



SAVONIA

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

RAKENNEPUTKIEN MATERIAALITUTKIMUS

TEKIJÄ: Juha Koponen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Konetekniikan tutkinto-ohjelma	
Työn tekijä Juha Koponen	
Työn nimi Rakenneputkien materiaalitutkimus	
Päiväys 21.5.2019	Sivumäärä/Liitteet 72/4
Ohjaaja(t) Mika Mäkinen ja Jussi Asikainen	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Junttan Oy	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tämän opinnäytetyön tarkoitus oli tutkia ja vertailla Junttan Oy:n paalutuskoneiden osissa käytettävien rakenneputkien Fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia. Tutkittavia rakenneputkia oli neljää erilaista, jotka ovat olleet käytössä eri vuosina rakennetuissa paalutuskoneissa. Rakenneputkissa on havaittu selkeitä eroja kulutuskestävyydessä. Kaikista rakenneputkista ei ole valmistajan aineistodistuksia, joten niiden ominaisuudet haluttiin selvittää tutkimuksilla.</p> <p>Tutkimuksissa käytettiin kemiallisen koostumuksen mittaamiseen pyyhkäisyelektronimikroskooppia (SEM). Fysikaalisten ominaisuuden tutkimuksissa käytössä olivat: Vickers- kovuusmittauslaite kovuuden mittaamiseen, metallimikroskooppi makrohietutkimukseen, vetokoe murtovenymän, sekä myötö- ja murtolujuuden mittaamiseen, sekä Charbyn-iskukoe iskutheyden mittaamiseen. Teoriamateriaalia kerättiin kirjallisuudesta, internetistä, asiantuntijoilta ja standardeista.</p> <p>Työn tuloksena saatiin kaikista tutkimuksista tutkimusraportit, jotka lähetettiin työn tilaajalle. Niissä ilmeni eroavaisuuksia eri materiaalien välillä ja tulokset tukevat havaintoja materiaalien kulutuskestävyyden eroista. Tutkimustuloksia voidaan käyttää hyödyksi tulevaisuudessa materiaalivalintoja tehdessä.</p>	
Avainsanat kuluminen, materiaalitutkimus, Rakenneputket	
julkinen	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Mechanical Engineering			
Author Juha Koponen			
Title of Thesis Research on structural tube materials			
Date	21.5.2019	Pages/Appendices	72/4
Supervisor(s) Mr. Mika Mäkinen, Senior Lecture, Mr. Jussi Asikainen, Research engineer			
Client Organisation /Partners Junttan Ltd			
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this thesis was to explore and compare differences in physical and chemical properties of structural tubes used in Junttan Ltd piling rig. There were four different structural tubes to be studied, which have been used in piling rig built in different years. There are clear differences in wear resistance in structural tubes. There are no manufacturer's material certificates for all structural tubes, so we wanted to find out about their properties through research.</p> <p>In the studys, a scanning electron microscope (SEM) was used to measure the chemical composition. Physical properties were studied by usins a vickers-hardness tester for measuring hardness, a metal microscope for macroscopic examination, tensile testing for percentage elongation after fracture, yield strength and tensile strength and a Charbyn impact test for impact strength. Theoretical information was collected from literature, the Internet, experts and standards.</p> <p>All the research reports were sent to the client. There were discrepancies between the different materials and the results support the discovery of differences in materials´ wear resistance. The research results can benefit the client in making future material choices.</p>			
Keywords wear, materials research, structural hollow			
puplic			

ESIPUHE

Tämä opinnäytetyö on tehty Junttan Oy:lle. Haluan kiittää Junttan Oy:n Markku Koffrentia ja Juha Huovista opinnäytetyön aiheen antamisesta sekä työssä avustamisesta. Kiitos myös muille opinnäytetyöhön osallistuneille. Työn ohjaaja lehtori Mika Mäkiselle, alkuaineanalyysin tekijä FT Jari T.T. Leskelle, SIB Labs, Itä-Suomen yliopistolta, kokeissa auttaneelle projekti-insinööri Arvo Tiilikaiselle ja koesauvojen tekijöille Varkauden SAKKY:lla.

Kiitos myös koko Savonia-ammattikorkeakoulun henkilökunnalle ja erityisesti opiskelutovereille, joiden ansiosta opiskelu oli hauskeempaa ja tehokkaampaa. Iso kiitos myös vaimolleni ja ystäväilleni, jotka auttoivat suuresti opiskelun ja arjen haasteissa.

Siilinjärvellä 21.5.2019



Juha Koponen

SISÄLTÖ

ESIPUHE	4
1 JOHDANTO	7
1.1 Työn tavoitteet	7
1.2 Työn rajaus	7
2 JUNTAN	8
3 KULUMINEN	9
3.1 kulumistyytit	10
3.2 Kulumismekanismit	12
3.2.1 Adhesiivinen kuluminen	12
3.2.2 Abrasiivinen kuluminen	13
3.2.3 Tribokemiallinen kuluminen	14
3.2.4 Väsymiskuluminen	14
3.3 Kulumiseen vaikuttavat tekijät	15
3.3.1 Pintakerrokset	15
3.3.2 Väliaine pintojen välillä	15
3.3.3 Ympäristöolosuhteet	15
3.3.4 Kuormitus	16
3.3.5 Liukunopeus	16
3.3.6 Liukoisuus	16
4 TERÄS	17
4.1 Teräksen rakenne	17
4.2 Teräksessä yleisimmin käytetyt seosaineet	18
4.3 Haitta-aineet teräseoksissa	20
4.4 Teräksen käyttö materiaalina	21
5 TYÖSSÄ TUTKITTAVAT MATERIAALIT	22
6 TUTKIMUSMENETELMÄT JA VALMISTELU	24
6.1 Vetokoe	24
6.1.1 Valmistelu	25
6.1.2 Mittaus	26
6.1.3 Tulokset	27

6.2	iskukoe	29
6.2.1	Valmistelu.....	30
6.2.2	Mittaus	30
6.2.3	Tulokset	31
6.2.4	valmistelu	32
6.2.5	Mittaus	32
6.2.6	Tulokset	33
6.3	Kovuuskoe.....	36
6.3.1	Valmistelu.....	37
6.3.2	Mittaus	38
6.3.3	Tulokset	39
6.4	Alkuaineanalyysi	40
6.4.1	Valmistelu.....	42
6.4.2	Mittaus	42
6.4.3	Tulokset	45
7	POHDINTAA TULOKSISTA	51
8	LOPPUPÄÄTELMÄT	52
9	LÄHDELUETTELO.....	53
10	LIITE 1: VETOKOKEESSA SAATU, YHDEN VETOSAUVAN RAPORTTI.....	54
11	LIITE 2: ALKUINEANALYY SIN RAPORTTI	55
12	LIITE 3: KOVUUSMITTAUKSEN MITTAUSPÖYTÄKIRJA	70
13	LIITE 4. ISKUSITKEYDEN MITTAUSPÖYTÄKIRJA	72

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin neljän eri rakenneputken fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia ja vertailtiin niitä toisiinsa.

Tutkittavia rakenneputkia on käytetty eri aikoina Junttan Oy:n valmistamissa paalutuskoneissa. Rakenneputkien valmistaja ja valmistustapa on muuttunut aikojen saatossa muutamaankin kertaan ja rakenneputkien kulumiskestävyyksissä on huomattu selkeitä eroja. Kaikista rakenneputkista ei ole tiedossa valmistajan antamia ominaisuustietoja, joten rakenneputkien materiaaliominaisuuksia ja niiden eroja haluttiin selvittää hyväksikäyttäen erilaisia tutkimusmenetelmiä.

1.1 Työn tavoitteet

Työn tavoitteena oli tehdä materiaaleille erilaisia tutkimuksia, joiden avulla niistä saataisiin selville, niissä mahdollisesti olevia ominaisuuseroja. Materiaalinäytteille tehtiin alkuaineanalyysi, kovuuskoe, iskutkeys-koe, vetokoe ja mikroskooppitarkastelu, jolla vertailtiin teräksen kiderakennetta.

Tässä työssä perehdyttiinkin tarkemmin niihin ominaisuuksiin, joista löytyi eroja eri materiaalien kesken ja joilla voisi olla osuutta erilaiseen kulumiskäyttäytymiseen.

1.2 Työn rajaus

Työ rajattiin pelkästään tutkimuksiin, tutkimustuloksiin ja niiden vertailuun. Tutkimustulosten perusteella ei jatkotutkimuksia tehty.

2 JUNTAN

Junttan Oy on erikoistunut hydraulisten paalutuslaitteiden suunnitteluun, valmistamiseen ja markkinointiin. Junttan Oy:llä on 40 vuoden kokemus markkinoiden johtavien paalutuskoneiden suunnittelusta ja valmistamisesta. Junttanin juuret ylettyvät aina 1960-luvulle, Savon Varvi -nimiseen perustustekniikan yritykseen. (Junttan Oy)

Paalutuskoneilla (Kuva 1) tehdään perustuksia rakennuksille ja muille rakennelmille, esimerkiksi rautateille ja satamille. Koneessa olevalla hydraulijärkäleellä (Kuva 2) hakataan maahan paalu, joka on yleensä teräsbetonia tai terästä. Paalut upotetaan jopa usean kymmenen metrin syvyyteen, joten järkäleeltä vaaditaan paljon iskuenergiaa. Jotta vaadittava iskuenergia saavutetaan, pitää järkäleen sisällä olevan liikkuvan osan liikkua riittävän nopeasti ja olla riittävän painava.



Kuva 1. Paalutuskone (Junttan Oy)



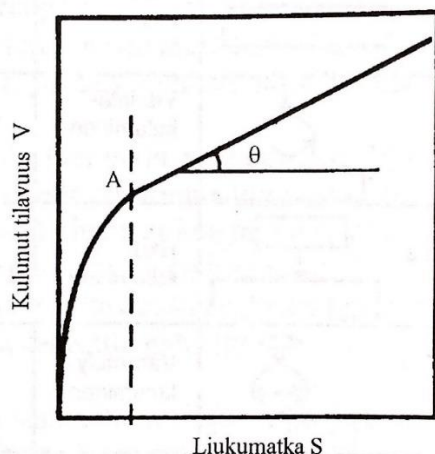
Kuva 2. Hydraulijärkäle (Junttan Oy)

3 KULUMINEN

Tribologia on määritelmänsä mukaan tieteenala, joka tutkii toisiaan vasten liikkuvien pintojen vuorovaikutuksia. Vuorovaikutuksella ymmärretään niitä fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia ja reaktioita, jotka liittyvät lähinnä kitkan, kulumisen ja voitelun muodostamaan systeemiin. Tribosysteemissä yksinkertaisimmillaan voidaan ajatella kaksi pintaa koskettamaan toisiaan liikkeen ja kuormituksen alaisina. Pintojen joutuessa toistensa läheisyyteen, ne alkavat vaikuttaa toisiinsa joko suoraan tai väliaineen välityksellä. Pintojen mikrogeometriat eli pinnankarheudet, väliaineen koostumus ja vallitsevat kuormitukset määräävät kosketuksen tyypin. Pintojen välinen normaalivoima F_N aiheuttaa mikrogeometrioiden muodonmuutoksen ja mahdollisesti lopulta syntyviä kulumispartikkeleita. (Kivioja;Kivivuori;& Salonen, 2007, ss. 18, 20)

”Kuluminen on seurausta toisiaan vastaan liikkuvien pintojen keskinäisestä vuorovaikutuksesta. Se ilmenee materiaalihäviönä kappaleen/kappaleiden pinnalta. Kulumisen yksiselitteistä ja yksinkertaista fysikaalista ja matemaattista määrittämistä ei ole vielä pystytty tekemään ja siksi se onkin jatkuvan tutkimustyön kohteena. Kulumistapahtumaan vaikuttavia parametreja on niin useita, että niiden yhtäaikainen hallinta on vaikeaa. Myös mikroskooppimittakaavassa kulumispartikkelin synnyn ja toisaalta makroskooppisen kulumisen takuvarma selittäminen kussakin kulumistapauksessa on vielä lähes kokonaan empiirisen tiedon varassa. Teoreettisten kulumislakien paikkansapitävyydestä ja soveltuvuudesta käydäänkin tieteellisellä tasolla vilkasta kädenvääntöä” (Kivioja;Kivivuori;& Salonen, 2007, s. 97)

Kulumisnopeutta voidaan mitata monenlaisilla kaavoilla, mutta materiaaleissa ja niiden käyttökoh-teissa on niin paljon muuttujia, ettei tarkkaa arvoa ole mahdollista saada. Kulumista mitataankin usein suhteellisenä arvona, jolloin materiaalilavuus suhteutetaan liukumismatkaan (Kuva 3). Kuvasta on helppo havaita kulumisen tyypilliset vaiheet, joihin kuuluu sisäänajovaihe ja tasaisen kulumisen vaihe. Sisäänajovaiheessa kuluminen on voimakasta ja kulumiskäyrä nousee jyrkästi. Kun saavutetaan piste A, on kosketuspintojen pinnankarheudet tasoittuneet ja pinnan epäpuhtaudet poistuneet kosketuskohdasta. Tässä pisteessä saavutetaan tasapainotila, jonka jälkeen kulumisnopeus jatkuu vakiona. (Kivioja;Kivivuori;& Salonen, 2007, s. 102)



Kuva 3. Kulumisnopeus matkan funktiona. (Kivioja;Kivivuori;& Salonen, 2007, s. 102)

3.1 kulumistyyppit

Koneenelimissä kulumista tapahtuu erilaisissa olosuhteissa, jolloin ideaalisen kulumisen teoria ei päde. Kuluminen pyritään lajittelemaan eri kulutusmekanismeihin. Todellisessa kosketuksessa kulumista voi tapahtua useallakin eri mekanismilla, joista yhden katsotaan olevan hallitseva. Kulumista on yritetty luokitella moninkin eri perustein. Normaalissa koneenrakentamisessa kuluminen ilmaistaan yleensä sen mukaan, mitä fysikaalista tapahtumaa halutaan korostaa. Esimerkiksi kuoppautumisesta, naarmuuntumisesta tai väsymisestä. (Kivioja;Kivivuori;& Salonen, 2007, s. 100)

Kuluminen jaetaan yleensä kahteen eri päätyyppiin, jolloin ne luokitellaan joko:

1. kulumista aiheuttavan suhteellisen liikkeen pohjalta, tai
2. luokittelu kulumismekanismin pohjalta.

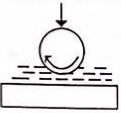
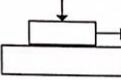
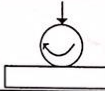
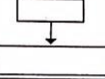

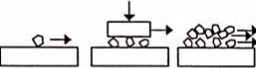
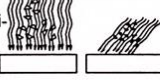
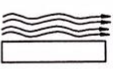
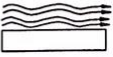
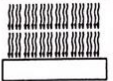
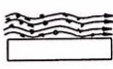
Kun luokitus tapahtuu kulumisen suhteellisen liikkeen pohjalta, ovat kulumista aiheuttavat tyypit eroteltavissa kuuteen erityyppiseen tapaukseen:

1. liukuminen
2. vierintä
3. värähtely
4. iskukuormitus
5. nestevirtaus
6. nestevirtaus, jossa kiinteitä partikkeleita

Kuluminen kulumismekanismin perusteella jaotellaan neljään eri tyyppiin:

1. adheesio
2. abraasio
3. pinnan väsyminen
4. tribokemiallinen kuluminen

Kulumista voidaan jaotella myös erilaisten taulukoiden mukaan, joissa on mukana molemmat kulumisen päätyypit (Kuva 4). Kuten kuvasta voi nähdä, esimerkiksi vierintärasitus aiheuttaa vierintäväsymistä, mutta kulumismekanismitaan se voi olla adhesiivista, abrasiivista, väsymiskulumista tai tribokemiallista kulumista. Kulumisen tyypittämisessä ja myös jaottelussa tulee olla tarkkana, miltä kannalta asiaa tarkastelee. (Kivioja;Kivivuori;& Salonen, 2007, s. 100)

Systeemin rakenne	Kulumisen aiheuttava rasitustyyppi	Kulumistyyppi	Kulumismekanismi			
			Adheesio	Abraasio	Pinnanväsyminen	Tribo-kemiallinen
Kiinteiden pintojen välissä voiteluaine	Liukuminen Vierintä Isku Sysäykset 				X	X
Kiinteät pinnat toisiaan vasten	Liukuminen 	Liukumiskuluminen	X	X	X	X
	Vierintä 	Vierintäkuluminen	X	X	X	X
	Iskukuormitus 	Iskukuluminen	X	X	X	X
	Värähtely 	Värähtelykuluminen	X	X	X	X
Kiinteät pinnat ja kulumispartikkeli	Hionta 			X		
Kiinteät pinnat ja partikkelit	Partikkeli-suihku 	Eroosio		X	X	X
Kiinteä pinta ja kaasu	Virtaus 	Kaasu-eroosio				X
Kiinteä pinta ja neste	Virtaus Värähtely 	Kavitaatio			X	X
	Virtaus Isku 	Pisara-eroosio			X	X
Kiinteä pinta ja nesteessä kuluttavia partikkeita	Virtaus 	Eroosio		X	X	
		Korroosio-eroosio		X	X	X

Kuva 4. Kulumisen luokittelu kuluttavan rasituksen ja kulumismekanismien mukaan. (Kivioja;Kivivuori;& Salonen, 2007, s. 100)

3.2 Kulumismekanismit

Materiaalin kuluminen, eli materiaalihukka kappaleen pinnasta voi tapahtua neljällä seuraavalla tavalla. Väsymällä, abrasiivisesti, adhesiivisesti tai tribokemiallisen reaktion kautta. Käytännössä kuluminen tapahtuu yleensä useammalla kuin yhdellä mekanismilla. Tämän takia onkin usein vaikea sanoa, mikä kulumismekanismi kulloinkin vallitsee. (Kivioja;Kivivuori;& Salonen, s. 104)

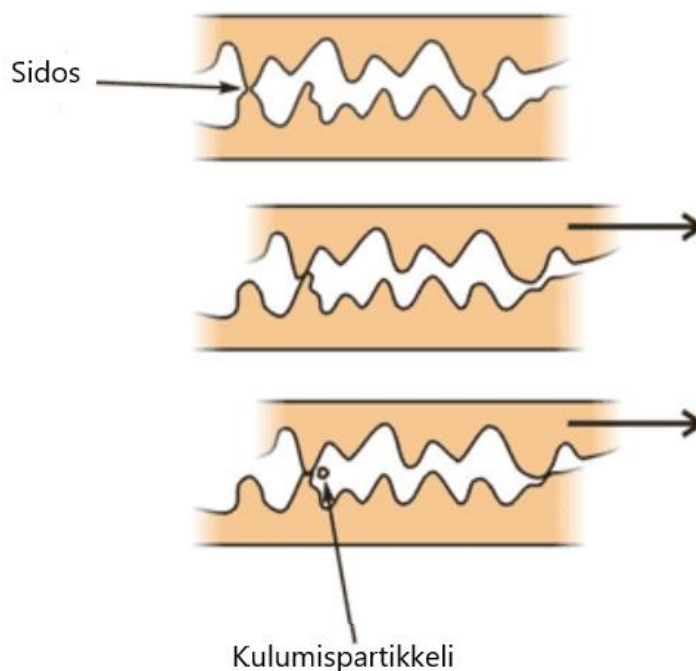
3.2.1 Adhesiivinen kuluminen

Adhesiivista kulumista syntyy kitkan adhesiivisten liitosten leikkautumisena. Adhesiivisen liitoksen revetessä kulumisnopeus riippuu siitä, mistä kohtaa liitos repeää. Jos repeäminen tapahtuu alkuperäisten pintojen rajapinnasta, ei kulumispartikkeleita synny. Kun liitos repeää muualta, siirtyy materiaalia pinnalta toiselle ja lopulta muodostuu myös irtonaisia kulumispartikkeleita (Kuva 5). (Kivioja;Kivivuori;& Salonen, 2007, s. 104)

Adhesiivinen kulumispartikkeli syntyy periaatteessa neljän vaiheen tuloksena:

1. paikallisissa mikrokontaktikohdissa normaali- ja tangenttijännitys aiheuttavat muodonmuutoksia,
2. mikrokontaktien tasoittuminen ja kosketusalan kasvaminen,
3. adhesiivisen liitoksen syntyminen koskettavien makropintojen välillä ja
4. liitoksen irtoaminen aiheuttaen kulumispartikkelin.

