.tkk.fi/noppa/kurssi/mt-0.2116/materiaali/MT-0_2116_kurssin_pruju.pdf], 3.9.2010.
- /18/ Kivivuori, Seppo, Levyn muovauksen menetelmät ja perusteet, Ohutlevy, 2, 2006, 58–62.
- /19/ Koskenniska, Janne, Erichsen kuppikoe materiaalille EN 1.4512, [excel-tilukko], sähköpostit 30.9.2010 ja 19.10.2010.
- /20/ Kyröläinen, Tarkiainen, Taulavuori, Ruostumattomat teräkset, 4. painos, Teknologiainfo Teknova Oy, 2008.
- /21/ Manninen, Timo, Seminaariesitelmä, Materia10 - Ferriittisten ruostumattomien terästen muovattavuus, 2010.
- /22/ Martikainen, Lasse, Ohutlevyn muovattavuuden kuvaaminen rajamuovattavuuspiiroksen avulla, Ohutlevy, 2, 2006, 52–56.
- /23/ Outokumpu, Product Information EN 1.4512, [pdf-dokumentti], [<http://www.outokumpu.com/46956.epibrw>], 31.8.2010.
- /24/ Sadagopan, Sriram, Formability Characterization of New Generation of High Strength Steel, [pdf-dokumentti], [http://www1.eere.energy.gov/industry/steel/pdfs/report_trp_0012.pdf], 15.9.2010.
- /25/ Schedin, Erik, Forming Stainless Steel, [pdf-dokumentti], [<http://www.outokumpu.com/files/Group/HR/Documents/FormingStainless.pdf>], 1.9.2010.
- /26/ Schuler GmbH, Metal Forming Handbook, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1998.
- /27/ SFS-EN ISO 20482, Metallilevyjen ja -nauhojen Erichsenin kuppivenytyskoe, 1. painos, Suomen Standardisoimisliitto, 2003.

- /28/ SFS-EN ISO 6892-1, Metallien vetokoe Osa 1: Vetokoe huoneenlämpötilassa, 1.painos, Suomen Standardisoimisliitto, 2009.
- /29/ Thyssen Krupp, Stainless Steel flat Products 409 (EN 1.4512), [pdf-dokumentti], [<http://www.acciaiterni.it/db/it/docPubblicazioni/409.pdf>], 30.9.2010.
- /30/ Turetta, Alberto, Investigation of Thermal, Mechanical and Microstructural Properties of Quenchenable High Strength Steels in Hot Stamping Operations, [pdf-dokumentti], [http://paduaresearch.cab.unipd.it/378/1/Tesi__Dottorato_Alberto_Turetta.pdf], 6.9.2010.
- /31/ World Steel Association, Formability, [www-dokumentti], [<http://steeluniversity.org/content/html/eng/default.asp?catid=18&pageid=2081271360>], 17.9.2010.

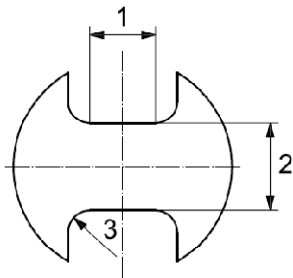
8. LIITELUETTELO

- LIITE 1 FLC-ohje
- LIITE 2 FLC näytepiirustus
- LIITE 3 Vetosauvan piirustus
- LIITE 4 Kuvia testauksista ja näytteistä

FLC-ohje

Näytteiden geometria ja mitoitukset

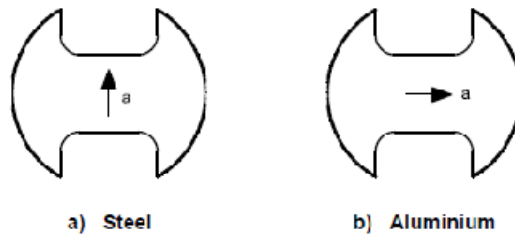
Aihion halkaisijaksi tulee 220 mm, jonka Erichsen-laite leikkaa muovausprosessin alussa. Kavennukset tehdään etukäteen näytegeometrioiden mukaan kuva 31. Suositeltavaa olisi käyttää testeissä vähintään viittä eri geometriaa (esim. Liite 2/1). Aihoiden muut mitat pysyvät samana, mutta mitta 2 vaihtuu. Jokaisesta geometriasta on tehtävä vähintään 3 onnistunutta koetta, joten jokaista näytelajia on syytä varata ylimääräisiä. Testauksen ja käsittelyn helpottamiseksi voidaan näytteet työstää yhtenäiseen suikaleeseen peräkkäin (Liite 2/2). Ohuemmat näytteet kannattaa valmistaa yksittäisinä, koska ne taipuvat helposti kavennuksen kohdalta.