Adhesiivista liitosta kutsutaan myös kylmähitsautumiseksi. Hitsautumiseen vaikuttavat pintojen fysiikkaaliset ja kemialliset ominaisuudet, voitelu ja kuormitus. (Kivioja;Kivivuori;& Salonen, 2007, s. 104)

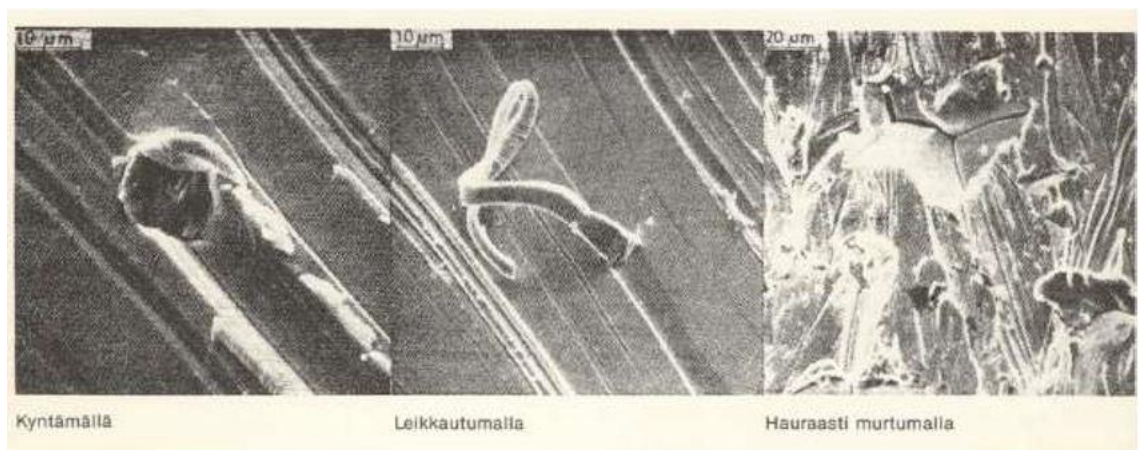


Kuva 5. Adhesiivisen kulumisen mekanismi. (Tampereen yliopisto)

3.2.2 Abrasiivinen kuluminen

Kovemman pinnan liukuessa pehmeämpää vasten, uurtavat kovan pinnan pinnankarheuden huiput normaalivoiman vaikutuksesta pehmeämpää pintaa. Tällöin on kyse kahden kappaleen abrasiivisesta kulumisesta. Kun kahden toisiaan vasten liukuvan pinnan välissä on kovempaa materiaalia, joka uurtaa molempia pintoja on kyseessä kolmen kappaleen abrasiivinen kuluminen. Tällainen kuluminen alkaa usein kahden kappaleen abrasiivisesta kulumisesta ja kehittyy siitä kolmen kappaleen abrasiiviseksi kulumiseksi. Tällöin jommastakummasta pinnasta on irronnut kulumispartikkeli, joka on muokauslujittumisen takia kovettunut. Samanlainen mekanismi voi muuttaa myös adhesiivisen ja tribo-kemiallisen kulumisen, kolmen kappaleen abrasiiviseksi kulumiseksi. (Kivioja;Kivivuori;& Salonen, 2007, s. 108)

Abrasiivinen kuluminen, jossa vastinpinta tai kolmannet partikkelit irrottavat materiaalia pinnasta voi tapahtua periaatteessa kolmella eri mekanismilla (Kuva 6). Jos hankaava partikkeli on muodoltaan loiva, tapahtuu kuluminen helposti kyntämällä. Tällöin partikkeli aiheuttaa vastakappaleeseen plastista muodonmuutosta ja plastisoitunut materiaali aurautuu suurimmaksi osaksi uran reunoille. Partikkelin ollessa jyrkkäreunainen, kuluminen tapahtuu yleensä leikkautumalla. Tällöin partikkeli irrottaa materiaalia toisesta pinnasta leikkaamalla. Kolmas mekanismi on hauraasti murtumalla. Tämä tapahtuu helposti varsinkin hauraille materiaaleille. Näin käy etenkin silloin, kun kuluvaan pintaan kohdistuu iskumaisia kuormituksia ja materiaali on haurautensa lisäksi jäykkää. Paikalliset jännitykset kasvavat niin suuriksi, että materiaalin suuri kovuuskaan ei pysty estämään murtumista. (Kivioja;Kivivuori;& Salonen, 2007, ss. 108,109)



Kuva 6. Abrasiivisen kulumisen kolme kulumismekanismia. (Suomen metalliteollisuuden keskusliitto, 1986, s. 4)

3.2.3 Tribokemiallinen kuluminen

Tribokemiallista kulutusta aiheuttavat esimerkiksi nesteet, kiinteät aineet tai kaasut. Kulumisessa materiaalin pinnalla oleva suojaava oksidikerros vaurioituu, jolloin materiaali pääsee hapettumaan. Tribokemiallinen kuluminen on yleensä hidas tapahtuma. Kulumista nopeuttaa esimerkiksi kohonnut lämpötila, joka seuraa esimerkiksi kappaleiden epätasaisen kosketuksen seurauksena tulleista paikallisista lämpötilahuipuista. Kulumisen seurauksena syntyy metallioksiedeja ja kuluneet pinnat ovat kiiltäviä ja tiiviitä. (Kivioja;Kivivuori;& Salonen, 2007, ss. 338-341)

3.2.4 Väsymiskuluminen

Väsymiskuluminen ja sen hallitseminen on koneenrakennuksessa yksi tärkeimpiä suunnittelukriteerejä. Väsymiskulumista ei välttämättä suoraan synny kulumispartikkeleita, vaan sen synty vaatii tykyttävää tai vaihtuvaa pidempiaikaista rasitusta. Kun kappaleen pinnankarheuden uloke deformatuu plastisesti tarpeeksi monta kertaa, irtoaa siitä kulumispartikkeli väsymismurtuman seurauksena. Tällaisia kulumisia näkee tyypillisesti loppuun käytetyissä kuulalaakereissa tai raskaasti kuormitetuissa hammaspyörissä. (Kivioja;Kivivuori;& Salonen, 2007, s. 113)

3.3 Kulumiseen vaikuttavat tekijät

Materiaalin kulumisen suuruuteen vaikuttavat koskettavien pintojen rakenteen pintakerrosten koostumus, ympärillä vallitsevat olosuhteet ja lämpötila, kuormituksen suuruus, liukunopeus ja sen tyyppi sekä materiaalien liukoisuus toisiinsa. (Kivioja;Kivivuori;& Salonen, 2007, s. 120)

3.3.1 Pintakerrokset

Oksidikerroksen kuluessa kappaleen pinnalta pois, kasvavat adhesiiviset metalli/metalli- liitokset ja kulumisnopeus kasvaa sen myötä. Liitosten repeytyessä kulumispartikkelit ovat usein muokkauslujituneita, jolloin ne rupeavat toimimaan kolmansina partikkeleina ja kuluminen lisääntyy. Rakenteen pintakerroksen ominaisuudet ratkaisevat kulumisen liikkeellelähdön ja sen nopeuden. Yleensä koneenrakennuksessa perusmateriaaleja pyritään saamaan pinnoiltaan kovemmiksi erilaisilla lämpökäsittelyillä tai pinnoitusmenetelmillä. Paremmiin kulumista kestävä pinta voidaan tehdä myös fysikaalisesti tai kemikaalisesti. Myös voiteluaineita lisäaineistamalla yritetään edesauttaa oksidikalvon syntyä komponenttien pinnalle. (Kivioja;Kivivuori;& Salonen, 2007, s. 121)

3.3.2 Väliaine pintojen välillä

Yleensä koneenosien voitelu perustuu hydrodynaamisesti kuorman kantavaan voiteluainekalvoon. Hitaasti liikkuvissa, suuren kuormituksen alaisissa liukupinnoissa varsinaista hydrodynaamista kalvoa ei pääse syntymään ja siksi tällaisissa kohteissa kulumista ehkäisevä metallipintojen välinen kosketus pyritään estämään rajavoitelulla. Pintojen metallista kosketusta pyritään välttämään lisäämällä voiteluaineeseen mm. rasvahappoja, jotka reaktiivisina aineina muodostavat kemiallisen liitoksen metallin kanssa ja siten estävät metalli/metalli -kosketuksen. Kyseinen reaktio on suhteellisen nopea, joten irronneen kalvon tilalle kerkeää yleensä muodostumaan uusi kalvo ennen uutta kuormituskertaa. (Kivivuori, 2016, s. 121)

3.3.3 Ympäristöolosuhteet

Ympäristöolosuhteet vaikuttavat suuresti varsinkin rajapintavoideltuihin kohteisiin, joihin ympäristön epäpuhtauksilla on yleensä suhteellisen vapaa pääsy. Voitelemattomat liukulaakerit sallivat vain tiettyjä ympäristöjä, joissa ne toimivat optimaalisesti. Voitelemattomien ja huonosti voideltujen liukulaakereiden kulumista lisää suuresti kosteuden ja happamien aineiden läsnäolo. (Kivioja;Kivivuori;& Salonen, 2007, s. 122)

Kosketusalueen lämpötilan muuttuminen vaikuttaa kulumisnopeuteen kolmella tavalla:

- muuttamalla materiaalien pintaominaisuuksia,
- muuttamalla pintakalvon kasvunopeutta ja ominaisuuksia sekä
- muuttamalla väliaineen ominaisuuksia.

Pinnankarheuden ulokkeiden hangatessa toisiaan vasten, muuttuu osa niiden muodonmuutokseen kuluvasta energiasta lämmöksi ja siten paikalliset lämpötilat pinnankarheuden huipuissa voivat olla jopa tuhansia asteita. Lämpöshokki kestää ehkä noin 0,0004 s, mutta lämmön johtuminen vaikuttaa molempien perusmateriaalien, sekä väliaineen ominaisuuksiin. Kuormituksen ja liukunopeuden suuruus vaikuttavat suuresti lämpötilan nousuun. (Kivioja;Kivivuori;& Salonen, 2007, s. 122)

3.3.4 Kuormitus

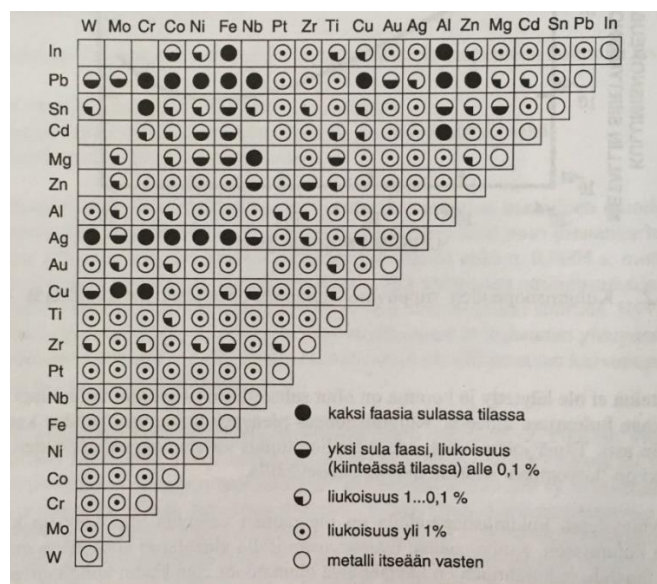
Kuormituksen kasvaminen vaikuttaa suoraan kulumisnopeuteen, mitä suurempi kuormitus, sitä suurempi kuluminen. Kuormituksen kasvaminen siirtää kulumistapahtuman lievästä kulumisesta, voimakkaan kulumisen alueelle. Näiden kahden kulumisvaiheen siirtymäkohtaa kutsutaan transitiokuormaksi. Jos kuormitusta kasvatetaan edelleen, rupeaa pinnoissa tapahtumaan kiinnileikkautumista, jolloin kulumisnopeus kasvaa erittäin jyrkästi. Toisaalta kuormituksen lisäys kasvattaa myös lämmön lisääntymistä. Lämpötilan kohoaminen nopeuttaa oksidikalvon kasvamista perusmateriaalin pinnalla, jolloin transitiokuorma kasvaa. (Kivioja;Kivivuori;& Salonen, 2007, s. 123)

3.3.5 Liukunopeus

Liukunopeus vaikuttaa voitelumekanismiin. Kovemmilla liukunopeuksilla saadaan voitelu pysymään hydrodynaamisella alueella, jolloin metallipintojen välillä ei tapahdu kosketusta. Tällöin myös lämpötilan nousu on alhaisempaa, eikä kulumista juurikaan tapahdu. Liukunopeuden pudotessa voitelutilanteesta muodostuu seka- tai rajapintavoitelu, jolloin metallipintojen välille rupeaa muodostumaan kontakteja ja sitä kautta kulumispartikkeleita. (Kivioja;Kivivuori;& Salonen, 2007, s. 123)

3.3.6 Liukoisuus

Vastakkain liukuvien materiaalien liukoisuus toisiinsa vaikuttaa suuresti kitka- ja kulumisominaisuuksiin. Kun materiaaleilla on pieni keskinäinen liukoisuus, paranevat niiden edellytykset pienen kitkan ja kulumisen saavuttamiseen. Mikäli liukuparin materiaalit ovat samaa materiaalia, on myös niiden liukoisuus 100 % ja kuluminen yleensä nopeaa. On olemassa erilaisia liukoisuuskarttoja, joiden avulla nähdään, mitkä liukuparit toimivat hyvin keskenään (Kuva 7). (Kivioja;Kivivuori;& Salonen, 2007, ss. 123-124)



Kuva 7. Kartta, eri metallien liukoisuudesta toisiinsa. (Kivioja;Kivivuori;& Salonen, 2007, s. 124)

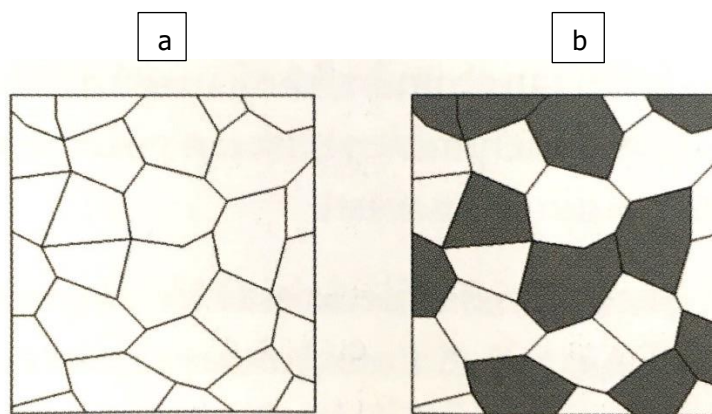
4 TERÄS

Teräkseksi kutsutaan metalliseosta, joka on rautavalmisteinen, mutta sisältää myös hiiltä ja muita seosaineita. Teräksessä hiilipitoisuus on korkeintaan 2,1 %, hiilipitoisuuden noustessa tämän rajan yli, puhutaan valuraudasta. Käytännössä teräksessä on hiilen lisäksi aina muitakin seosaineita. Teräs sisältää yleensä myös ei-toivottuja epäpuhtauksia. Epäpuhtaudet ovat aina haitaksi teräksen materiaaliominaisuuksille. Teräksen valmistuksessa pyritäänkin saamaan epäpuhtauksien määrä mahdollisimman pieneksi. Teräksiä seostetaan erilaisilla lisäaineilla sen ominaisuuksien parantamiseksi. Seostetusta teräksestä puhuttaessa tarkoitetaan yleensä teräksiä, joiden seosaineiden määrä ylittää hiilen määrän. (Kivivuori)

4.1 Teräksen rakenne

Metallien valmistuksessa materiaali sulatetaan nestemäiseen muotoon. Lämpötilan laskiessa puhtaan metallin sulamispisteen alapuolelle, ydintyy sulaan metalliin kiinteitä partikkeleita useisiin paikkoihin samanaikaisesti. Nämä ytimet kasvavat ja muodostavat metalleille tyypillisen kiderakenteen. Kiinteässä muodossa metallit koostuvatkin edellä esitetystä johtuen raerajaa myöten toisiinsa liittyvistä kiteistä. (Kivivuori, s. 41)

Metalliseoksilla muutos sulan ja kiinteän olomuodon välillä ei tapahdu tietyssä tarkassa lämpötilassa, vaan seos jähmettyy tietyllä tasapainon edellyttämällä lämpötilavälillä. Lämpötilan laskiessa metalliseokseen muodostuu kaksi- tai useampifaasista raerakennetta. Tällaisissa metalliseoksissa saattaa esiintyä samanaikaisesti kemialliseltaan koostumukseltaan tai atomien pinousjärjestykseltään erilaisia kiteitä, joita sanotaan faaseiksi. Näiden faasien lukumäärä on kullakin seokselta rajoitettu ja riippuu koostumuksesta ja lämpötilasta. Useamman kuin yhden faasin muodostamaa rakennetta sanotaan heterogeeniseksi, kun taas yhden faasin muodostama rakenne on homogeeninen (Kuva 8). Teräs on faasirakenteeltaan heterogeeninen, kun taas puhtaan metallit voivat olla homogeenisiä. (Kivivuori, ss. 41-42)



Kuva 8. Faasirakenteet, Homogeeninen (a) ja heterogeeninen (b). (Kivivuori, s. 42)

Teräksen kiderakenteessa on usein nähtävissä perliitti tummana- ja ferriitti vaaleana kiderakenteena (Kuva 8). Kiderakenteella on vaikutusta teräksen lujuuteen. Raekoon pieneneminen nostaa teräksen lujuutta, sillä raeraja pysäyttää dislokaatioiden liikkeen, tällöin dislokaatiot ruuhkautuvat raerajoille. Raekoon pientyminen parantaa iskusitkeyttä ja alentaa transitiolämpötilaa. Murtokurouma ja -venymä sen sijaan kasvavat suuremmalla raekoolla, minkä vuoksi muokattavissa teräslaaduissa pyritään suureen raekokoon. Raekokoon voidaan vaikuttaa teräksen seosaineilla ja lämpötilalla. (Kivivuori, s. 57)

4.2 Teräksessä yleisimmin käytetyt seosaineet

Teräksen fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia voidaan muunnella seostuksen avulla. (Kivivuori, s. 48)

Rauta (Fe)

Rauta on teräksen pääraaka-aine. Rauta on alkuaineista neljänneksi yleisin ja maankuoren toiseksi yleisin metalli. Sen osuus maankuoresta on noin 5 prosenttia. Maankuoressa rauta esiintyy pääsääntöisesti erilaisina yhdisteinä, kuten rautaoksideina. Rautaa löytyy myös jonkin verran vapaana, niin sanottuna meteoriittirautana. (Sorsa, 2015, s. 28)

Hiili (C)

Hiili on teräksen tärkein seosaine. Hiili on myös elintärkeä alkuaine eläville olennoille. Ilman hiiltä nykyisen kaltaista elämää ei olisi olemassa. Hiili on myös merkittävä energianlähde ja eri materiaalien, kuten muovien pääraaka-aine. (Sorsa, 2015)

Hiilipitoisuus vaikuttaa teräksen ominaisuuksiin lähinnä kiderakenneosien määrasuhteen kautta. Mitä enemmän teräksessä on hiiltä, sen kovempaa ja lujempaa se on. Hiilipitoisuuden kasvaessa teräksen sitkeys-, muovattavuus- ja hitsattavuusominaisuudet heikkenevät. Lisäksi hiili haurastuttaa terästä iskumaisissa kuormituksissa kohottamalla teräksen transitiolämpötilaa. Huonontaa kylmätaottavuutta (Kivivuori, s. 51)

Teräksessä on hiiltä korkeintaan 2,1 prosenttia. Kun hiiltä on yli 2,1 prosenttia, puhutaan valuraudasta.

Pii (Si)

Pii on maankuoren toiseksi yleisin alkuaine. Piitä käytetään teräksen tiivistämiseen. Se myös parantaa hiukan teräksen muodonmuutoslujuutta ja muokkauslujittautumista. Huonontaa kylmätaottavuutta (Kivivuori, s. 52)

Mangaani (Mn)

Mangaania löytyy kaikista teräksistä vähintään 0,3 %, koska sillä saa poistettua teräksestä ylimääräisen hapen ja se sitoo rikin vähemmän haitalliseen sulkeumamuotoon. Mangaanin atomit liittyvät hiiliatomiin ja pyrkivät sementtiittikiteisiin. Mangaani on kustannustehokkain karkenevuutta lisäävä seosaine. Mangaani lisää rakenteen kovuutta sekä lujuutta ja parantaa kulumiskestävyyttä. Se on tehokkaimpia teräksen transitiolämpötilaa madaltavia seosaineita, joten mangaaniseostuksella voidaan parantaa matalan lämpötilan iskusitkeyttä. Mangaani estää erittäin tehokkaasti austeniitin hajoantumista. Matala faasimuutoslämpötila edesauttaa hienon raerakenteen muodostumista, jolloin saavutetaan hyvät lujuus- ja iskusitkeysominaisuudet. Lisää teräksen taipumusta päästö- ja sinihaurauteen. Jos terästä käytetään kohteeseen, joissa päästö- ja sinihauraudesta on haittaa, käytetään kalliimpia seosaineita.

(Kivivuori, s. 51)

Nikkeli (Ni)

Nikkelin päätehtävä on austeniitin stabiloiminen, mutta nikkeli parantaa myös iskusitkeyttä, etenkin matalissa lämpötiloissa, koska se laskee transitiolämpötilaa. Lisää muodonmuutoslujuutta ja muokauslujittumista (Kivivuori, s. 52)

Kupari (Cu)

Kupari omaa lähes yhtä voimakkaan vaikutuksen austeniitin stabiloimiseen kuin nikkelikin, mutta se on erittäin paljon nikkeliä halvempaa. Yli 0,2 % kuparipitoisuus lisää halkeilun riskiä kuumavalssauksen aikana. Seostamalla nikkeliä 1/3 kupariin nähden saadaan kuumahalkeilun riskiä pienennettyä. (Kivivuori, s. 52)

Kromi (Cr)

Kromi on pääseosaine ruostumattomissa teräksissä, mutta sitä käytetään myös normaaleissa teräksissä seosaineena. Kromi lisää teräksen lujuutta ja sitkeyttä, muodostamalla kovia ja lujia kromikarbideja rakenteeseen. Korkeilla kromin seosmäärillä se kuitenkin heikentää terästä, sillä se stabiloi ferriittiä, mikä johtaa lujuuden heikkenemiseen. Kromi lisää hiukan teräksen karkenevuutta ja on siihen tarkoitukseen edullisempi kuin mangaani ja molybdeeni. Lisää myös hiukan teräksen muodonmuutoslujuutta ja muokauslujittumista ja parantaa teräksen korroosion kestoa, muodostamalla teräksen pinnalle ilmatiiviin oksidikerroksen. (Kivivuori, ss. 52-53)

Alumiini (Al)

Alumiinia käytetään teräksen tiivistämiseen, sillä se sitoo itseensä tehokkaasti hapen ja typen. Alumiini parantaa teräksen iskusitkeyttä varsinkin matalissa lämpötiloissa, koska se pienentää tehokkaasti rae-kokoa ja muodostaa nitridejä irrottaen typen raudan liuoksesta. Rae-koon pienentyessä lujuus kasvaa. (Kivivuori, s. 53)

Molybleeni (Mo)

Molybleeni parantaa iskusitkeyttä ja vähentää päästöauraustaipumusta. (Kivivuori, s. 53)

Boori (B)

Boori on erittäin tehokas karkenevuutta lisäävä seosaine. Sen tulee kuitenkin olla vapaana atomina teräsmatriisissa, jotta sillä on karkenevuutta lisäävä vaikutus. Boori ei pysy helposti vapaana atomina teräsmatriisissa, koska se reagoi helposti rautaan liunneen hapen ja typen kanssa, muodostaen booritrioksideja ja borideja. Teräkseen täytyykin lisätä seosaineita, jotka reagoivat booria herkemmin hapen ja typen kanssa. Tällaisia seosaineita ovat esimerkiksi alumiini ja titaani. Boori jakautuu helposti epätasaisesti rakenteeseen, jolloin paikoitellen teräksessä saattaa esiintyä alueita, joissa booripitoisuus on huomattavasti keskimääräistä seostusta suurempi. Liika boorin määrä teräksessä heikentää sen iskutietkeystuloksia huoneenlämmössä. (Kivivuori, s. 53)

Titaani (Ti)

Titaani on mikroseosaine ja se pienentää teräksen raekokoa, jolloin teräksen lujuus ja muodonmuutoslujuus kasvavat. Titaanilla on parantava vaikutus myös väsymiskestävyyteen, korroosionkestävyyteen ja syöpymiseen (Kivivuori, s. 54)

Niobi (Nb) ja Vanadiini (V)

Niobi ja vanadiini ovat mikroseosaineita, jotka pienentävät teräksen raekokoa. Parantaa lujuutta ja muodonmuutoslujuutta (Kivivuori, s. 54)

Kalsium (Ca)

Kalsium lisää teräksen työstettävyyttä. Kalsium-käsitelty teräs ei muodosta pitkää lastua koneistuksessa, joka lisää työstökoneiden terän kestoa. (Kivivuori, s. 54)

4.3 Haitta-aineet teräseoksissa

Teräs sisältää myös haitta-aineita, joita pyritään poistamaan mahdollisuuksien mukaan. Haitta-aineet huonontavat teräksen ominaisuuksia. Alla listattu yleisimmät haitta-aineet.

Fosfori (P)

Fosfori on tyypillinen haitta-aine, joka esiintyy teräksissä. Fosfori juontaa juurensa raaka-aineena käytetyistä malmeista ja romuista. Fosfori pyritään poistamaan teräksestä valmistuksen aikana, koska se heikentää teräksen iskutietkeyttä. (Sorsa, s. 34)

Typpi (N)

Typeä pidetään yleisesti haitta-aineena, koska se lisää teräksen vanhenemisherkkyyttä. Ferriittihilaan liunneet tyypiatomit haurastuttavat terästä vanhenemisen myötä. Typpi huonontaa teräksen hitsattavuutta. Typen määrä hitsattavassa teräksessä täytyykin olla alle 0,01 %. (Sorsa, s. 34)

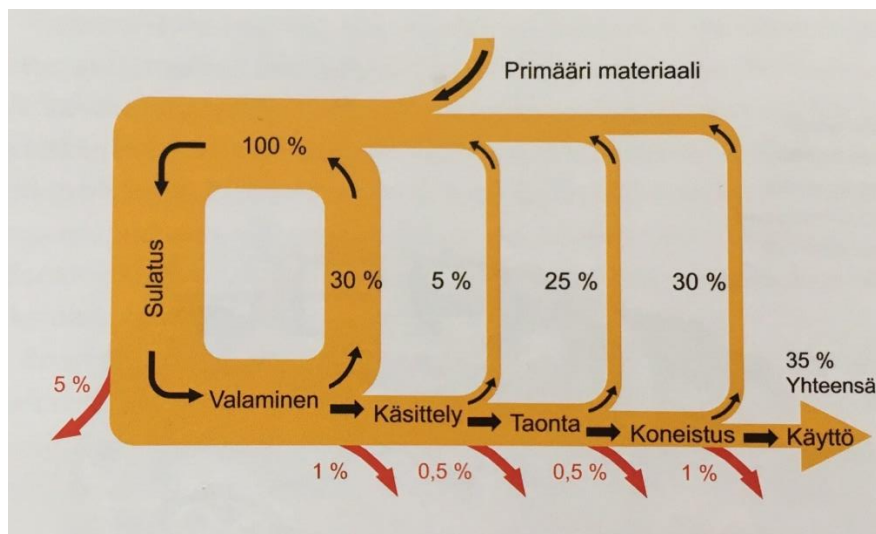
Rikki (S)

Rikki on haitta-aine, joka häiritsee teräksen hitsausta ja kuumamuokkausta, aiheuttaen teräksen repeilyä. Rikin enimmäispitoisuus on 0,05 %, mutta yleisesti jopa 0,01-0,03 %. Joissakin teräksissä rikin haurastuttavaa ominaisuutta käytetään myös hyväksi. Esimerkiksi automaattiteräksissä, joissa sulfidisulkeumat katkovat lastua koneistuksen aikana. Rikin haittavaikutuksia saadaan poistettua mangaanilla. (Sorsa, s. 34)

4.4 Teräksen käyttö materiaalina

Teräs on nykyisin yleisimmin käytetty raaka-aine tuotteiden valmistuksessa. Raakaterästä valmistettiin vuonna 2014 noin 1662 miljoonaa tonnia. Suurimmat teräksen tuottaja-alueet ovat Kiina (49,5 %), Eurooppa (10,2 %), Japani (6,7 %) ja USA (5,3%). Terästen ominaisuudet ovat kehittyneet viime vuosikymmeninä suuresti. Teräksen lujuutta saadaan kehitettyä koko ajan paremmaksi, jolloin saadaan tuotteiden painoa pienennettyä. Lujuuden parantuminen ja painon vähentyminen vaikuttavat esimerkiksi henkilöautoissa, turvallisuuden ja taloudellisuuden parantumiseen. (Kivivuori, ss. 30-34)

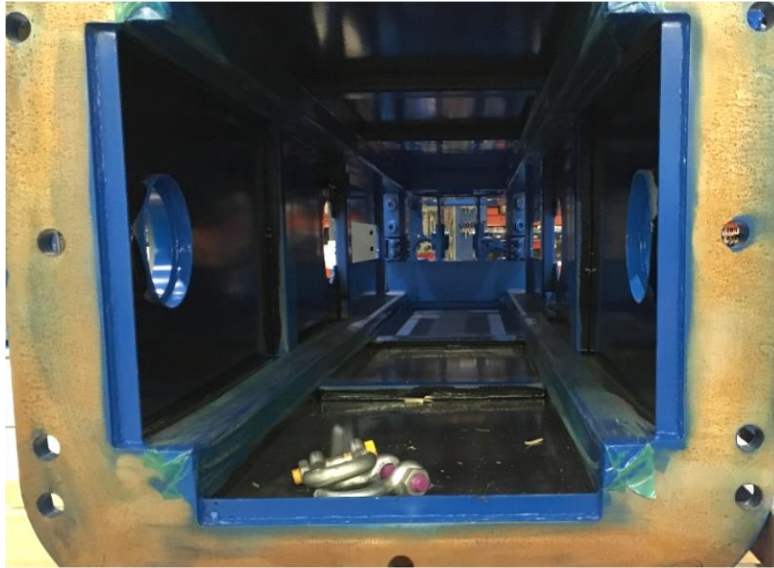
Teräksen hyviä puolia on myös sen kierrätysmahdollisuus. Teräksen kierrätys tapahtuu, joko romua keräämällä valmistusprosessin sisältä, tai käytöstä poistettujen tuotteiden muodossa. Prosessin sisäisestä kierrätyksestä puhuttaessa kierrätettävä materiaali on suhteellisen puhdasta ja kierrätys helppoa (Kuva 9). Ulkoinen kierrätys tarkoittaa käytöstä poistettujen laitteiden kierrätystä. On arvioitu, että noin 80 % kotitalouksien käytössä olevista terästuotteista palaa kuluttajilta kierrätyksen kautta terästehtaille. Ulkoinen kierrätys vaati prosessilta hieman enemmän työtä, kuin sisäinen kierrätys. Kerätyssä metalliromussa on paljon muitakin materiaaleja ja se täytyy murskata pieneksi silpuksi, jotta sen sisältämät materiaalit saadaan eroteltua toisistaan. (Kivivuori, ss. 35-37)



Kuva 9. Erään tuotteen kiertoromun määrä eri tuotantovaiheissa. (Kivivuori, 2016)

5 TYÖSSÄ TUTKITTAVAT MATERIAALIT

Tutkittavat materiaalit ovat lähtöisin neljästä eri rakenneputkesta, joiden tarkkoja valmistajatietoja ei ole saatavilla. Kaikki rakenneputket ovat neliskanttista putkea, joiden dimensiot vaihtelevat hieman. Rakenneputkia käytetään Junttan Oy:n valmistamissa paalutuskoneissa, esimerkiksi hydraulijärkäleen rungossa (Kuva 2). Hydraulijärkäleen rungon kulmissa sijaitsevat rakenneputket toimivat liikkuvan osan liukukiskoina (Kuva 10). Hydraulijärkäleen sisällä liikkuva osa (Kuva 11) liikkuu järkäleen sisällä ja aiheuttaa liukukiskoina toimiviin rakenneputkiin hankaavaa kulutusta.



Kuva 10. Hydraulijärkäleen kulmissa olevat rakenneputket, jotka toimivat liikkuvan osan liukukiskoina. (Koponen, 2019)



Kuva 11. Hydraulijärkäleessä olevan liikkuvan osan kulman liukuosa. (Koponen, 2019)

Tutkittavat materiaalit nimettiin taulukon 1 mukaan. Jatkossa materiaaleista puhutaan, joko materiaali- tai näyte (A, B, C tai D)

Taulukko 1. Rakenneputkien nimeäminen.

Näyte	Valmistustapa	Kuvaus	Koko (mm)
A	Kuuvavedetty	Paksu pintaruosteinen	150x150x15
B	Kuuvavedetty	Leikattu pillillä U-palkiksi	80x80x7
C	Kylmämuokattu ja hitsattu	Siniseksi maalattu	100x100x8
D	Kylmämuokattu ja hitsattu	Uusi	100x100x8

Näytemateriaalit ovat nimetty niin, että vanhin materiaali on A ja uusin materiaali D. Materiaalien käyttöajankohdat on 1990-luvulta tähän päivään. Jotkut materiaaleista oli otettu käytetyistä koneista, jonka takia niissä oli ruostetta ja maalia. Tämä ei kuitenkaan haitannut tutkimuksia, koska kaikki näytteet otettiin putkista joko sahaamalla tai koneistamalla (Kuva 12).



Kuva 12. Näytemateriaaleja vasemmalta alkaen A, B, C ja D. (Koponen, 2019)

6 TUTKIMUSMENETELMÄT JA VALMISTELU

Materiaaleista oli tarkoitus saada selville mahdollisimman paljon tietoa. Tästä syystä näytteille jouduttiin tekemään monenlaisia eri testejä ja tutkimuksia. Testeillä ja tutkimuksilla pyrittiin löytämään materiaalien väliltä eroja.

Tutkimusmenetelmiä, joita materiaaleille tehtiin, oli vetokoe, iskukoe, mikroskooppitutkimus, jolla tutkittiin kiderakennetta, kovuusmittaus ja alkuainetutkimus. Näillä kokeilla saatiin paljon tietoa materiaalien fysikaalisista ja kemiallisista ominaisuuksista.

Ennen tutkimuksia, täytyi eri tutkimusmenetelmien standardeihin tutustua tarkasti. Standardoinut tutkimukset pitää suorittaa standardissa kerrottujen ohjeiden mukaisesti. Näin saadut tulokset ovat vertailukelpoisia muiden vastaavien tutkimusten kanssa. Standardeissa on myös kerrottu tarkasti eri tutkimuksissa käytettävien näytteiden valmistuksesta. Kaikkien tutkimusten näytteet pyrittiin valmistamaan tarkasti standardeissa olevien ohjeiden mukaan. Osa näytteistä valmistettiin Savonia-ammattikorkeakoulun laboratoriossa ja osa Savon ammattiopistolla (SAKKY) Varkaudessa.

6.1 Vetokoe

Vetokoe on määritelty standardissa SFS-EN ISO 6892, jonka mukaan koe tulee suorittaa.

Vetokoe on materiaalien lujuuden määrittämiseen käytettävä koemenetelmä. Sitä käytetään materiaalien tutkimuksissa ja laadunvalvonnassa. Vetokokeessa määrätyn muotoinen vetosauva vedetään poikki. Vedettäessä tietokone mittaa venymää ja normaalivoimaa. Mittaustuloksena saadaan jännitys-venymäkuvaaja. Kuvaajan avulla saadaan määritettyä mm. materiaalin kimmokerroin, myötö- ja murtolujuus sekä murtovenymä. (Wikipedia)

Tärkeimmät vetokokeen tulokset ovat myötölujuus, murtolujuus ja venymä.

Myötölujuus

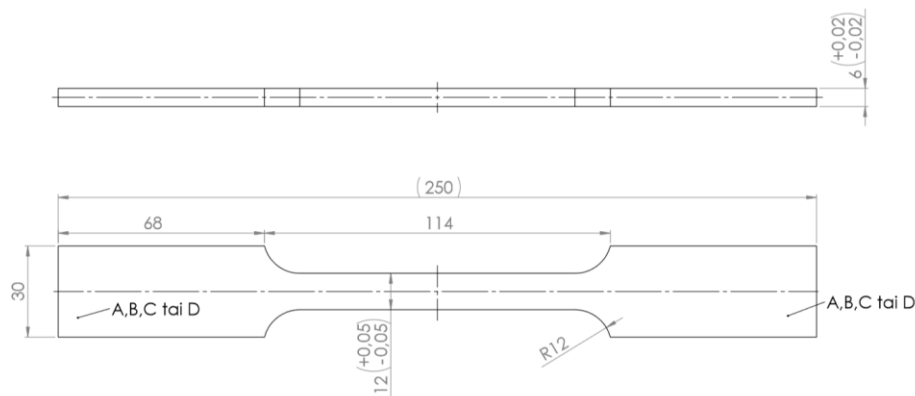
Materiaalin myötölujuus (R_e) tarkoittaa jännitystä, jossa vetokokeen aikana vetosauvassa rupeaa esiintymää merkittävää plastista (palautumatonta) muodonmuutosta. Myötölujuus on tärkein vetokokeella määriteltävistä lujuusominaisuuksista, koska sitä käytetään yleensä perustana, kun määritellään teräkselle laskentalujuuksia. Myötölujuus on rajajännitys, jolla myötämisen oletetaan alkavan. Jos kappaletta venytetään, mutta pysytään jännityksessä alle myötörajan, kappale palautuu alkuperäisiin mittoihinsa. Jännityksen ylittäessä myötörajan tapahtuu kappaleessa pysyvä muodonmuutos. (Sorsa, 2015, s. 53)

Murtolujuus

Materiaalin murtolujuus (R_m) tarkoittaa jännitystä, jonka ylittyessä materiaali murtuu. Murtolujuutta on aikaisemmin käytetty lähes yksinomaan perusteena, kun on luokiteltu teräksiä lujuutensa mukaan. Murtolujuuden ilmoittaminen myötölujuuden lisäksi onkin aiheellista. (Sorsa, s. 54)

6.1.1 Valmistelu

Vetokokeen vetosauvoissa on standardissa jonkin verran vapauksia, mutta esimerkiksi sauvan testipituus täytyy olla riittävän pitkä, jotta venymä saadaan selkeästi mitattua. Sauvan täytyy olla sellainen, ettei siinä ole selkeitä epäjatkuvuuskohtia, joista sauva murtuisi. Vetosauvat valmistettiin tehtyjen piirustusten (Kuva 13) mukaan SAKKY:lla Varkaudessa. Koska osa materiaaleista, joista vetosauvoja tehtiin, olivat polttoleikattuja ja hankalan muotoisia, oli sauvojen kiinnittäminen koneistuksen aikana hankalaa. Tästä syystä kaikista materiaaleista ei saatu kymmentä sauvaa, niin kuin tarkoitus oli. Näytteestä B saatiin kuusi sauvaa ja näytteestä A kahdeksan sauvaa. Koneistuksen jälkeen vetosauvat merkattiin meistaamalla niiden päihin materiaalitunnus ja numerot 1-10. Vetosauvojen mittaviivojen piirtämistä varten tehtiin 3D-tulostamalla jigi, jolla saatiin mittaviivat kaikkiin sauvoihin helposti ja tarkasti oikeaan paikkaan (Kuva 14).