Kuva 31 Näytteen mitoitus /13/

Kuvassa 31 olevien mittojen selitykset:

- 1** Kavennuksen suoran reunan pituus: oltava pidempi, kuin 25 % työkalun halkaisijasta.
(Ø100 mm työkalulle: 1 = 25 - 50 mm)
- 2** Kavennetun kohdan leveys (vähintään viisi eri leveyttä)
- 3** Pyöristyssäde = 20 - 30 mm



Kuva 32. Valssaussuunnat aihioissa/13/

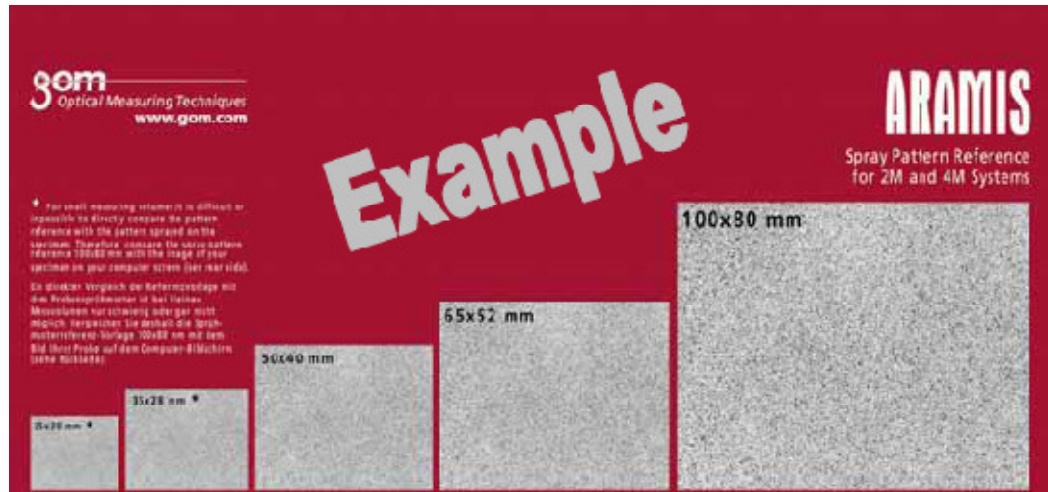
Valssaussuunnat aihioon valitaan (kuva 32) teräkselle kohtisuoraan kavennuskohdan pituus suuntaan nähden ja alumiinille kavennuksen suuntaisesti (voidaan myös testata toiseen suuntaan valssattuja, mutta tämä on ilmoitettava tutkimusraportissa).

Näytteiden työstäminen

Aihoiden testialueen työstämisessä ei tulisi käyttää naarmuttavia tai muitakaan työstömenetelmiä, jotka voivat aiheuttaa näytteeseen mikrorakenteen muutoksia, muokkauslujittumista tai naarmuja. Nämä muutokset vaikuttavat testien tuloksiin ja saattavat aiheuttaa testikappaleen liian aikaisen tai väärästä kohdasta repeämisen. Muokkauslujittuneet tai muuten muuttuneet alueet tulee poistaa työstämällä. Jäysteet työstetyltä alueelta on poistettava testaustyökalujen vaurioitumisen ehkäisemiseksi.

Näytteiden kuvioinnin maalaaminen

GOM:n Aramis optista mittausanalysointia käytettäessä tulee näytteet kuvioida stokastisella spray-maalaus kuvioinnilla. Kuvioinnin kontrasti tulee valita käytettävän mittausalueen mukaan esimerkiksi 100x80 mm (kuva 33). Tarkemmat ohjeet valintaan Aramiksien ohjeista.



Kuva 33. Stokastisen spray-maalaukkuviennin referenssi/8/

Näytteiden maalauksen vaiheet:

- Puhdista näytteiden pinnat öljystä, rasvasta ja muusta liasta esimerkiksi asetonilla, etanolilla tms.
- Maalaa näytteen ylöspäin tuleva pinta mattavalkoisella spray-maalilla tasaisen valkoiseksi.
- Mustan epäsäännöllisen kuvion maalaaminen tapahtuu kevyellä ohi ruiskuttamisella niin, että suihkeesta laskeutuu valkoiselle pinnalle mustia maali pisteitä. Paina spray-paininta kevyesti niin, että suihku on tasaista, mutta ei kuitenkaan roiskivaa. Kuvioinnin tulee olla riittävän tiheää, jotta vaihtelevuutta on runsaammin.