Kuva 13. Vetosauvan piirustus. (Koponen, 2019)

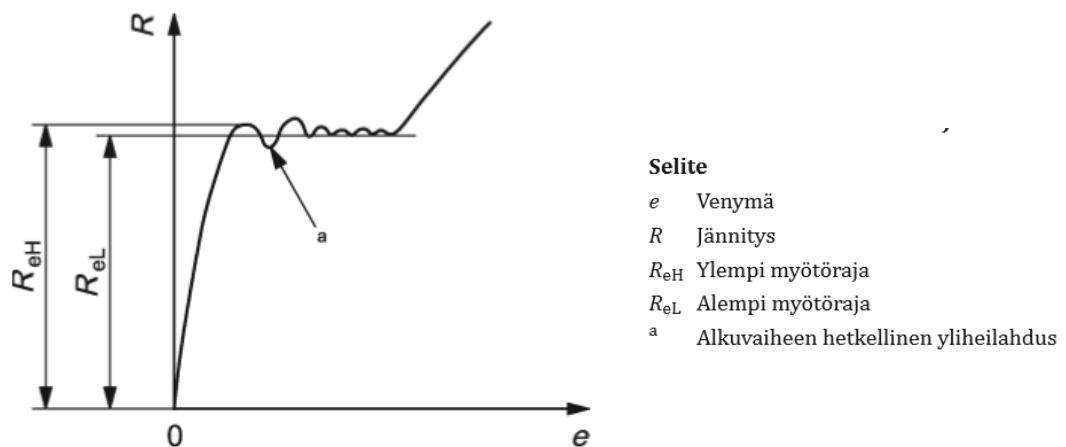


Kuva 14. Jigi mittaviivojen piirtämiseen. (Koponen, 2019)

6.1.2 Mittaus

Vetokoe tehtiin Savonia-ammattikorkeakoulun materiaalitekniikan laboratoriossa olevalla 100 kN:n vetokoneella. Projekti-insinööri Arvo Tiilikaisen johdolla käytiin läpi vetolaitteen käyttö ja vetokokeen tekeminen. Testivedon jälkeen todettiin, että vetosauvoin pitää tehdä pieni hitsi päihin, jotta ne saadaan pysymään lipsumatta kiinni vetolaitteen leuoissa. Hitsauksen jälkeen vetosauvat pysyivät hyvin paikallaan ja vetokokeet päästiin aloittamaan.

Vetokokeen tekemisessä tietokoneelle syötettiin vetosauvan mitat ja siinä olevien mittaviivojen etäisyydet. Vetokone teki vetokokeen automaattisesti, vetonopeuden ollessa 0,2 mm/s. Vetosauvan katkeamisen jälkeen vetosauvassa olevista mittaviivoista otettiin mitta ja syötettiin se tietokoneelle. Tietokoneen piirtämään venymäkuvaajaan merkattiin ylemmän- ja alemman myötörajan paikat standardin ohjeen mukaisesti (Kuva 15). Annettujen tietojen perusteella tietokone laski vetosauvan venymäprosentin ja ylemmän- ja alemman myötörajan ja lisäsi ne mittauspöytäkirjaan.



Kuva 15. Ylemmän ja alemman myötörajan määrittäminen venymäkuvaajasta. (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 2016)

6.1.3 Tulokset

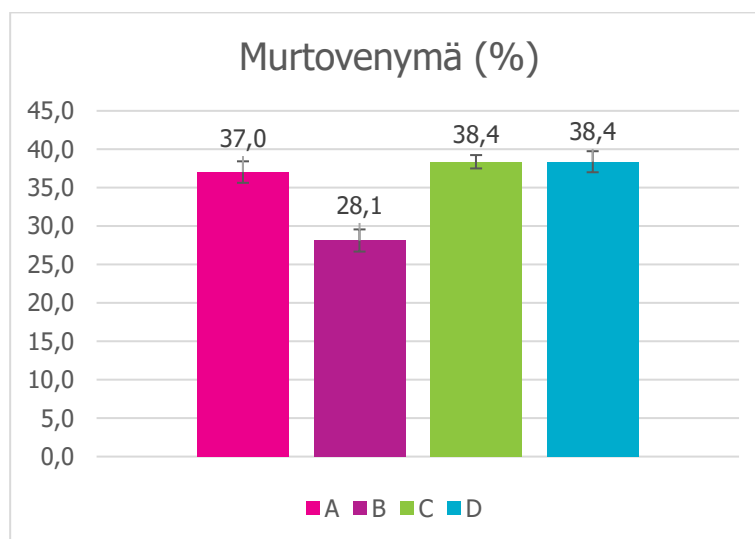
Vetokokeen tuloksena saatiin jokaisesta vetosauvasta oma mittauspöytäkirja (Liite 1), jossa on näkyvissä tarvittavat tiedot, mittaustulokset ja venymäkuvaaja. Vetosauvojen suuren määrän vuoksi, mittaustulokset vertailtiin Excel-taulukoiden avulla. Vertailuun otettiin mukaan murtovenymä sekä myötö- ja murtolujuus. Murtovenymäprosentti A laskettiin kaavalla:

$$\frac{L_u - L_o}{L_o} * 100 = A,$$

jossa L_u on loppumittapituus ja L_o on alkumittapituus.

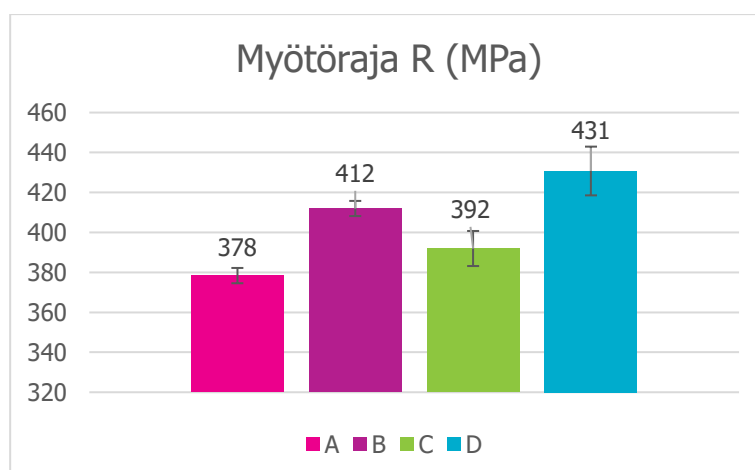
Venymässä näytteillä A, C ja D ei ollut juurikaan eroa, mutta näyte B:n venymä oli noin 10 prosenttia pienempi kuin muiden (Kuvaaja 1).

Kuvaaja 1. Murtovenymän prosenttimäärä.



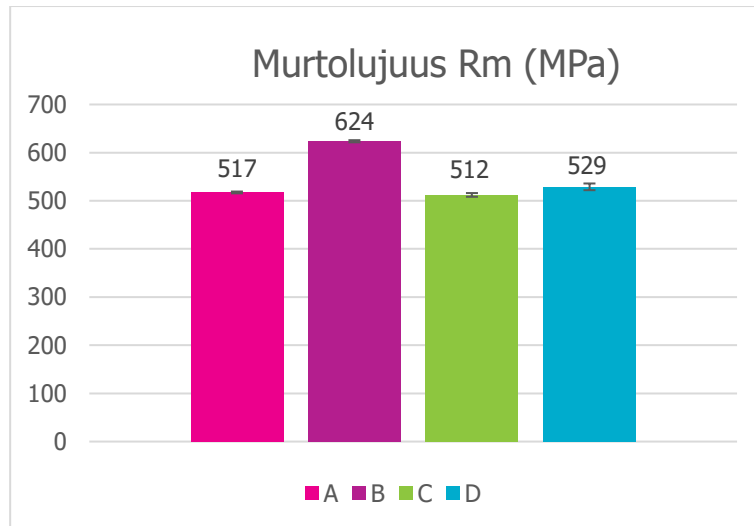
Materiaalien myötöraja vaihteli melko paljon, keskiarvon ollessa 378- 431 MPa:n välissä (Kuvaaja 2). Näytteiden C ja D kohdalla myötörajan keskihajonta oli myös melko suurta. Tämä johtui osittain siitä, että jokaisella sauvalla venymäkuvaajassa ollut selkeästi nähtävissä teräksen myötöaluetta, eikä ylemmää- ja alemmää myötörajaa. Tällöin ylemmän- ja alemman myötörajan paikan merkkäminen kuvaajaan oli paljon kiinni mittaaajan tekemästä tulkinnasta.

Kuvaaja 2. Myötörajavertailu.



Murtolujuuden kohdalla materiaaleista löytyi jo melko suuri ja selkeä ero. Myös tulosten keskihajonta oli todella pientä, jonka seurauksena tuloksia voidaan pitää tarkkoina. Materiaalien A, C ja D kohdalla murtolujuudessa oli vain pientä eroa, mutta materiaali B oli murtolujuudeltaan noin 18 % lujempaa, kuin seuraavaksi lujin näyte D (Kuvaaja 3).

Kuvaaja 3. Murtolujuusvertailu.



Vetokoetta tehdessä materiaalin lujuudesta voi tehdä myös aistinvaraisia huomioita, jotka ei tietenkään ole muihin tutkimuksiin vertailukelpoisia. Näissä vetokokeissa materiaali B:n kohdalla huomasi selkeästi, ettei vetosauvoihin tullut niin suurta kuroumaa, kuin muihin materiaaleihin. Myös vetosauvan katketessa kuuluva ääni oli selkeästi kovempi kuin muiden sauvojen kohdalla.

Materiaalin B vetosauvojen katkeamiskohta erosi muista materiaaleista, katkeamisjäljen ollessa paljon rosoisempi. (Kuva 16).

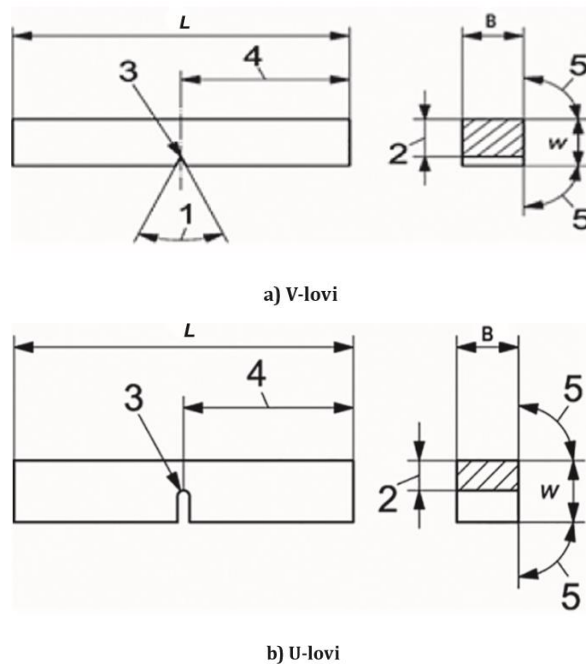


Kuva 16. Vetosauvojen katkeamiskohta, näytteet vasemmalta A, B, C ja D. (Koponen, 2019)

6.2 iskukoe

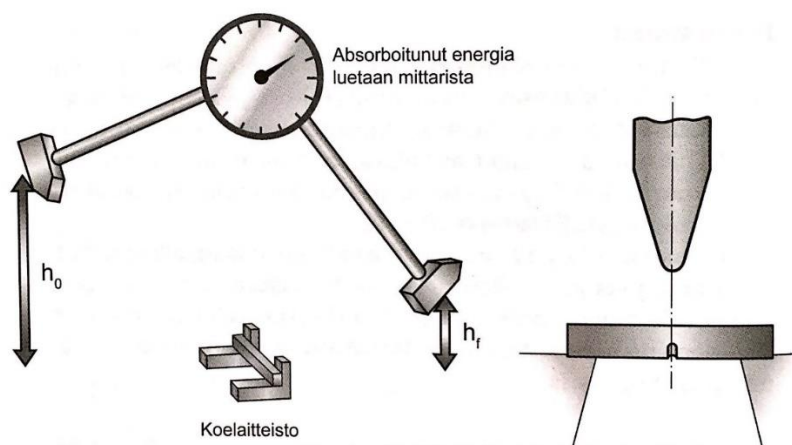
Iskukoe tunnetaan paremmin Charby-iskukokeen nimellä. Kokeella määritellään metallin sitkeyttä eri lämpötiloissa. Koetyyppi nimetään koesauvan loven pohjan muodon mukaan, joko Charby V-koe, tai Charby U-koe (Kuva 17). (Sorsa, ss. 55-56)

Vakiokoesauva on 10 mm x 10 mm x 55 mm (B x W x L), jonka keskelle on tehty joko V-lovi, tai U-lovi. Erikoistapauksissa sauvan paksuus (B) voi olla myös, joko 7,5 mm, 5 mm tai 2,5 mm. (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, s. 15)



Kuva 17. Charpy-iskukokeen iskuvauvat. (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, s. 14)

Charpy-iskukoe on periaatteeltaan yksinkertainen. Koe tehdään murtamalla lovettu koesauva iskuheilurilla yhdellä iskulla. Heilurilla on lähtötilanteessa tietty potentiaalienergia (h_0), joka tiedetään. Kun iskuheiluri päästetään irti, muuttuu potentiaalienergia liike-energiaksi ja iskuheilurin osuessa koesauvaan osa sen liike-energiasta absorboituu kappaleeseen. Jäljelle jäävä liike-energia muuttuu heilurin pysähtyessä potentiaalienergiaksi (h_r). Potentiaalienergioiden erotuksesta saadaan selville iskusauvaan absorboituneen energian määrä (Kuva 18). (Sorsa, ss. 55-56)



Kuva 18. Iskuheilurin periaatekuva (Sorsa, 2015)

6.2.1 Valmistelu

Iskukokeeseen koesauvan mitat on määritelty standardissa erittäin tarkasti. Ainoastaan paksuudelle on neljä eri vaihtoehtoa. Koska testattavat materiaalit olivat erikokoisia rakenneputkia, piti iskusauvan paksuus määrittää ohuimman putken mukaan. Ohuin putkista oli 7 mm paksua, joten iskusauvoista piti tehdä 5 mm paksuja. Iskusauvat valmistettiin SAKKY:lla Valmistuksessa oli melko paljon aikataullisia haasteita. Kiireen takia iskusauvoista ei ollut poistettu teräviä särmiä. Särmit poistettiin itse, viilaa ja hiomapaperia käyttäen. Sauvojen teossa oli myös sattunut virhe materiaalien merkkauksen kohdalla. Stanssattu kirjain oli joihinkin sauvoihin lyöty keskelle sauvaa (Kuva 19). Standardin mukaan, jos murtuminen tapahtuu niin, että se on jotenkin kosketuksissa sauvan merkkaukseen, sauva pitää hylätä tuloksista. Tämä täytyi ottaa mittauksissa huomioon.

Iskusauvoissa olevaa V-lovea varten täytyy olla erikoistyökalu. Tällainen työkalu on Savonian koneistamossa, joten iskusauvojen viimeistely tehtiin siellä. Iskusauvat merkattiin meistaamalla niihin materiaalitunnus ja numerot 1-12.



Kuva 19. Virheellisiä sauvan merkkauksia. (Koponen, 2019)

6.2.2 Mittaus

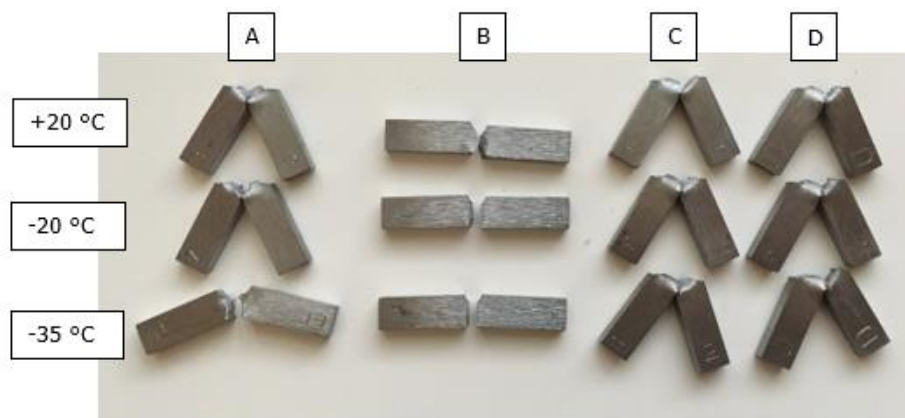
Mittaukset tehtiin Savonia-ammattikorkeakoulun materiaalitekniikan laboratoriossa olevalla iskutestilaitteella. Materiaaleista haluttiin saada tietoa myös niiden kylmän kestosta, joten iskukoe suoritettiin kolmessa eri lämpötilassa. Huoneenlämmössä, noin -20 °C:ssa ja noin -35 °C:ssa. Tämän takia osa näytteistä piti jäähdyttää pakastimessa. Jäähdytettyjen sauvojen tarkkaa lämpötilaa ei voi sanoa, koska pakastimen lämpötila vaihteli muutamalla asteella kokeen aikana ja sauvat kerkesivät myös lämmetä mittauslaitteeseen siirron aikana, vaikka siirto suoritettiin standardin vaatimassa viidessä sekunnissa. Kaikkia kappaleita käsiteltiin kuitenkin samalla tavalla, joten tulokset ovat vertailukelpoisia. Jokaisessa lämpötilassa tehtiin neljä iskukoea kullekin materiaalille.

6.2.3 Tulokset

Tuloksissa on tärkeä huomata, että kaikkia Charby-iskukoetuloksia ei voi suoraan verrata toisiinsa. Koe voidaan tehdä esimerkiksi heiluriin kiinnitettävän iskurin erilaisilla pyöristyssäteillä, tai erilaisilla koesauvan mitoilla. (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry)

Tässä työssä saadut tulokset ovat kuitenkin suoraan vertailukelpoisia toisiinsa. Tuloksista otettiin vertailuun hyväksytyjen mittausten keskiarvo. Joidenkin iskusauvojen kohdalla tulos täytyi hylätä, koska katkeaminen oli tapahtunut iskusauvan virheellisen materiaalimerkkaamisen kohdalta.

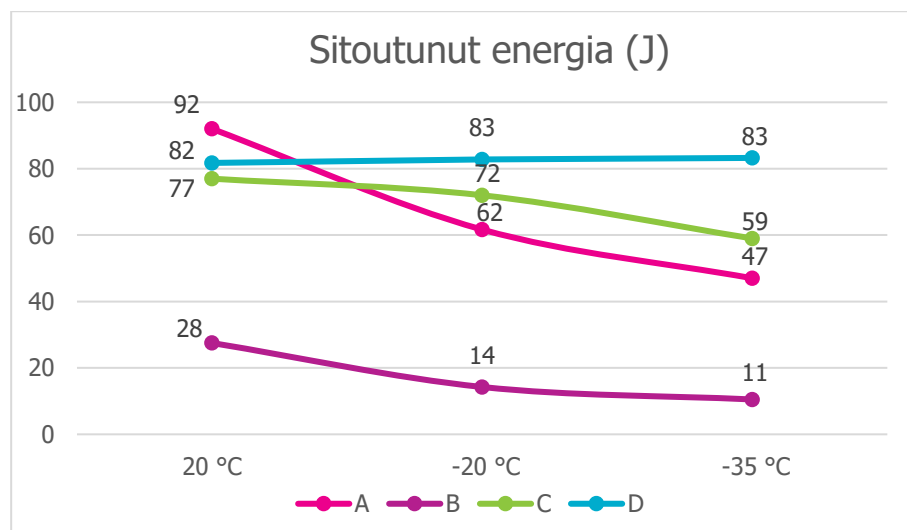
Materiaali B oli ainoa, joka katkesi täydellisesti kaikissa lämpötiloissa. Materiaali A katkesi täydellisesti kylmimmässä testauslämpötilassa. Kaikki muut iskusauvat murtuivat vain osittain (Kuva 20).



Kuva 20. Sauvojen murtuminen eri mittauslämpötiloissa. (Koponen, 2019)

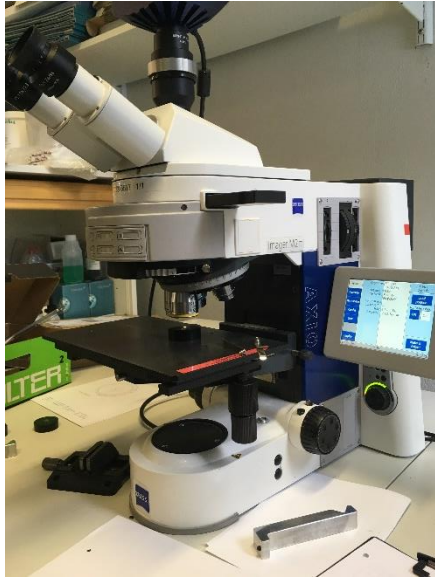
Tuloksissa materiaaleista löytyi suuria eroja. Kuvaajasta (Kuvaaja 4) katsoessa huomaa, että huoneenlämmössä tehdyssä testissä, materiaali B:n tulos oli selvästi joukon pienin ja A: suurin. Materiaali A:n tulos laski kuitenkin eniten, kun mittauksia tehtiin kylmässä. Materiaali D:n mittaustulos ei muuttunut käytännössä ollenkaan missään mitatussa lämpötilassa.

Kuvaaja 4. Materiaaleihin eri lämpötiloissa sitoutunut energia.



Mikroskooppitutkimus

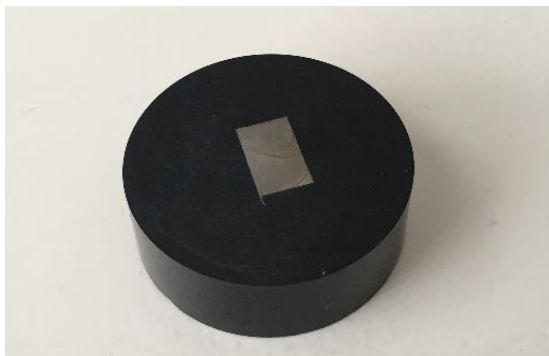
Mikroskooppitutkimuksella selvitetään teräksen kiderakennetta. Tutkimukset tehdään Savonian Zeiss imager M2m metallimikroskoopilla (Kuva 21), jolla saadaan kiderakenne näkyviin. Metallimikroskoopissa kohteen valaisu tulee objektiivin läpi, toisin kuin normaaleissa mikroskoopeissa, näin se soveltuu hyvin valoa läpäisemättömien materiaalien tutkimiseen.



Kuva 21. Zeiss imager M2m mikroskooppi. (Koponen, 2019)

6.2.4 valmistelu

Mikroskooppitutkimuksia varten täytyi tutkittavista kappaleista tehdä hie (Kuva 22). Hien valmistuksessa tutkittavasta materiaalista otetaan pala, joka valetaan muovin sisälle. Hiettä hiotaan asteittain ja sen pinta kiillotetaan peilimäiseksi. Lopuksi hieen pinta syövytetään hapossa, jotta materiaalin mikrorakenne tulee paremmin esille. Hieet tehtiin Savonian materiaalitekniikan laboratoriossa. Kaikki näytteet asennettiin hieisiin samoin päin, jotta mikrorakenne näkyisi kaikissa vertailukelpoisena.



Kuva 22. Hie mikroskooppitutkimukseen ja kovuuskokeeseen. (Koponen, 2019)

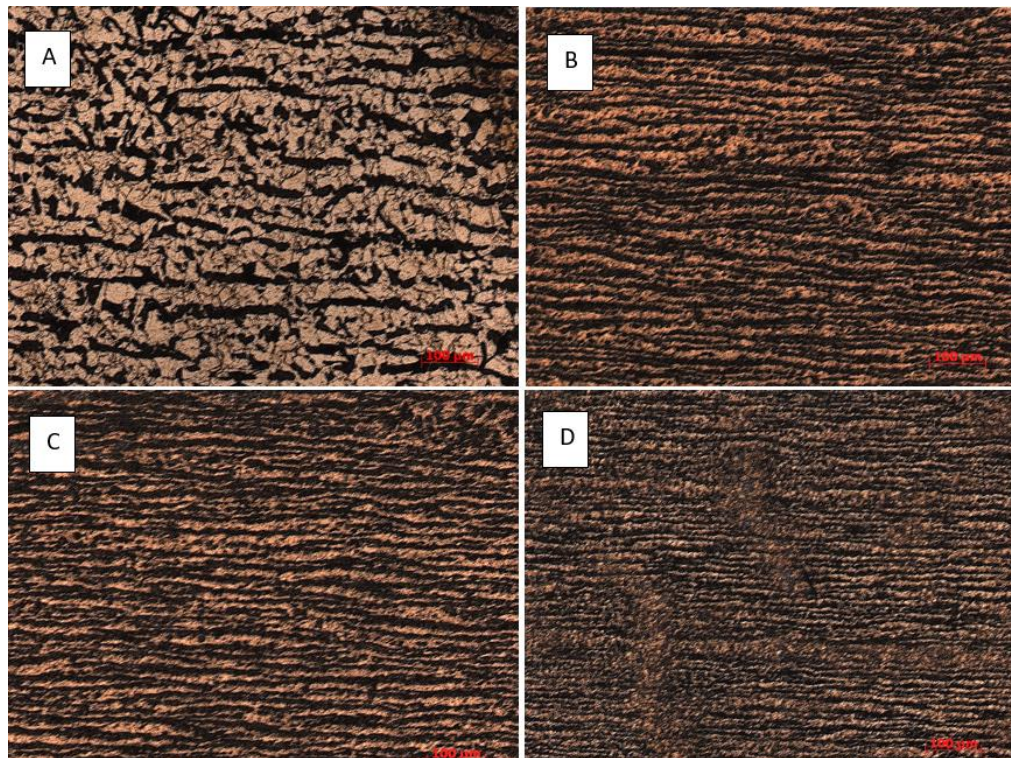
6.2.5 Mittaus

Mikroskooppitutkimukset tehtiin Savonia-ammattikorkeakoulun materiaalitekniikan laboratoriossa, jossa näytteitä katsottiin Zeiss imager M2m metallimikroskoopilla. Jokaisesta näytteestä otettiin useita kuvia kolmella eri suurennoksella, jotka analysoitiin myöhemmin.

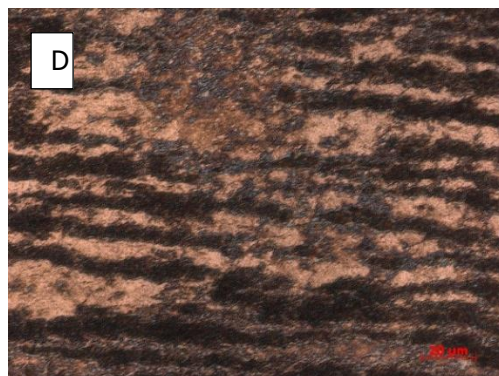
6.2.6 Tulokset

Mikroskoopilla otetut kuvat käytiin tarkasti läpi ja etsittiin niistä eroavaisuuksia. pienimmällä suurennoksella otetuista kuvista näkyi materiaaleissa eroa raekoossa, joka oli näytteessä A selkeästi suurempi kuin muissa. Tämä olikin odotettavissa, koska A-näyte oli materiaalivahvuudeltaan selkeästi muita paksumpaa. Terästä valmistettaessa paksumpi materiaali jäähtyy hitaammin, jolloin kiderakenne kerkeää kasvamaan suuremmaksi.

Näytteessä B ja C, ei näyttänyt olevan suurtakaan eroa, mutta näytteessä D näkyi materiaalin sisällä pysty- ja vaakasuuntaisia alueita, joilla kiderakenne poikkesi muusta alueesta (Kuva 23 ja Kuva 24).



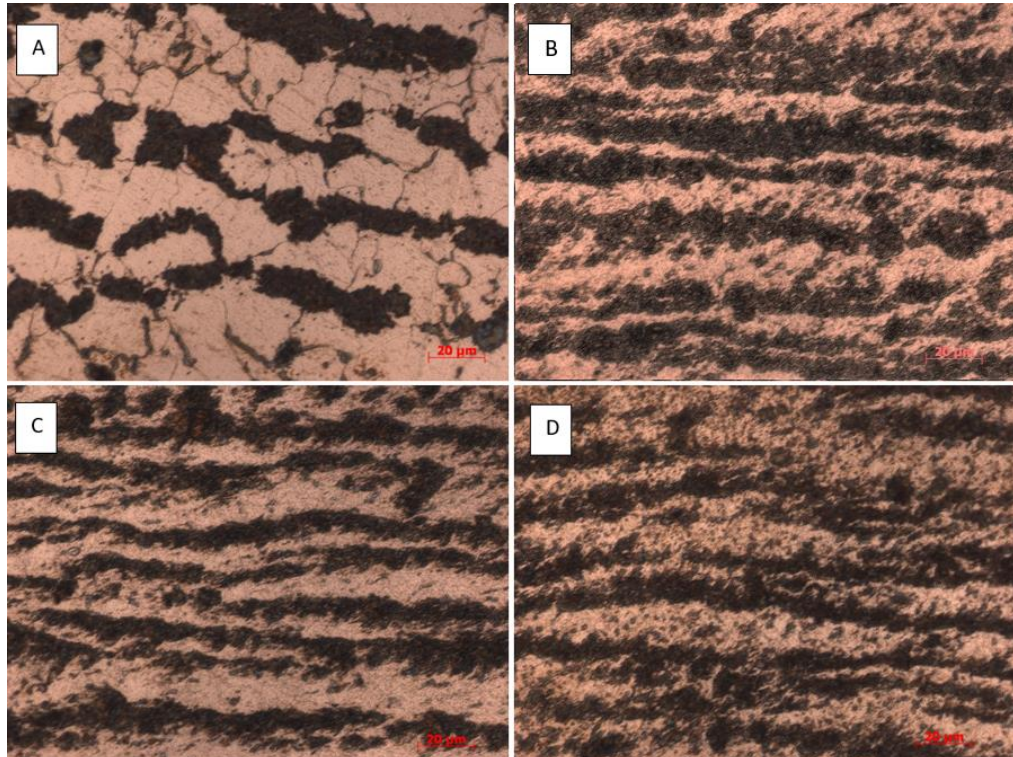
Kuva 23. Mikroskooppikuva pienimmällä suurennoksella näytteiden kiderakenteesta. (Koponen, 2019)



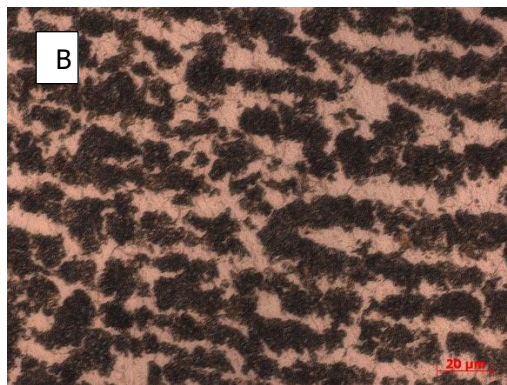
Kuva 24. Näytteen D poikkeava kiderakenne tarkemmassa kuvassa. (Koponen, 2019)

Näytteen D poikkeavalle kiderakenteelle ei löytynyt kunnollista selitystä. Otettujen kuvien perusteella poikkeavuuksia ei ollut näytteen koko alueella, jolloin kyseessä on voinut olla jokin virhe näytteen valmistuksessa. Asian varmistamiseksi hieille pitäisi tehdä uusi kiillotus ja syövytys ja tutkia uudestaan.

Suuremmalla suurennoksellaakaan kappaleiden keskeltä ei löytynyt kovin suuria eroja, lukuun ottamatta näytettä A (Kuva 25). Näytteessä B kiderakenne ei ollut aivan yhtä tasalaatuista, vaan siellä on välillä alueita, joissa kiderakenne ei ollut materiaalissa niin tasaisina juovina (Kuva 26). Tällainen kiderakenne voi listätä kappaleen kulumiskestävyyttä.

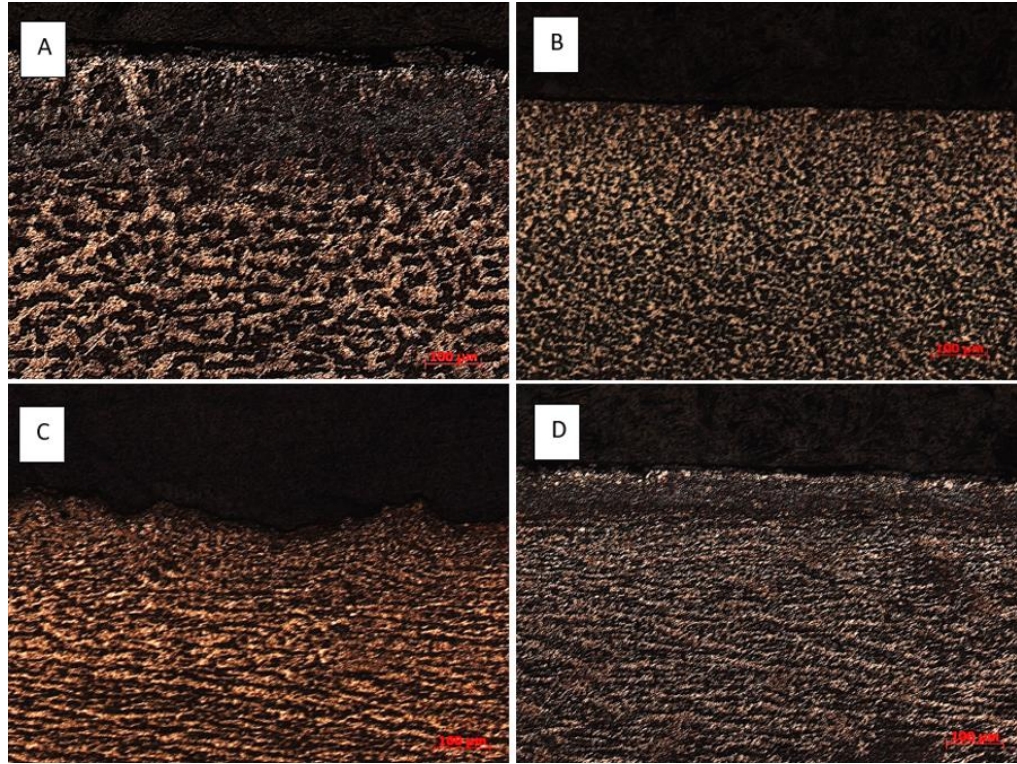


Kuva 25. Mikroskooppikuva suurimmalla suurennoksella näytteiden kiderakenteesta. (Koponen, 2019)



Kuva 26. Näytteen B kiderakenteen juovaton kohta (suurennos sama kuin kuvassa 22). (Koponen, 2019)

Suurin ero mikroskooppikuvista löytyi näytteiden pinnalta (Kuva 27). Jokaisessa näytteessä pinnan lähellä oleva kiderakenne poikkesi kokonsa puolesta syvemmällä olevasta kiderakenteesta. Kiderakenne oli pienempää lähellä pintaa. Kerroksen paksuus, jossa kiderakenne oli pienempää, vaihteli paljon eri näytteiden välillä. Esimerkiksi näytteen D pintakerros oli vain noin 150 μm , kun taas näytteessä B se oli ainakin 450 μm . Pienempi kiderakenne kestää paremmin kulutusta.



Kuva 27. Mikroskooppikuva kappaleiden pinnalta. (Koponen, 2019)

6.3 Kovuuskoe

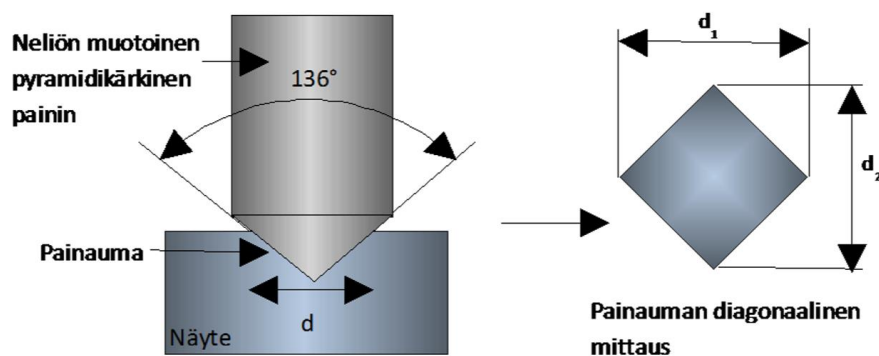
”Vickersin kovuuskoe kehitettiin vuonna 1924, kun Smith ja Sandland Vickers Ltd:llä halusivat Brinellin kovuuskokeelle vaihtoehtoisen menetelmän materiaalin kovuuden mittaamiseen. Vickersin menetelmä on usein helpompi käyttää kuin muut kovuuden mittaustavat, sillä siinä vaaditut laskentamenetelmät ovat riippumattomia painimen koosta ja toisaalta samaa paininta voidaan käyttää kaikille materiaaleille kovuudesta riippumatta.” (FINFOCUS INSTRUMENT OY)

Periaate, kuten kaikissa kovuusmittausmenetelmissä, on tutkia tarkkailtavan materiaalin kykyä vastustaa plastista muodonmuutosta. Vickersin kovuuskoemenetelmää voidaan käyttää esimerkiksi kaikille metalleille ja sillä on kaikista mittausmenetelmistä laajin kovuusalue. Kovuuden yksikkö tunnetaan Vickersin kovuutena (HV). (FINFOCUS INSTRUMENT OY)

Vickersin kovuuskokeessa mittaus suoritetaan laitteella, jossa neliöpohjainen timanttipyramidi, jonka vastakkaisten sivujen kulma on 136° , painetaan koetinvoimalla F kappaleen pintaan. Koetinvoima pidetään normaalisti 10-15 s, jonka jälkeen koetinvoima poistetaan ja mitataan kappaleen pintaan jääneen neliön d_1 ja d_2 mitat (Kuva 28). Koetusvoima määritetään mitattavasta materiaalista riippuen siten, että painuman lävistäjä on 0,02-1,4 mm. Mikäli painuman lävistäjän koko jää alle 0,2 mm, niin mittaustarkkuus pienenee. Vickersin kovuuden arvo ilmoitetaan xxxHVyy/zz, kuten esimerkiksi 350HV10/20, joista:

- 350 on kovuuden arvo,
- HV on Vickersin kovuuden tunnus
- 10 on koevoiman likimääräinen suuruus kilogrammoina (kgf), missä $10 \text{ kgf} = 98,1 \text{ N}$
- 20 on kuormitus aika. Ilmoitetaan vain silloin kun se poikkeaa määritellystä ajasta (10-15s).

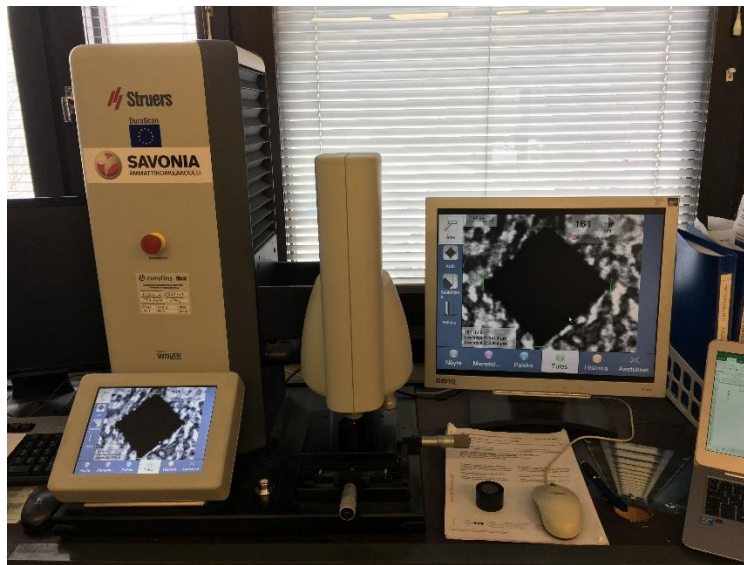
(FINFOCUS INSTRUMENT OY, ei pvm)



Kuva 28. Vickersin kovuuskokeen periaate. (FINFOCUS INSTRUMENT OY)

Koska Vickersin kovuuskokeessa koealue on hyvin pieni, on tärkeää, että koekappale on oikeanlainen. Kappaleen pinta täytyy olla riittävän sileä, jotta pinnankarheudet eivät vaikuta koetulokseen. Kappaleen pinta täytyy olla myös puhdas oksidihilseestä ja vieraista aineista, erityisesti voiteluaineista. Koekappaleen paksuuden tulee olla vähintään 1,5 kertaa paksumpi, kuin painuman lävistäjä, eikä kappaleen vastakkaisella pinnalla saa näkyä muodonmuutosta kokeen suorittamisen jälkeen. Yleensä koe suoritetaan 10- 35 °C:n lämpötilassa. (FINFOCUS INSTRUMENT OY)

Kovuuskoe suoritetaan standardin SFS-EN ISO 6507 mukaan ja se tehdään Savonian materiaalitekniikan laboratoriossa nykyaikaisella Stuers merkkisellä vickers-kovuusmittauslaitteella (Kuva 29).