Testaus valmistelut:

- CCD-kamerat asennetaan kuvausvalmiuteen Erichsen laitteen sylinterin yläpuolelle (kuva 36) GOM:Aramis ohjeen mukaan
- Painimen ja näytteen välissä käytetään kitkan pienentämisen vuoksi standardin määrittelemiä voitelumenetelmiä. Voiteluna käytetään rasvaa ja muovikalvoja, jotka leikataan valmiiksi ympyräaihioiksi. Suositellut voitelumenetelmät testin aikana ovat:
 - A. Matalille muovausvoimille (ohuemmille levyille tai materiaaleille, joilla on suhteellisen alhainen vetolujuus, esim. alumiini levyt < 2 mm):

- 1) öljy tai rasva
 - 2) pyöreä aihio PE tai PTFE kalvosta (paksuus esim. 0,05 mm)
 - 3) öljy tai rasva
- B. Korkeille muovausvoimille (paksummille levyille tai korkean vetolujuuden omaaville materiaaleille):
- 1) Yksinkertainen menetelmä: kuten kohdassa A), mutta PTFE kalvo korvataan pehmeällä PVC kalvolla.
 - 2) Monimutkaisempi menetelmä:
 - I) öljy tai rasva
 - II) pyöreä aihio PE tai PTFE kalvosta (paksuus esim. 0,05 – 0,1 mm)
 - III) öljy tai rasva
 - IV) pehmeä PVC levy (paksuus 3 mm)
 - V) öljy tai rasva
 - VI) pyöreä aihio PE tai PTFE kalvosta (paksuus 0,05 – 0,1 mm)
 - VII) öljy tai rasva

Kohdat I) ja VII) ovat vapaavalintaisia ja ne voidaan toteuttaa voitelemalla painin ja näytteen alapinta öljyllä tai rasvalla.

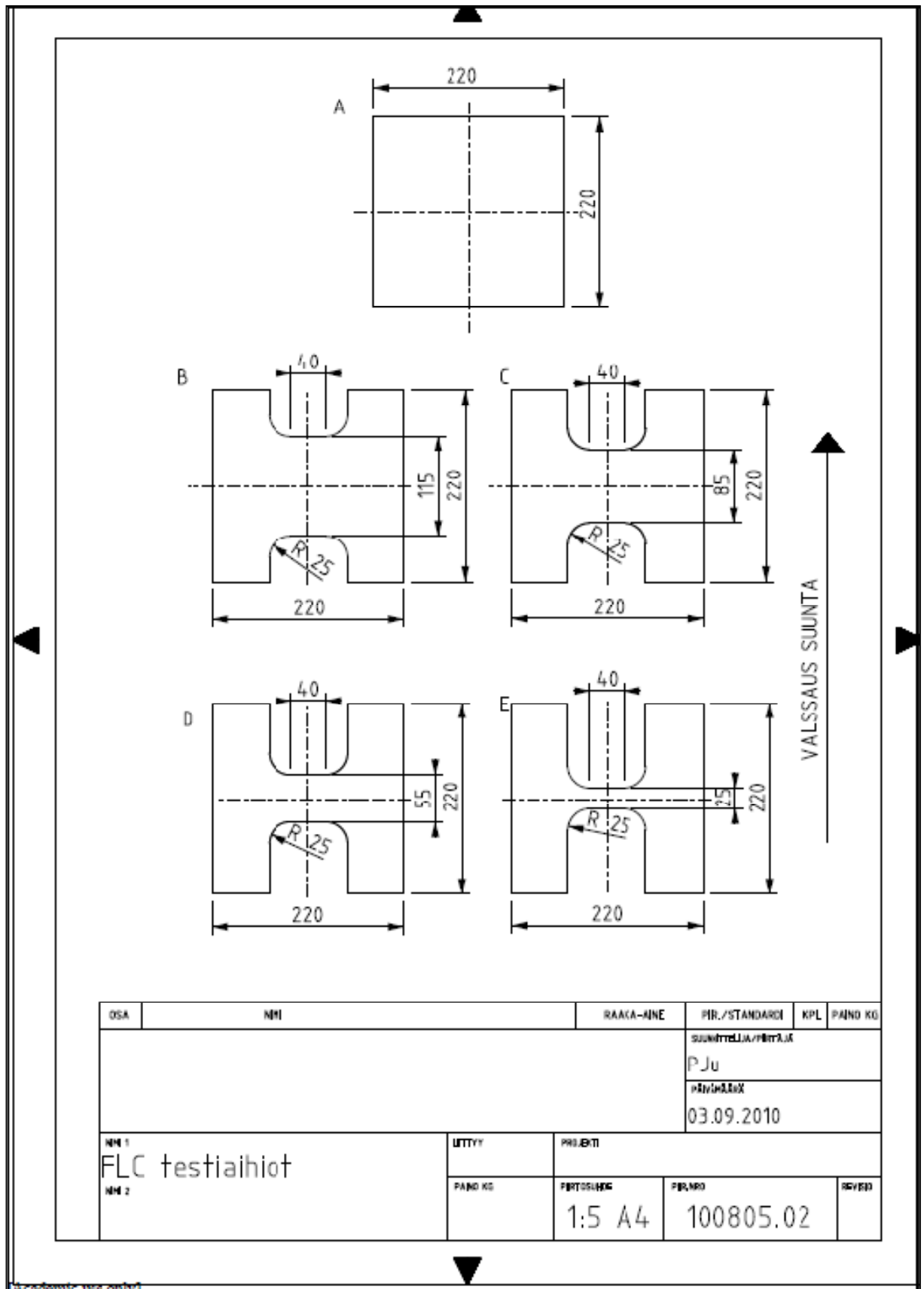
Pyöreiden kalvoaihioiden tulee olla halkaisijaltaan pienempiä kuin painin työkalun halkaisija. Noin 70 – 80 mm on osoittautunut sopivaksi halkaisijaksi muovikalvoille.