Kuva 29. Vickers-kovuusmittauslaite. (Koponen, 2019)

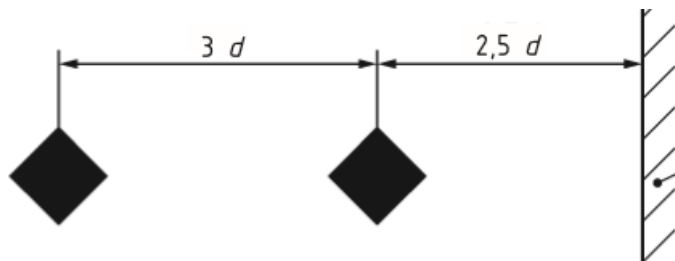
6.3.1 Valmistelu

Kovuuskokeessa on tärkeää, että kappaleen pinta on riittävän tasainen, siihen ei ole tullut työstössä muokkauslujittumista, eikä sen pinnassa ole rasvaa. Tästä syystä mikroskooppitutkimusta varten tehdyt hieet soveltuivat kovuuskokeeseen erinomaisesti, eikä erillisiä koekappaleita tarvinnut valmistaa.

6.3.2 Mittaus

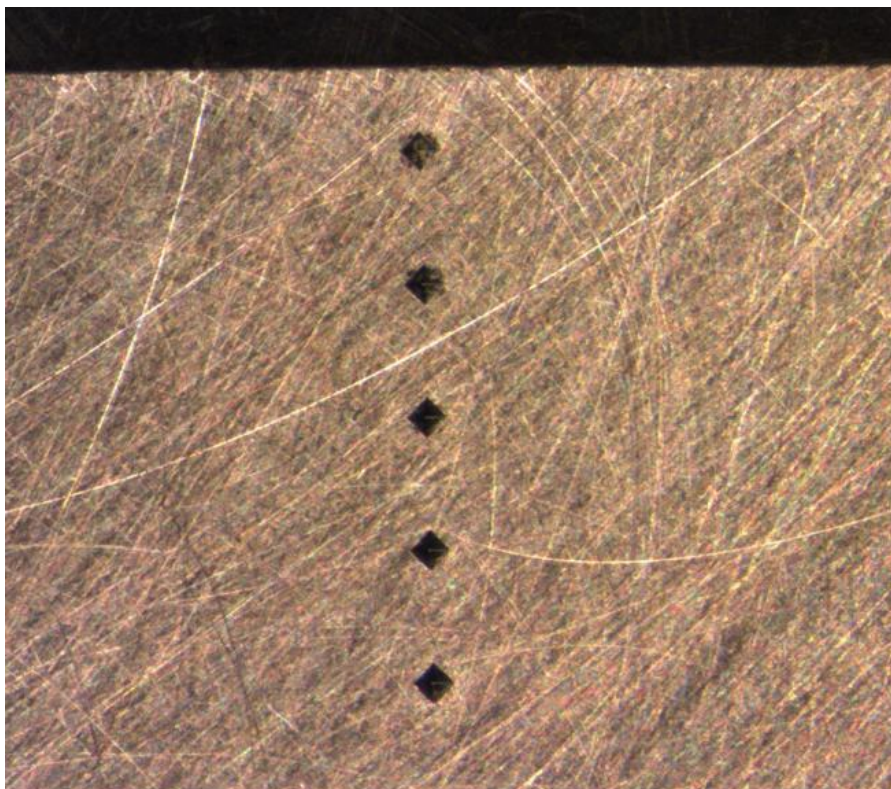
Taulukoiden mukaan testattavan S355 teräksen kovuus pitäisi olla noin 160 HV10. Kokeilumittaus osoitti, ettei HV 10 mittausta ollut mahdollista käyttää, koska mittausjäljestä tuli liian suuri, eikä sitä saanut mitattua. Wickers-kovuusmittauksen hyvä puoli on kuitenkin se, että eri mittausvoimalla tehdyt mittaukset ovat vertailukelpoisia keskenään. Kovuusmittaukset tehtiin HV 5:ä, jolloin mittausjäljestä tuli sopivan kokoinen. Koska mittauksen sai tehdä hieille, oli sen tekeminen nopeaa ja helppoa. Kappaleen sai pysymään hyvin paikallaan ja oikeassa asennossa.

Mittaus suoritettiin viidestä eri mittauskohdasta niin, että ensimmäinen mittauspiste oli lähellä pintaa ja seuraavat pinnasta kohtisuoraan keskustaa päin.



Kuva 30. Standardoidut mittauspisteiden minimietäisyydet kappaleen pinnasta ja toisesta mittauspisteestä. (d = mittausjäljen lävistäjä) (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 2016)

Mittausjäljen lävistäjä oli noin 0,23 mm, joten kaikkien kappaleiden mittaus suoritettiin niin, että ensimmäinen mittauspiste oli 0,6 mm kappaleen reunasta ja seuraavien pisteiden väli oli 0,75 mm. Tällä saatiin kaikista näytteistä mitattua kovuus täsmälleen samoilta syvyyksiltä (Kuva 31).

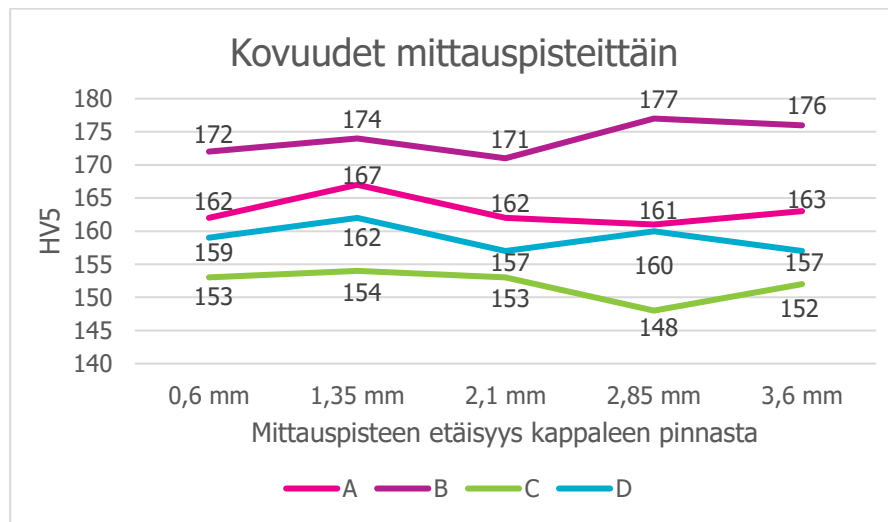


Kuva 31. Mittausjäljet näytteen pinnalla. (Koponen, 2019)

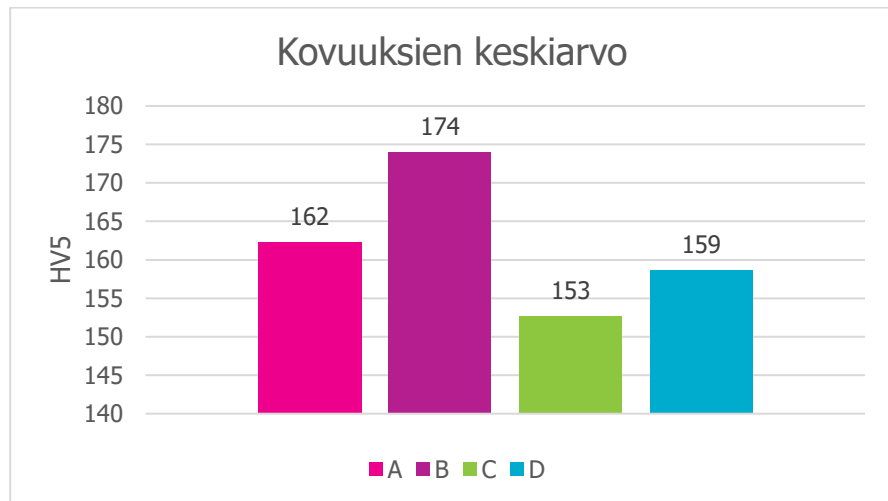
6.3.3 Tulokset

Tuloksiksi saatiin materiaalin kovuus eri syvyyksiltä. Materiaalin kovuus ei oleellisesti muuttunut mitaussyvyyden muuttuessa, vaan kovuus heitteli melko tasaisesti pienen alueen sisällä (Kuvaaja 5). Viralliseen tulosvertailuun otettiin mukaan kolmen mittaustuloksen keskiarvot, eli pienin ja suurin tulos jätettiin huomioimatta. Näin saatiin pienennettyä mitaussuorituksen aiheuttamaa mahdollista virhettä tuloksissa (Kuvaaja 6).

Kuvaaja 5. Kovuudet mittauspisteittäin.



Kuvaaja 6. Kolmen keskimmäisen arvon keskiarvo.



Mittausten tulosten perusteella profiiliputkien kovuudessa on jonkin verran eroja. Suurin ero kovuudessa on näytteillä B ja C, joiden ero on 21 HV5.

6.4 Alkuaineanalyysi

Alkuaineanalyysin tekoon on olemassa monenlaisia laitteistoja. Tässä työssä perehdytään ainoastaan pyyhkäisyelektronimikroskoopilla tehtävään alkuaineanalyysiin.

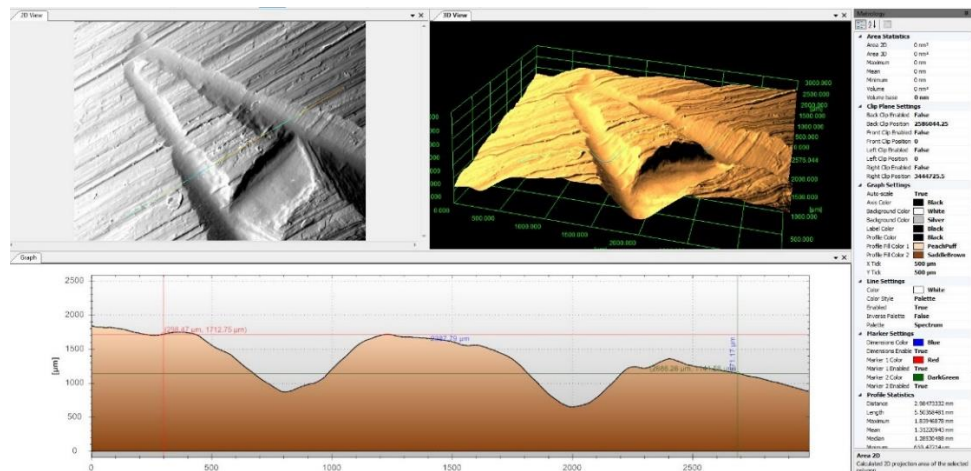
Elektronimikroskopian piiriin kuuluu nykyään hyvin paljon eri käyttötarpeisiin käypiä laitteistoja, mutta niihin kaikkiin liittyy toimintaperiaatteeltaan ja jopa rakenteeltaan samanlaisia perusosia. Samoja komponentteja, joita on käytetty jo ensimmäisissä elektronimikroskoopeissa, on hieman modernisoituna edelleenkin käytössä. Vasta ihan viime aikoina on niissä ruvettu käyttämään laaja-alaisemmin uutta, tietotekniikkaan perustuvaa ajattelutapaa. (Lepistö)

”Elektronimikroskoopissa tulee näkyvän kuvan synnyttämiseksi olla vähintään seuraavat perusosat: elektronilähde, elektronien liikeratoja kontrolloivat linssit, matalassa paineessa oleva tila, jossa elektronit pystyvät liikkumaan ilman mainittavaa energian menetystä tai siroamista, matalan paineen synnyttämiseen soveltuva laitteisto, näytteenpidin ja kuvan muodostamiseen tarvittavat laitteet.” (Lepistö)

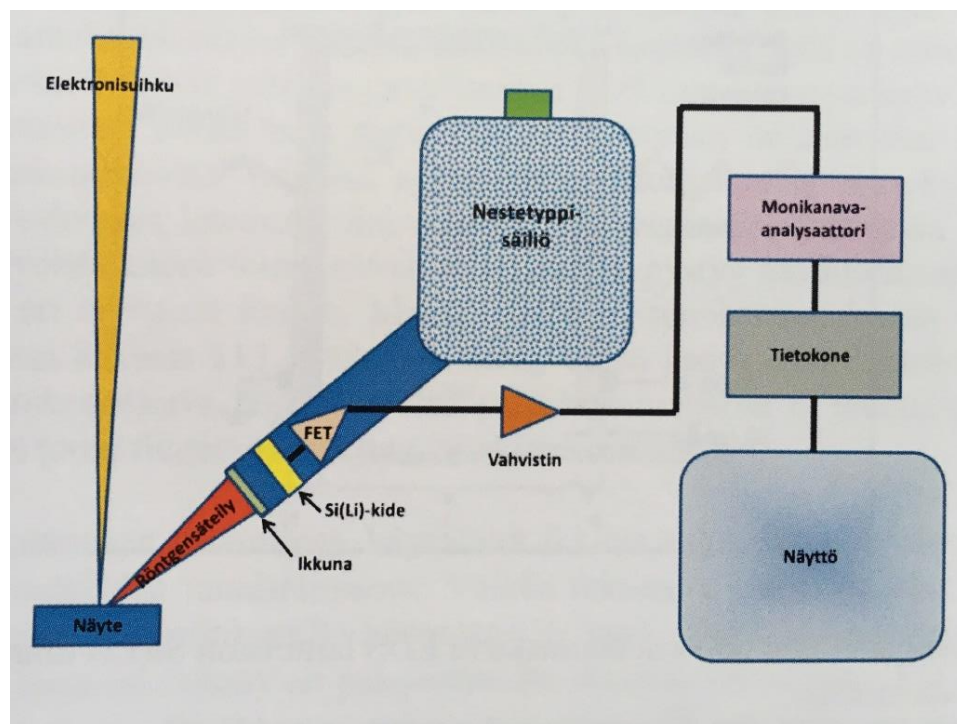
SEM (Scanning electron microscope) (Pyyhkäisyelektronimikroskooppi) on yksi elektronimikroskoopin kehitysmuoto, jonka kehittämistä voidaan pitää elektronimikroskopian läpimurtona käytännön tasolla. SEM onkin lukumääräisesti tarkastellessa ylivoimaisesti yleisin elektronimikroskooppityyppi. SEM on yksi nykyajan monipuolisimmista tutkimuslaitteista ja sitä voidaan soveltaa useilla tieteen, tekniikan ja teollisuuden aloilla. SEM:n saavuttama suuri suosio perustuu sen tarjoamiin ainutlaatuisiin näytteen tarkasteluominaisuuksiin, hyvään suorituskykyyn helppoon käytettävyyteen ja tulosten tulkintaan, sekä suhteellisen alhaiseen hankintahintaan. SEM:lla pystytään toteuttamaan samanaikaisesti sekä näytteen pintarakenteen tarkastelu, sekä sen kemiallisen koostumuksen määrittäminen pieneltä alueelta. Sen erotuskyky ja kuvan syvyystarkkuus ovat ylivoimaisia perinteiseen optiseen mikroskooppiin verrattuna. SEM:n ehkä suurimpana etuna muihin laitteisiin verrattuna voidaan pitää sen kykyä luoda tutkittavasta kohteesta kolmeulotteinen kuva (Kuva 32). SEM:n käytön voimakkaaseen kasvuun on vaikuttanut myös sen lisälaitteena saatavat alkuaineanalyysointilaitteet, lähinnä EDS (Energy Dispersive Spectrometer) (röntgenanalyysointilaitteisto), ovat viime aikoina kehittyneet hyvin monipuolisiksi ja luotettaviksi laitteiksi. (Lepistö, s. 44)

EDS-menetelmässä, josta käytetään myös nimitystä EDX-menetelmä (Energy Dispersive X-ray Spectrometer) perustuu alkuaineiden tunnistus ja niiden pitoisuuksien määrittäminen näyteatomien emittoimien karakterististen röntgensäteiden energian ja intensiteetin mittaamiseen. Tänä päivänä EDS-systeemiin (Kuva 33) oleellisena osana liittyvä atk-laitteisto pystyy varsinaisen analysoinnin ja siihen liittyvien korjauslaskelmien lisäksi huolehtimaan myös monista muista toiminnoista. Esimerkiksi mikroskoopin eri yksiköiden kontrolloinnista, kuvan prosessoinnista ja tallentamisesta sekä varsin hyvätasoisesta kuva-analysoinnista. (Lepistö, s. 186)

EDS-menetelmässä, josta käytetään myös nimitystä EDX-menetelmä (Energy Dispersive X-ray Spectrometer) perustuu alkuaineiden tunnistus ja niiden pitoisuuksien määrittäminen näyteatomien emittoimien karakterististen röntgensäteiden energian ja intensiteetin mittaamiseen. Tänä päivänä EDS-systeemiin (Kuva 33) oleellisena osana liittyvä atk-laitteisto pystyy varsinaisen analysoinnin ja siihen liittyvien korjauslaskelmien lisäksi huolehtimaan myös monista muista toiminnoista. Esimerkiksi mikroskoopin eri yksiköiden kontrolloinnista, kuvan prosessoinnista ja tallentamisesta sekä varsin hyvätasoisesta kuva-analysoinnista.



Kuva 32. Näytteestä A otettu kolmiulotteinen kuva. (Leskinen, 2019)



Kuva 33. Periaatekuva EDS-laitteistosta. (Lepistö)

EDS-menetelmän hyviä puolia on sen edellyttämä pieni elektronisuihkuvirta, joka on lähes samaa luokkaa kuin normaalia SE (sekundäärielektronit) -kuvaakin muodostettaessa. Näin näytteen analysointi voi tapahtua joustavasti normaalin näytteen tarkastelun yhteydessä. Menetelmä ei ole myöskään tarkka pinnan muotojen vaihtelulle, eikä pienet korkeuserot vaikuta juurikaan tuloksiin. Huonoina puolina voidaan pitää alkuaineiden erottelukykä, joka ei ole erityisen hyvä. (Lepistö, s. 192)

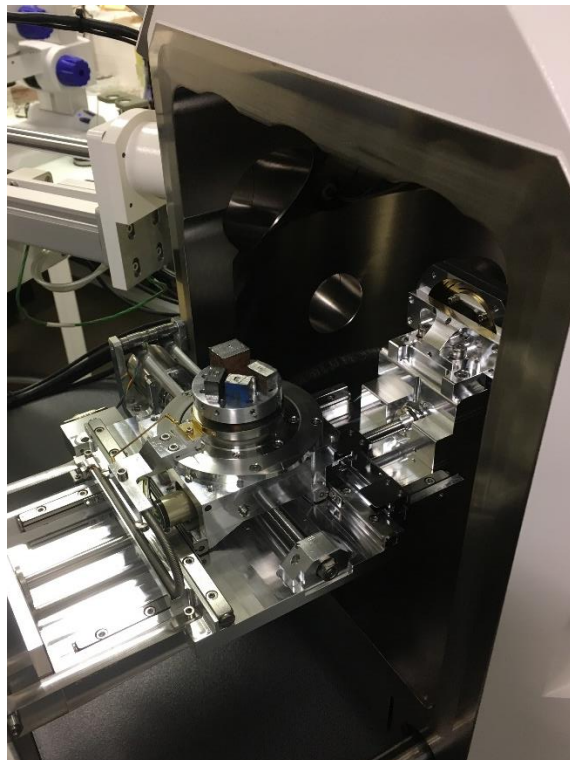
6.4.1 Valmistelu

Alkuaineanalyysiä varten piti rakenneputkista sahata noin sokeripalan kokoinen palanen. Sahatut palaset merkattiin meistaamalla, jotta ne eivät pääsyt sekoittumaan minään vaiheessa. Palaset puhdistettiin sahauksen jälkeen asetonilla ja säilytettiin minigrip-pusseissa, koska koepala täytyi saada pysymään mahdollisimman puhtaana, jotta siihen ei olisi tullut mitään ylimääräistä ainetta.