Testaus

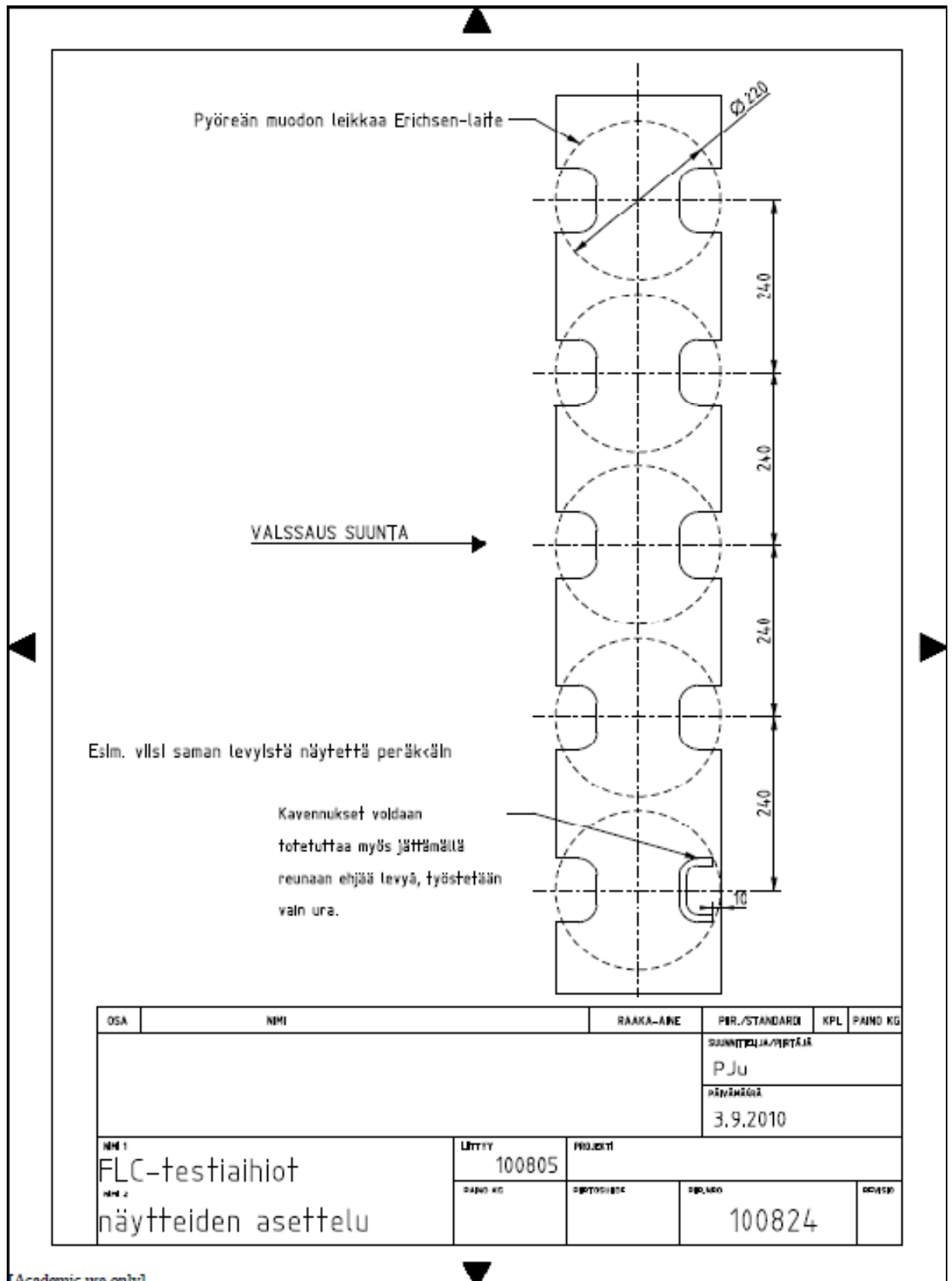
Käytetään testimenetelmänä Nakajima-testiä Erichsen muovattavuustutkimuslaitteessa. Muovaustapahtuma kuvataan GOM:n Aramis sovellusta käyttäen (kuva 34 ja 36). Testauksen vaiheet:

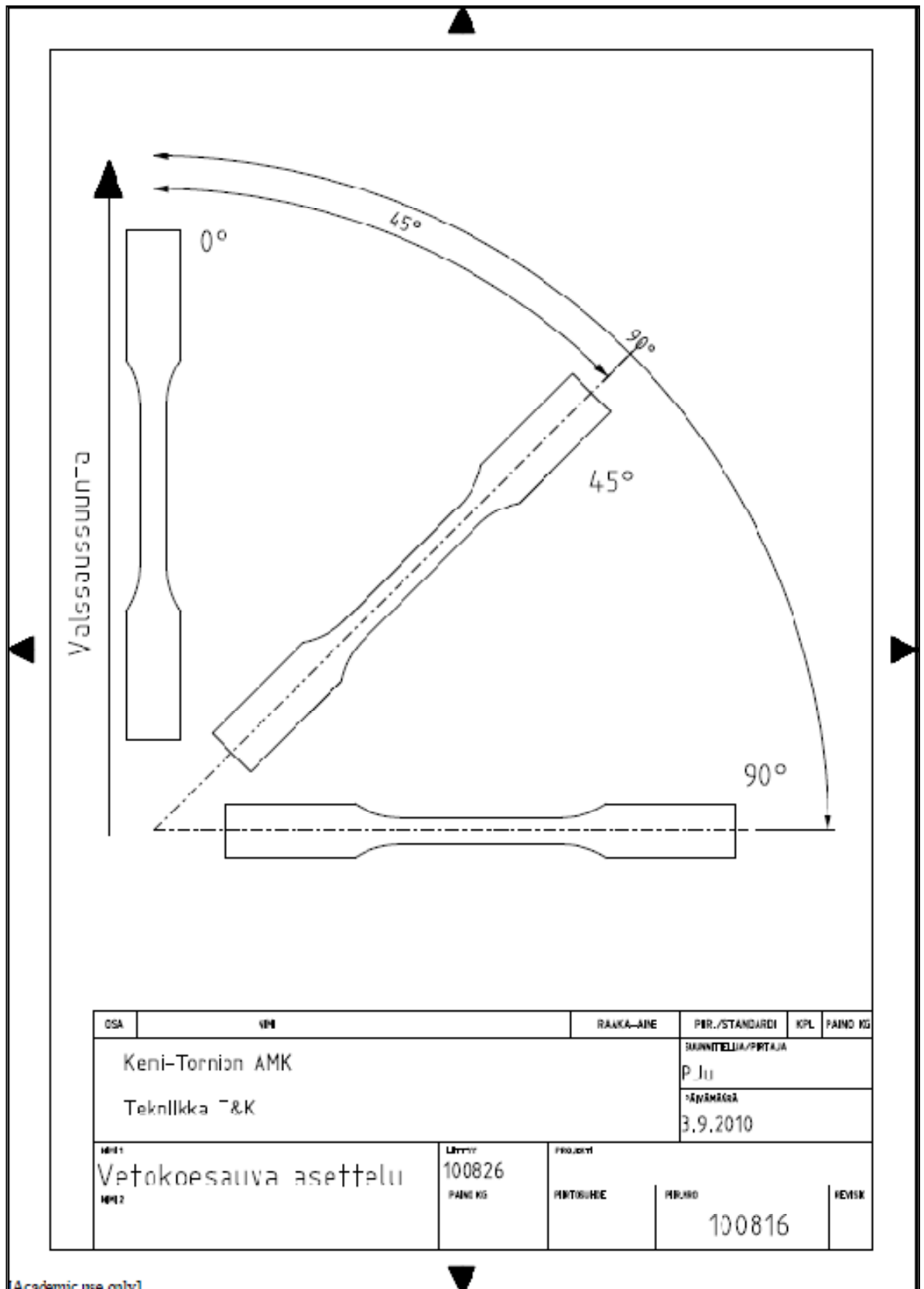
- Näyte asetetaan Erichsen-laitteen testaussyliinteriin
- Aramis valmistellaan kuvaus valmiuteen (ohjeiden mukaan), käytetään kaksivaiheista FLC-kuvausohjelmaa.
- Käynnistetään Erichsen-laitteen testaus →pidinvoima saavutetaan

- Otetaan Aramiksella yksi alkutilanteen kuva näytteestä ennen muovausta
- Käynnistetään muovaus Erichsen-laitteesta ja kuvaus Aramiksesta yhtä aikaa.
- Muovausvoiman tai painimen liikkeen lähestyessä arvioitua maksimiarvoa käynnistetään Aramiksessa kuvauksen toinen nopeampi vaihe (vähintään 10 kuvaa/s).

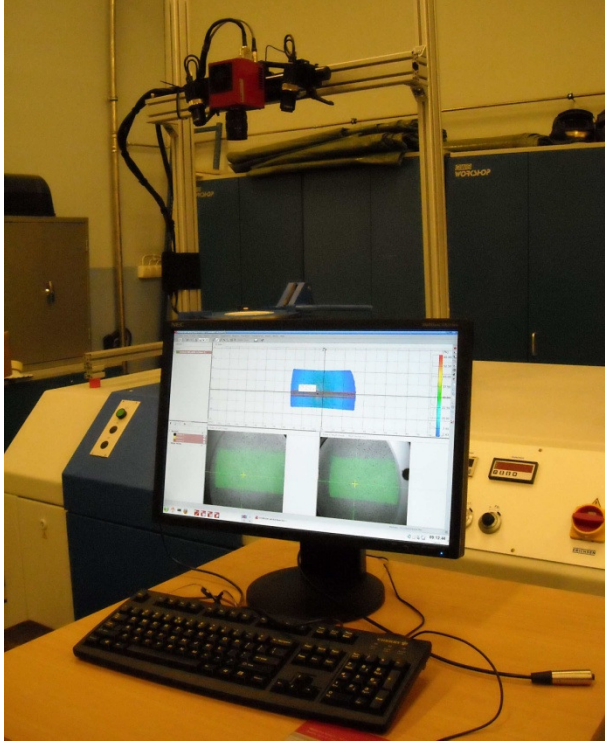


OSA	NIMI	RAAKA-AINE	PIR./STANDARDI	KPL	PAINO KG
			SUUNNITTELIJA/PIIRITÄJÄ P.Ju		
			PIIRITÄMÄKSI 03.09.2010		
NIMI 1	FLC testiaihiot	MITTYT	PROJEKTI		
NIMI 2		PAINO KG	PIKTSUHEUS 1:5 A4	PIIRINUMERO 100805.02	SEKSIÖ