6.4.2 Mittaus

Alkuaineanalyysi tehtiin Itä-Suomen yliopistolla Kuopiossa, jossa laitteistona toimi ZEISS SigmaHDIVP ja Thermo EDS alkuaineanalyysointijärjestelmä Pathfinder 1.4-ohjelmistolla. (Leskinen)

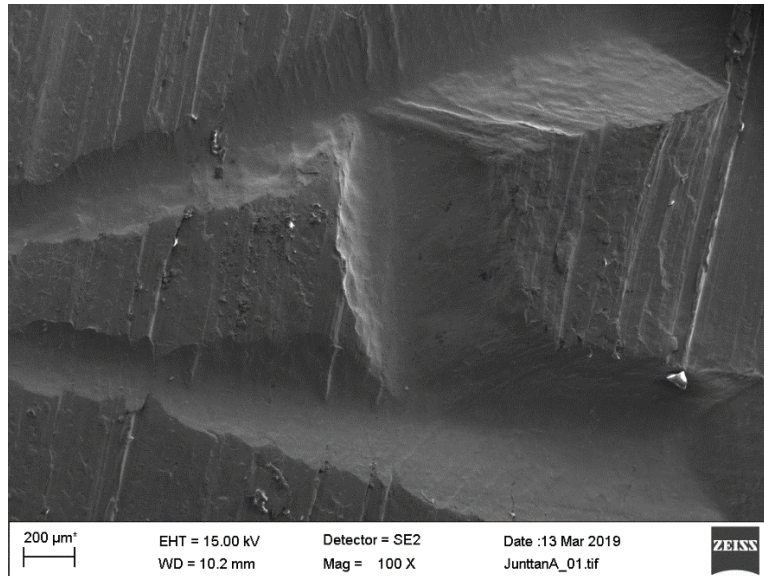
Alkuainemittauksen suoritti laboratorioinsinööri, FT Jari T.T. Leskinen ja mukana oli Savonia-ammattikoulun materiaalitekniikan lehtori Mika Mäkinen. Koska pyyhkäisyelektronimikroskooppi oli minulle aivan uusi kokemus, kertoi Jari Leskinen aluksi hieman teoriaa siitä, kuinka laite toimii ja miten se mittaa alkuainepitoisuudet. Seuraavaksi näytteet esennettiin niille tarkoitettuun näytteenpitimeen, johon kaikki mitattavat kappaleet saatiin mahtumaan yhtä aikaa. Näytteenpidin kinnitettiin kelkkaan, joka siirtää näytteen koneen sisälle, kun matalapainekammion luukun laittaa kiinni (Kuva 34).



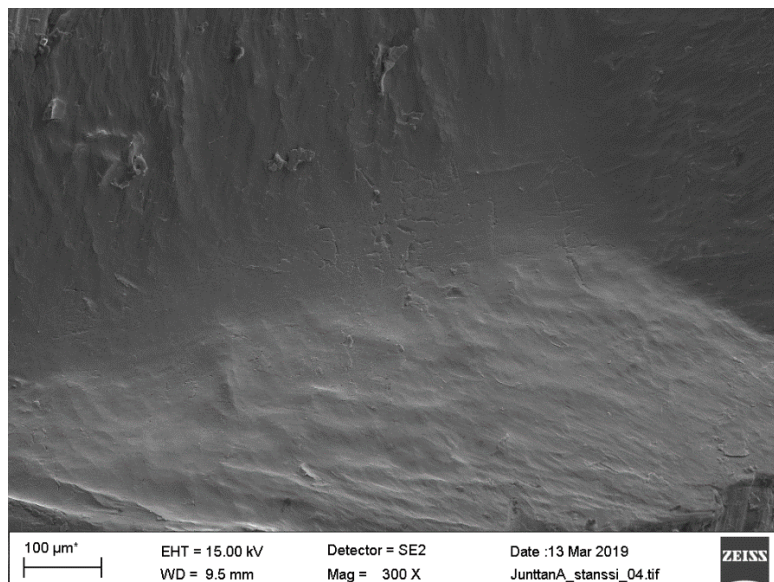
Kuva 34. Näytteet telineessä, menossa matalapainekammioon. (Koponen, 2019)

Ensimmäiseksi laite pistettiin tekemään näytteille plasmapuhdistus pyyhkäisyelektronimikroskoopissa olevalla XEI Evactron laitteella. Puhdistus kesti noin 30 minuuttia. Puhdistus tarkoitus on vähentää hiilivetyjen kontaminaatiota tyhjiökammiossa. Tämä parantaa merkittävästi elektronimikroskoopin kuvantamista ja analyttistä suorituskkyä. (Evactron)

Puhdistuksen jälkeen kappaleita päästiin tarkastelemaan tietokoneen näytöltä. Elektronimikroskoopilla saa erittäin tarkkoja kuvia tarkasteltavasta kohteesta, niin kuin kuvista (Kuva 35 ja Kuva 36) voi havaita.



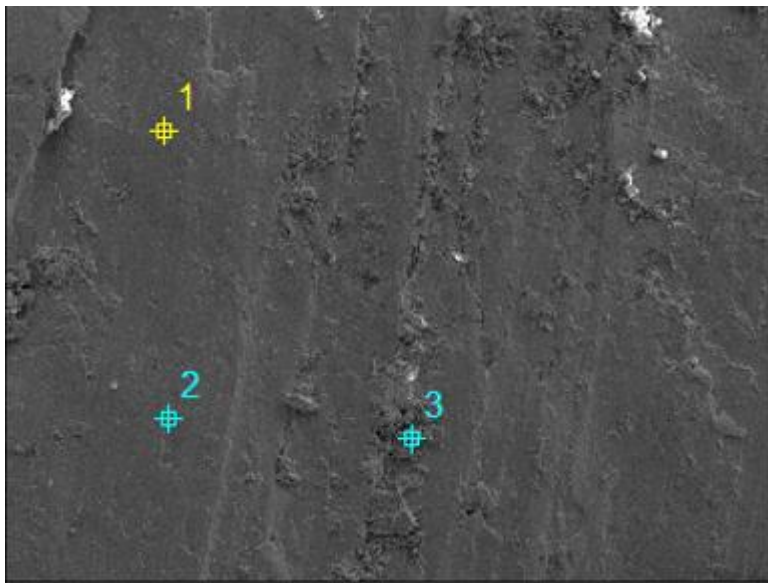
Kuva 35. Näytteen A stanssausjälki. (Leskinen, 2019)



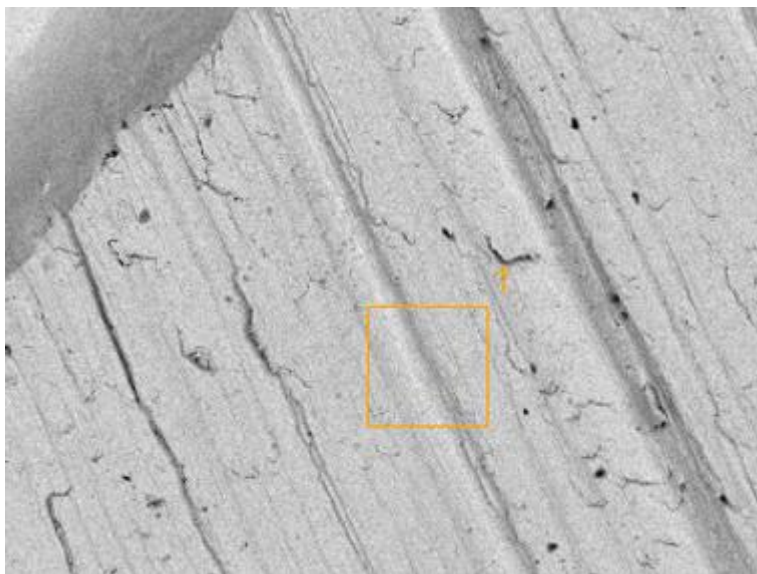
Kuva 36. Näytteen A stanssausjäljen pohja. (Leskinen, 2019)

Näytteille tehtiin useampi erilainen alkuaineanalyysi. Ensiksi otettiin kolme alkuaineanalyysiä pistemittauksena. Pisteet valittiin niin, että kaksi mittauspistettä otettiin kohdista, joissa näyte oli mahdollisimman puhtaan ja tasaisen näköinen ja kolmas mittauspiste kohdasta, jossa näkyi epätasaisuutta ja mahdollisesti likaa (Kuva 37.). Näissä mittauksissa tuloksiin otettiin mukaan myös hiili. Seuraavaksi otettiin alkuaineanalyysi pisteestä 1 (Kuva 37) niin, että jätettiin hiili pois analyysistä. Kolmas mittaus tehtiin aluemitauksena, jolloin mikroskooppi käy läpi määrätyn alueen ja ilmoittaa alkuainepitoisuudet keskiarvona (Kuva 38).

Koska EDS-laitteisto ei pysty mittaamaan luotettavasti keveitä alkuaineita, keskityttiin mittaustuloksissakin vain niihin tuloksiin, joissa hiili on jätetty pois mittauksista.



Kuva 37. Mittauspisteet näytteessä. (Leskinen, 2019)



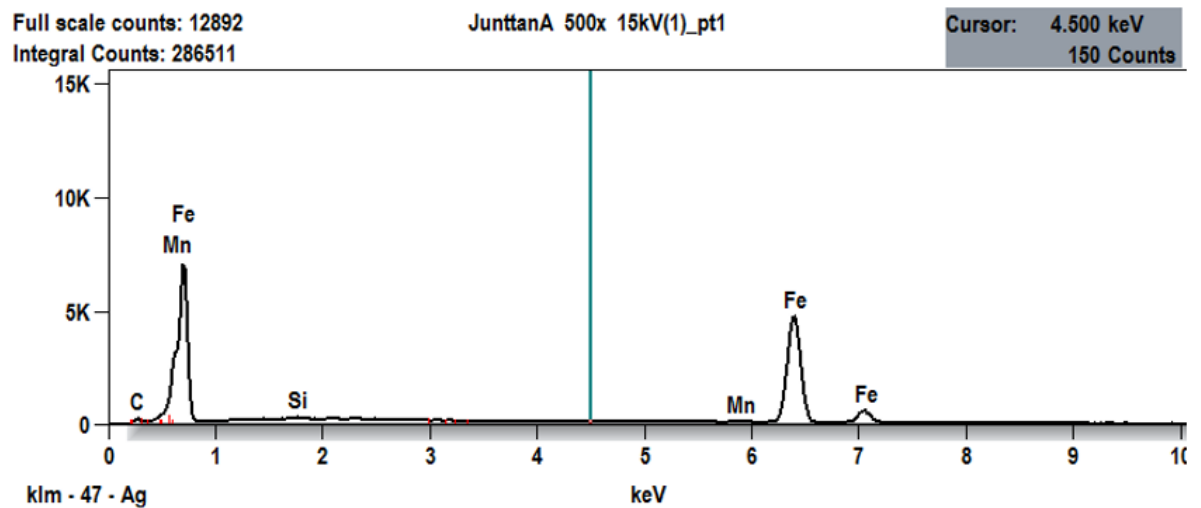
Kuva 38. Mittausalue näytteessä. (Leskinen, 2019)

6.4.3 Tulokset

Pyyhkäisyelektronimikroskoopin tietokone loi mittauksesta mittausraportin (Liite 2), jossa näkyy kuva mittauspisteestä, josta mittaus on suoritettu (Kuva 37), mittaus arvot (Kuva 39), EDS-spektrin (Kuva 40) ja taulukon, jossa näkyy löydetyt alkuaineet ja niiden määrät painoprosentteina ja atomiprosentteina (Kuva 41).

Image Name: Junttan A 500x 15 kV (1)
 Image Resolution: 1024 by 768
 Image Pixel Size: 0.61 μm
 Acc. Voltage: 15.0 kV
 Magnification: 500

Kuva 39. Mittausarvot.



Kuva 40. EDS-spektri, pisteestä 1. (Leskinen, 2019)

Weight %

	C	O	Si	S	Ca	Mn	Fe
<u>JunttanA 500x 15kV(1)_pt1</u>	2.58		0.32			1.88	95.22
<u>JunttanA 500x 15kV(1)_pt2</u>	2.67		0.26			1.41	95.66
<u>JunttanA 500x 15kV(1)_pt3</u>	4.57	26.84	0.12	0.15	0.59	0.65	67.07

Atom %

	C	O	Si	S	Ca	Mn	Fe
<u>JunttanA 500x 15kV(1)_pt1</u>	10.94		0.58			1.74	86.74
<u>JunttanA 500x 15kV(1)_pt2</u>	11.30		0.46			1.31	86.93
<u>JunttanA 500x 15kV(1)_pt3</u>	11.54	50.93	0.13	0.14	0.45	0.36	36.45

Kuva 41. Pisteiden 1, 2, ja 3 mittaustulokset. (Leskinen, 2019)

Niin kuin kuvasta (Kuva 41) voi huomata, pisteen 3 tulokset ovat hyvin erilaisia, kuin pisteiden 1 ja 2. Tämä johtuu siitä, että piste 3 valittiin tarkoituksella sellaiseen kohtaan, jossa näyte ei vaikuttanut puhtaalta. Tätä mittauspistettä ei kannata tuloksissa huomioida lainkaan.

Toinen huomioitava asia tämän mittauksen tuloksissa oli hiili (C). Teräksen määritelmään kuuluu, että se sisältää hiiltä alle 2,1 %. Tuloksissa hiiltä näyttäisi olevan yli tämän ja näytteen B kohdalla jopa 10%. Tämän liian suuren hiiren määrän selittää se, ettei EDS-menetelmällä voi mitata luotettavasti keveitä alkuaineita ja hiili on juuri sillä rajalla. Toinen asia mikä hiilen liiallista määrä selittää on se, että näytteet olivat vajaan kuukauden tekemisissä ilman kanssa, joka sisältää hiilidioksidia. Tätä ilman sisältämää hiiltä on dissufoitunut näytteisiin. Lopullisesta mittauksesta hiili jätettiin mittauksesta pois. Jari leskinen mainitsi, että hiilen määrä on mittauksessa todennäköisesti noin 10-kertaa todellista suurempi. Kuitenkin eri materiaalien välillä mitatussa hiilen määrässä on suuria eroja. Voi siis olla, että materiaali B on kuitenkin todellisuudessaakin runsashiilisempää terästä, kuin muut. Se voisi osittain selittää materiaali B:n suurinta kovuutta ja lujuutta ja huonoa iskusitkeyttä.

Aluemittautapa alkuaineanalyysissä vaikutti omaan tarkoitukseeni parhaalta, koska se pienentää mahdollisuutta mittaustuloksen virheellisyyteen mahdollisen ulkopuolisen lian takia. Lopulliset tulokset onkin tehty aluemittauksen pohjalta (Taulukko 1).

Vertailupohjaksi otin SSAB:n valmistaman Domex Tube Double Grade materiaalin kemiallisen koostumuksen (Kuva 42). SSAB:n materiaali ei ole samaa kuin tutkittavat materiaalit, mutta siitä saa kuitenkin käsityksen, millaisia suuruusluokkia seosaineiden arvot ovat.

Taulukko 1. Alkuaineanalyysin tulokset (aluemittaus).

Alkuaine		A	B	C	D
Alumiini	Al	0,14	0,19		
Pii	Si	0,29	0,41	0,2	0,23
Mangaani	Mn	1,61	0,82	1,32	1,91
Rauta	Fe	97,84	98,45	98,47	97,85

Kemiallinen koostumus

Laatu	C (max %)	Si (max %)	Mn (max %)	P (max %)	S (max %)
S355J2H	0.16	0.25 ¹⁾	1.60	0.020	0.012

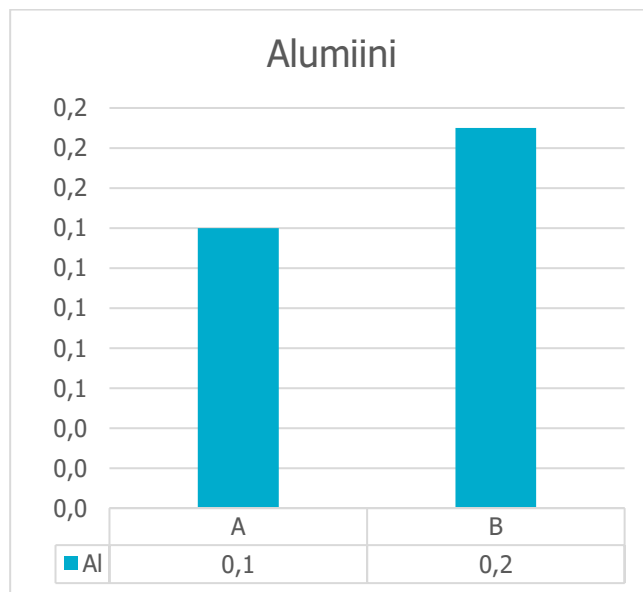
Kuva 42. SSAB:n Domex Tube Double Grade materiaalin kemiallinen koostumus. (SSAB)

Alumiinia löytyi kahdesta näytteestä (Kuvaaja 7).

Alumiinia käytetään teräksen tiivistämiseen, koska se sitoo tehokkaasti itseensä hapen ja typen. Alumiini parantaa iskusitkeyttä etenkin pienissä lämpötiloissa, koska se pienentää raekokoa ja muodostaa nitridejä irrottaen typen raudan liuoksesta. (Kivivuori, s. 53)

Alumiinia on todennäköisesti kaikissa näytteissä, mutta niin pieniä pitoisuuksia, ettei niitä tutkimuksessa löydetty. Koska näytteissä A ja B löytyi alumiinia ja niissä oli enemmän myös piitä, on todennäköistä, että ne ovat paremmin tiivistettyä terästä kuin muut.

Kuvaaja 7. Näytteiden A ja B alumiinin määrät.



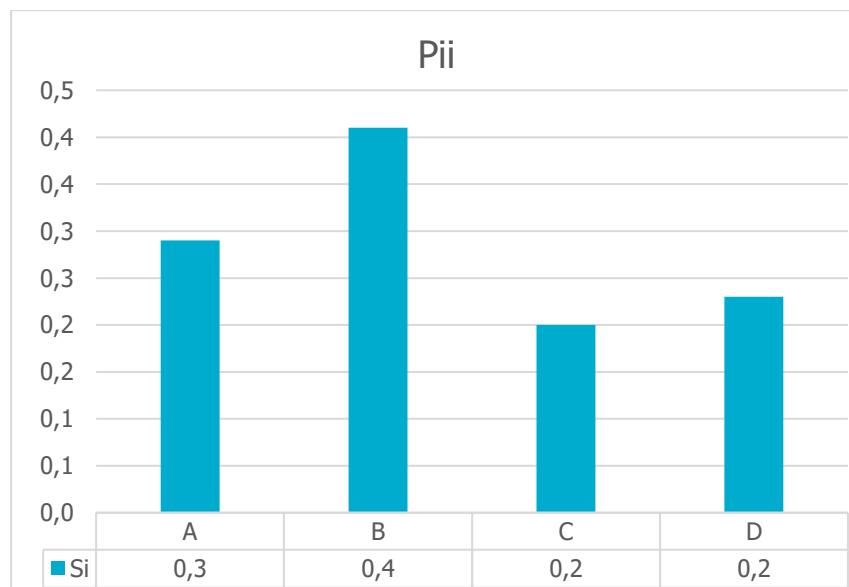
Piitä löytyi kaikista näytteistä, mutta esiintyvyydessä oli selkeitä eroja (Kuvaaja 8).