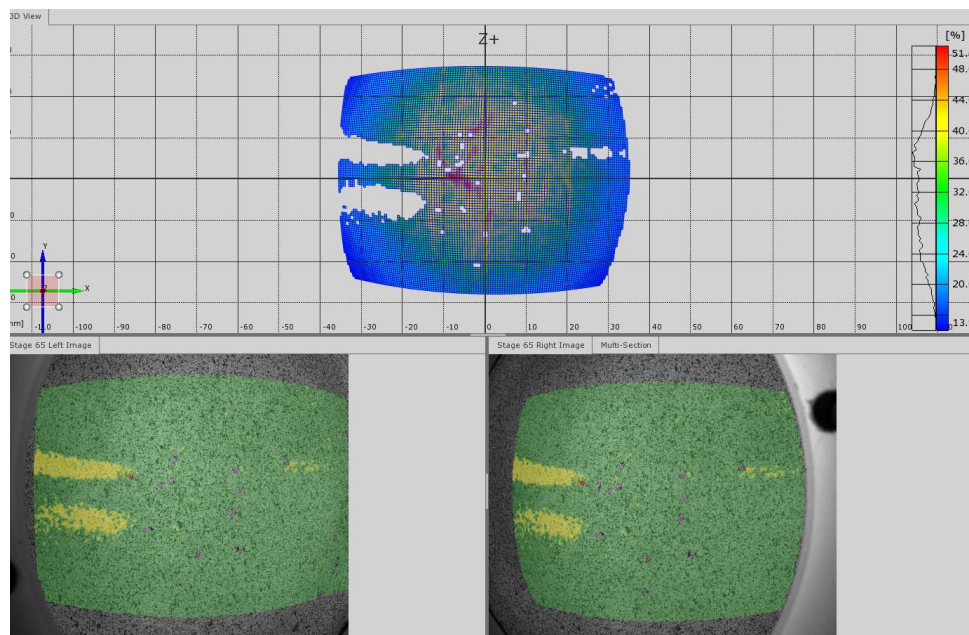




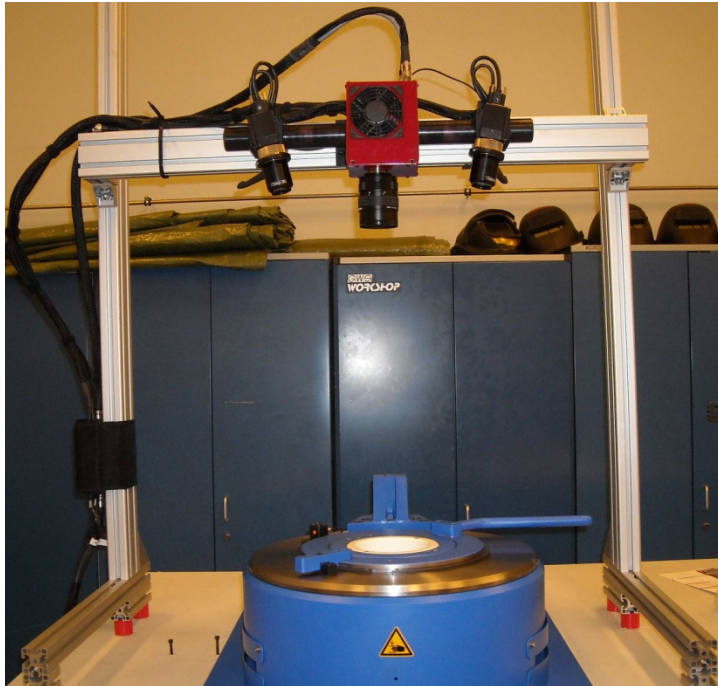
Kuvia testauksista ja näytteistä



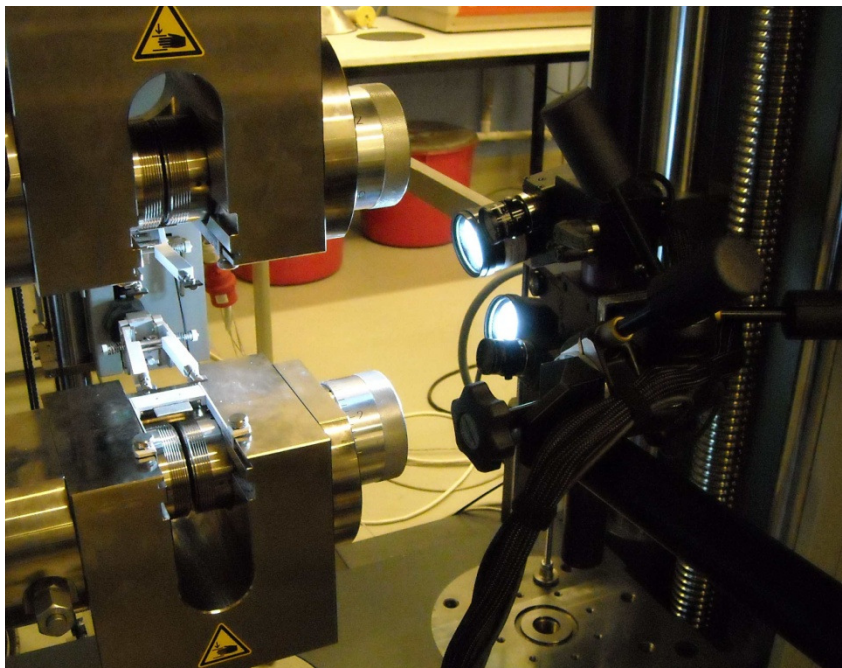
Kuva 34. FLC-kuvauksia Aramis ja Erichsen



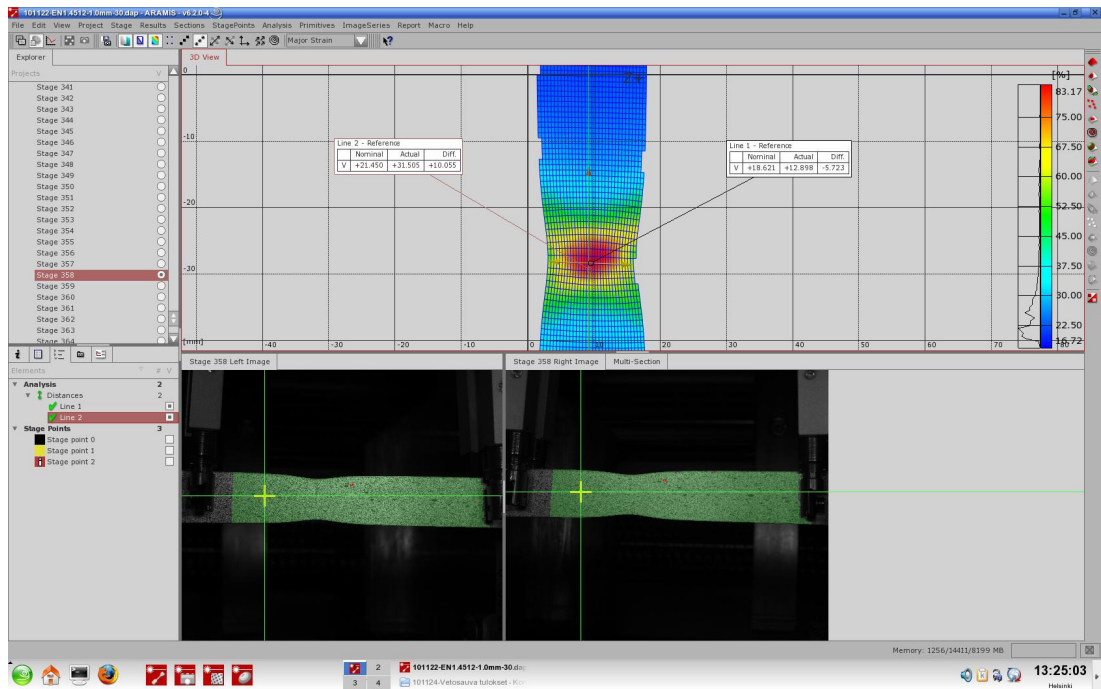
Kuva 35. Kuvauksessa esiintyviä ongelmia (Aramis)



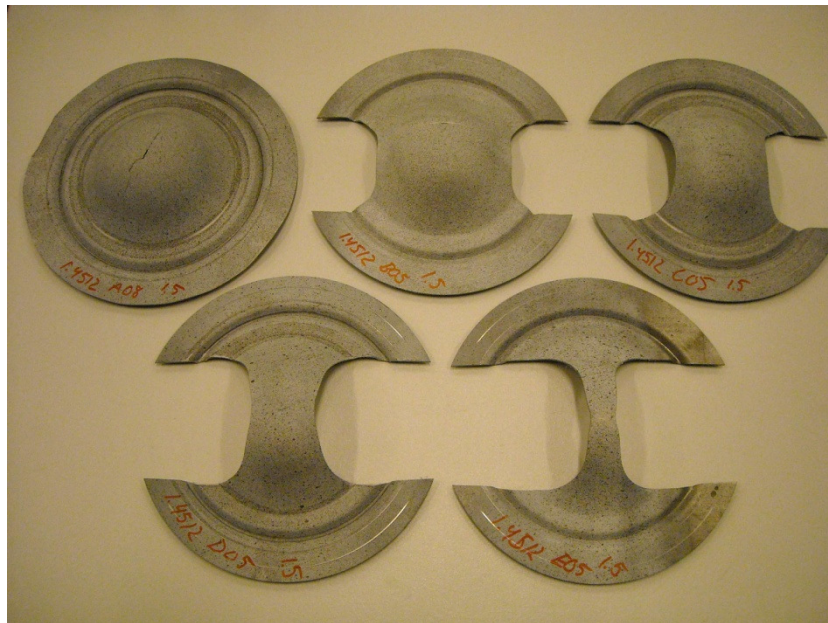
Kuva 36. Kamerajärjestelmä Erichsenin päällä



Kuva 37. Kameroiden sijainti vetokoneella



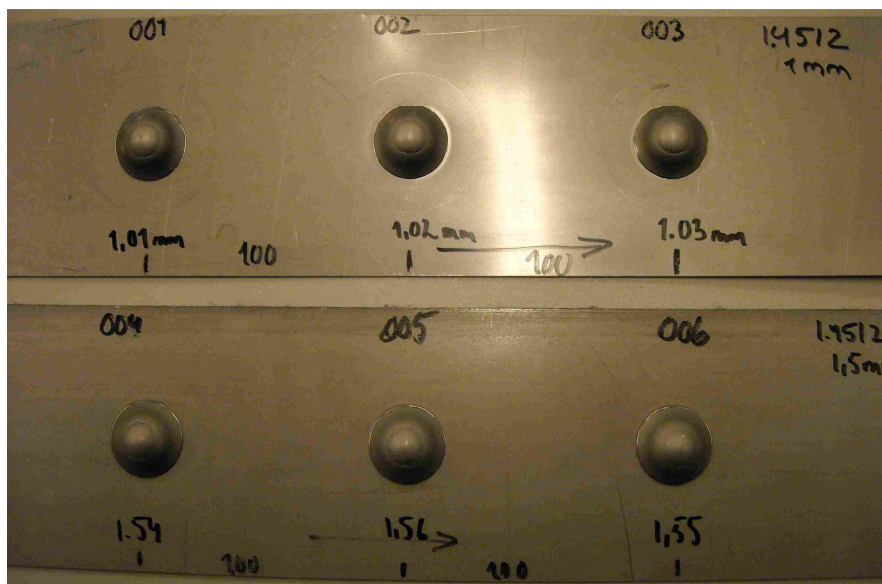
Kuva 38. Vetokoe kuvattuna Aramiksella



Kuva 39. Testatut Nakajima-nyytteet



Kuva 40. Swift-rajavetosuhdenäytteet



Kuva 41. Testatut IE-näytteet