Pii lisää hiukan muodonmuutoslujuutta ja muokkauslujittumista, mutta huonontaa iskusitkeyttä. (Kivivuori, s. 52)

Piin kohdalla pitää ottaa huomioon eräs EDS-tekniikan ominaisuus. EDS-spektreissä ilmenee joitakin virheellisyyksiä eli antifaktoja. Piin kohdalla tällainen antifakta on mahdollista esiintyä, kuten Toivo Lepistö (2016 ss. 195-196) kirjoittaa:

Si (Li)-tunnistimeen tuleva röntgensäteily voi synnyttää piin karakterista säteilyä kiteen sisäosien lisäksi myös sen pinnalla olevassa ohuessa, ei-aktiivisessa puhtaassa Si-kerroksessa (Si dead layer). Koska tämä ns. piin sisäinen fluoresenssisäteily syntyy nimenomaan kiteen tunnistuspinnalla, tulee kiteen aktiivinen osa tunnistamaan sen siihen tulevana ”normaalina” Si säteilynä. Spektriin muodostuu Si-K α -piikki, vaikka itse tarkasteltava näyte ei piitä sisältäisikään. Koska kiteen pinnalla oleva puhdas Si-kerros on hyvin ohut, noin 0,1 μm , jää muodostuvan Si-piikin intensiteetti yleensä hyvin pieneksi. Käytännön työskentelyssä piin sisäisellä fluoresenssisäteilyllä on merkitystä lähinnä silloin, kun tarkasteltavan näytteen Si-pitoisuus on hyvin pieni, tai sitä ei esiinny lainkaan. Yleisohjeena voidaan sanoa, että jos Si (Li)-tunnistimella määritetty Si-pitoisuus on 0,2 p-% tai sitä pienempi, on mittaustulokseen syytä suhtautua varauksellisesti. Merkittävä osa Si-K α säteilystä voi nimittäin olla peräisin näytteen asemasta tunnistinkiteen puhtaasta Si-kerroksesta. Myös jos Si-pitoisuun on näytteessä esimerkiksi 0,2-0,4 p-%, voi tulos hyvin olla 0,3-0,5 p-%.” (Lepistö)

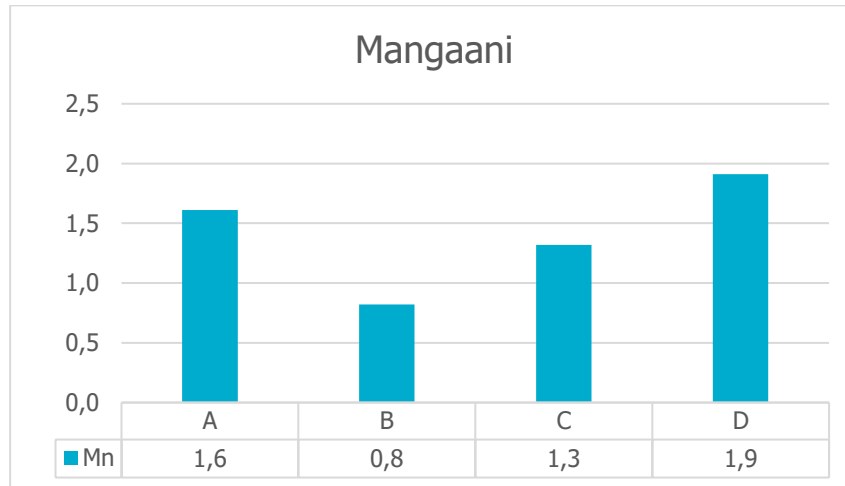
Kuvaaja 8. Piin määrä näytteissä.



Mangaanin määrässä oli myös selkeitä eroja näytteiden välillä (Kuvaaja 9).

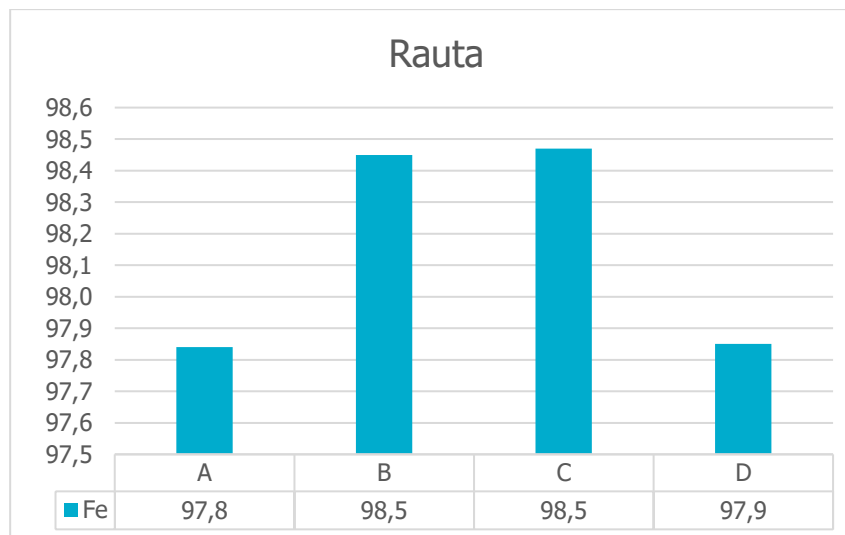
Mangaani parantaa teräksen karkenevuutta ja näin ollen se lisää rakenteen kovuutta, lujuutta ja kestävyyttä. Mangaani lisää muodonmuutoslujuutta ja muokkauslujittumista. Yli prosentin pitoisuuksilla mangaani laskee teräksen sitkeyttä. (Kivivuori, ss. 51-52)

Kuvaaja 9. Mangaanin määrä näytteissä.



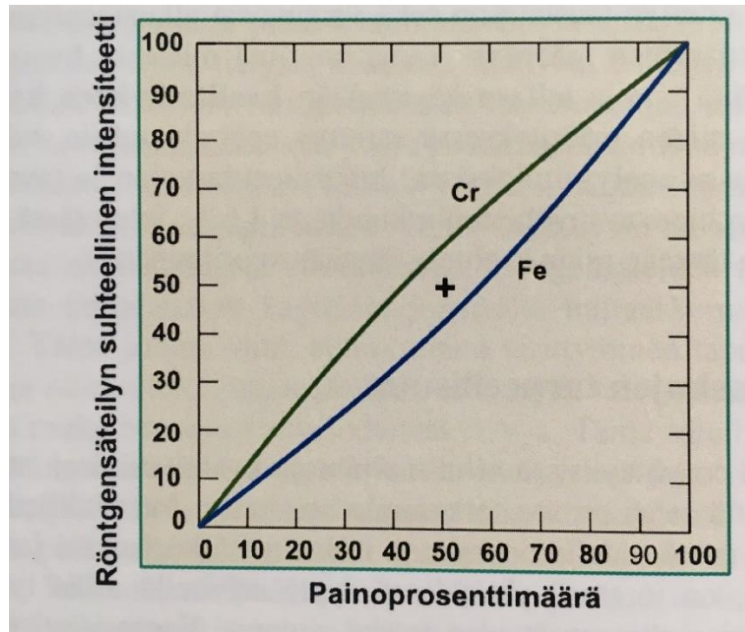
Rauta on teräksen pääraaka-aine, jonka määrän vaikuttaa vain se, kuinka paljon muita seosaineita teräksessä käytetään. Kuvaajassa (Kuvaaja 10) näkyy raudan määrä näytteissä.

Kuvaaja 10. Raudan määrä näytteissä.



Alkuaineanalyysin tulokset eivät ole täysin oikeanlaisia, koska EDS-menetelmässä pitää tehdä korjauslaskuja, jotta tulokset olisivat todellisia.

Esimerkiksi jos olisi näyte, jossa Cr ja Fe-pitoisuudet ovat yhtä suuret, 50 p-%/50 p-%, tulevat suhteelliset intensiteettiarvot olemaan r-säteilylle noin 53% ja Fe-säteilylle noin 43%. Tämä virhe on sitä suurempi, mitä tasaisempi jako pitoisuuksissa on (Kuva 43). Tästä saisi käsityksen, että Cr-pitoisuus näytteessä olisi selkeästi suurempi kuin Fe-pitoisuus. Tämän takia todellisten tulosten saamiseksi tulisi käyttää korjauksia/korjauslaskuja. (Lepistö, ss. 208-209)



Kuva 43. Todellisen näytekostumuksen ja näytteestä emittoituvien röntgensäteiden suhteellisten intensiteettiarvojen välinen korrelaatio binäärisillä Cr-Fe seoksilla. (Lepistö, s. 209)

Tässä työssä ei kuitenkaan korjauslaskuihin ollut tarvetta, koska löydettyjen alkuaineiden pitoisuudet sijoittuivat erittäin lähelle nollaa tai sataa, jolloin niiden arvot olivat lähempänä totuutta. Työssä ei myöskään ollut tarkoitus saada selville täydellistä materiaalin koostumusta, vaan saada selville eri näytteissä olevia eroavaisuuksia. Lisäksi kaikki näytteet saatiin tutkittua kerralla, jolloin mittausolosuhteet pysyivät kaikkien kappaleiden kohdalla samanlaisina. Näin ollen tuloksista ei voi päätellä täysin mitkä ovat todelliset alkuainepitoisuuden, mutta pitoisuuksien erot näytteiden välillä ovat todellisissa.

7 POHDINTAA TULOKSISTA

Tehdyistä tutkimuksista vetokoe ja Vickers-kovuuskoe ovat standardin mukaisia kokeita. Iskusitkeys-koe ei voida pitää standardin mukaisena, koska iskusauvojen valmistuksessa oli tehty virheitä.

Työn tarkoituksena oli selvittää, onko rakenneputkien materiaaleissa olemassa eroavaisuuksia ja selittäisikö eroavuudet materiaalin lisääntyntä kulumista. Tulosten perusteella voi sanoa, että materiaaleissa on eroa. Varsinkin materiaali B eroaa muista materiaaleista merkittävästi. Käyttökokemusten mukaan kyseinen materiaali on ollut myös kulutuskestävyydeltään paras. Testien tulokset ja tilaajan mielikuva parhaasta materiaalista tukevat toisiaan. Testien perusteella materiaali B on kovinta, lujinta ja sen kiderakenne on putken pinnalla hienointa. Nämä ominaisuudet parantavat kulutuskestävyyttä. Tutkimuksissa selvinneiden erojen lisäksi on kuitenkin syytä huomioida myös muut muuttujat, joita on tapahtunut materiaalien vaihtumisen aikana. Koneet ovat kasvaneet koko ajan isommiksi ja niiden liikenopeudet muuttuneet. Myös voiteluaineiden tyyppi on vaihtunut välillä. Tutkittavien materiaalien ainevahvuus myös vaihtelee, jolloin niiden ominaisvärähtelytaajuudet myös muuttuvat. Näillä kaikilla asioilla on vaikutusta materiaalin kulumiseen.

Alkuaineanalyysin tuloksiin ei voi olla täysin tyytyväinen. EDS-menetelmä teräksen tutkimisessa ei ole riittävän tarkka, jotta näytteistä saataisiin tarvittavat alkuaineet selville. Muiden tulosten perusteella kannattaisikin tehdä materiaaleille uusi tarkempi alkuaineanalyysi. Esimerkiksi massaspektrometri voisi olla sopiva tutkimuslaite. Näin saataisiin selville materiaalien todelliset seosainesuhteet ja se selittääkö esimerkiksi hiilen määrä sitä, miksi materiaali B oli niin selkeästi erilaista. Hiili voisi olla yksi tekijä, koska se lisää lujuutta ja kovuutta, mutta huonontaa iskusitkeyttä.

Toinen tutkimus, joka kannattaisi vielä materiaaleille tehdä on pinnankovuuden mittausta. Pinnat ovat putkissa ruosteisia tai maalattuja, mutta jos ne saisi jollain menetelmällä puhdistettua niin, ettei itse materiaali siitä muuttuisi, saisi pinnankovuuden selvitettyä. Mikroskooppitutkimuksissa näkyi, että varsinkin materiaalissa B on pintakerroksessa pienempi kiderakenne. Pienempi kiderakenne on yleensä kovempaa ja kestää paremmin kulutusta.

Materiaalin kulumisen on yleensä monen asian summa, joten tämän työn tulosten perusteella ei kulumisongelmaa saa todennäköisesti suoraan ratkaistua. Työ kuitenkin tuo esiin sen, että materiaalisakin on tapahtunut muutoksia.

Uskon, että näiden testien tuloksista on hyötyä, kun selvitetään kulumiskestävyydessä esiintyvää ongelmaa.

8 LOPPUPÄÄTELMÄT

Tässä työssä saatuja tuloksia ei voi sellaisenaan verrata muualla tehtyihin tuloksiin. Vaikka osa tutkimukset on tehty standardien mukaisesti. Tuloksia voidaan kuitenkin käyttää sellaisenaan tutkimuksissa olleiden materiaalien vertailemiseen.

Tutkimustyö oli mielenkiintoinen ja siinä pääsi tutustumaan kattavasti eri tutkimusmenetelmien tekemiseen. Kaikkia työssä käytettäviä tutkimusmenetelmiä en ollut aiemmin käyttänyt, joten uutta asiaa tuli melko paljon. Koska tehdyt tutkimukset tehtiin standardien ohjeiden mukaisesti, tuli eri standardien käytöstä myös kokemusta. Jokaisessa tutkimuksessa tuli eteen paljon uusia asioita ja monen asian tekisi hieman eri tavalla, jos vastaava tutkimustyö tulisi eteen.

Pyyhkäisyelektronimikroskooppi on nykyaikainen tutkimuslaitteisto, jolla voidaan tutkia todella monenlaisia materiaaleja ja niiden ominaisuuksia. Tämän työn ansiosta sitä osaa tarvittaessa itsekin hyödyntää tulevaisuudessa.

Työssä käytetty SEM-EDS menetelmä alkuainetutkimuksessa toimii parhaiten silloin, kun ei tarvitse saada selville keveiden alkuaineiden pitoisuuksista. Teräksen alkuainepitoisuuksien mittaamiseen menetelmä soveltuu tietyin varauksin. Menetelmän erottelukyky ei ole tarpeeksi hyvä, ihan pienimpien pitoisuuksien tarkasteluun. Tarkemmissa tutkimuksissa olisikin syytä käyttää jotain toista menetelmää, esimerkiksi massaspektrometriä.

Teräksen rakenteen tutkiminen mikroskoopilla antaa paljon tietoa sen rakenteesta, mutta kuvan tulkinta luotettavasti, vaatii erittäin suurta tietämystä ja kokemusta aiheesta. Aihe on myös niin laaja, ettei tällaisessa työssä, jossa oli mukana useita muitakin tutkimuksia, voinut perehtyä aiheeseen tarpeeksi syvällisesti. Mikroskooppitutkimuksen tulokset jäivätkin mielestäni osittain puutteellisiksi, kuvissa huomattujen poikkeavuuksien selityksen kannalta.

Kovuusmittaus on helppo ja nopea tapa selvittää materiaalin pinnankovuuksia. Tutkittavissa rakenneputkissa mikroskooppitarkastelun perusteella niiden pinnalla oleva kiderakenne oli erilaista, kuin niiden sisällä. Putkien pinnat olivat kuitenkin maalattuja tai niin ruosteisia, ettei pinnankovuutta päästy mittaamaan, vaan mittaus tehtiin materiaalin sisältä. Erilaisen kiderakenteen paksuus oli myös osassa putkista niin pieni, ettei saatavissa olevilla menetelmillä putkien pintaa olisi saanut puhdistettua niin, ettei myös pintakerros olisi vaurioitunut.

Veto- ja iskukokeissa eniten harmia aiheutti testisauvojen valmistus, jossa oli aikataulullisia ja laadullisia haasteita. Tutkimukset saatiin kuitenkin loppujen lopuksi tehtyä. Vetokokeen tulos oli jopa hieman yllätys, että niinkin suuria eroja materiaalien väleiltä löytyi. Iskukokeessa hieman harmia aiheutti virheellisesti valmistetut iskusauvat, mutta mielestäni mittauksen tuloksia voidaan kuitenkin pitää oikeana. Materiaalien erot olivat niin selkeät, että normaalia suurempikaan mittausvirhe, ei muuttaisi tuloksia selvästi.

9 LÄHDELUETTELO

- Evactron. *Evactron Plasma Cleaning*. Haettu 16. 4. 2019 osoitteesta https://evactron.com/FINFOCUS_INSTRUMENT_OY.) *Kovuusmittaus*. Haettu 11. 3. 2019 osoitteesta <http://static.ecome.fi/upload/43/Kovuus%20Vickers.pdf>
- Junttan Oy. *Tietoa meistä*. Haettu 14. 01. 2019 osoitteesta www.junttan.com/fi/tietoa-meista/
- Kivioja, S.; Kivivuori, S.; & Salonen, P. (2007). *Tribologia- kitka, kuluminen ja voitelu* (5. Painos p.). Helsinki: Otatieto.
- Kivivuori, S. (2016). *Lämpökäsittelyoppi, lämpökäsittelytietoa suunnittelijoille*. Helsinki: Teknologiateollisuus ry.
- Lepistö, T. (2016). *Pyyhkäisyelektronimikroskopia ja Mikroanalysointi*. Tampere: Juvenes Print-Suomen yliopistopaino Oy.
- Leskinen, J. (2019). Itä-Suomen yliopisto, SIB Labs, Kuopio.
- Leskinen, J. (8. 4. 2019). Sähköposti. *Pyyhkäisyelektronimikroskoopin malli*.
- ry, S. S. (2016). SFS-EN ISO 6892-1. *Metallin vetokoe. Osa 1: Vetokoe huoneenlämmössä*.
- Sorsa, J. (2015). *Materiaalitekniikka* (1 p.). Helsinki: Sanoma Pro.
- SSAB. *SSAB tuotteet*. Haettu 4. 4. 2019 osoitteesta <https://www.ssab.fi/tuotteet/terasluokat/rakenneputket/tuotteet/ssab-domex-tube-double-grade>
- Suomen metalliteollisuuden keskusliitto. (1986). *Materiaalivalinta: kulumistakeävät materiaalit ja pinnoitteet*.
- Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. (2016). SFS-EN ISO 148-1. *Metallien Charpyn iskukoe. Osa 1: Menetelmä, 2*.
- Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. (2016). SFS-EN ISO 6507-1. *Metallic materials. Vickers hardness test*.
- Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. (2016). SFS-EN ISO 6892-1. *Metallin vetokoe. Osa1: Vetokoe huoneenlämmössä*. Helsinki.
- Tampereen yliopisto/ Tampereen ammattikorkeakoulu. (2005). *Kuluminen*. Haettu 26. 02. 2019 osoitteesta http://www.tut.fi/vmv/2005/vmv_2_1_5.php
- Wikipedia. (2014). *Vetokoe*. Haettu 22. 3. 2019 osoitteesta <https://fi.wikipedia.org/wiki/Vetokoe>
- Wikipedia. (2019). *Teräs*. Haettu 22. 3. 2019 osoitteesta <https://fi.wikipedia.org/wiki/Teräs>

10 LIITE 1: VETOKOKEESSA SAATU, YHDEN VETOSAUVAN RAPORTTI

**KOETULOKSET**

Vetokoeohjelma FMT-ProgSys 8.0 T/TCB
MATERTEST OY
 Aineenkoetuslaitteet ja testaussynterijärjestelmät

Koekappaleryhmän yleiset tiedot**Vetokoe**

Rakenneputket

SFS-EN ISO 6892-1:2016

Tilaus Junttan (Koponen)

Erä C

Koekappale 4

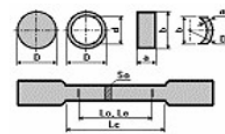
Huom

Koestuspäivä 23.4.2019

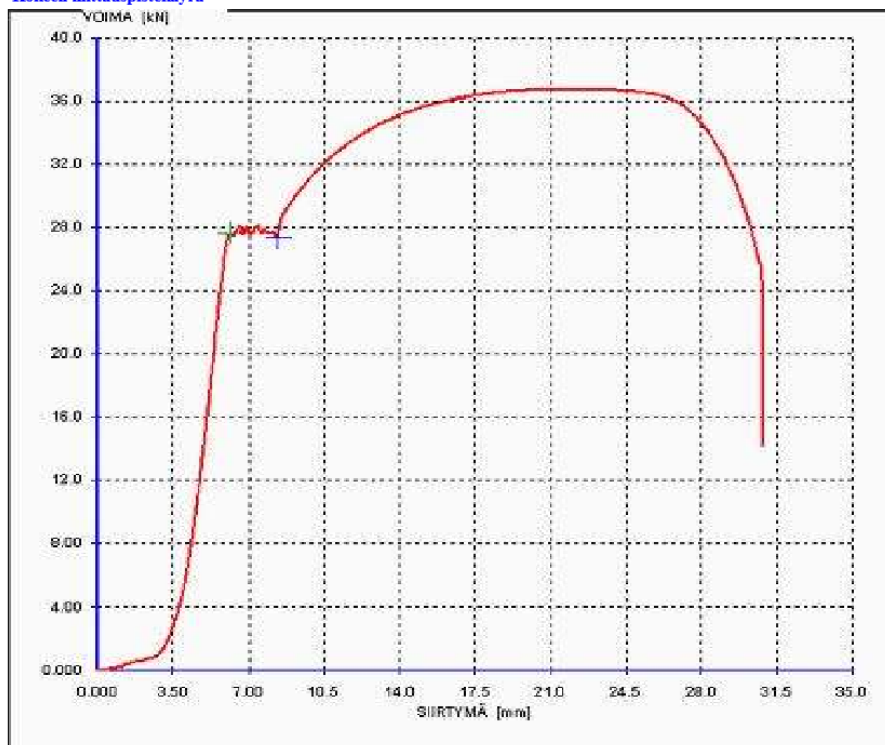
Koestaja Juha Koponen

Syöttötiedot

Pinta-ala	a	6,00	mm	Koepituus	Lc	80,00	mm
	b	12,00	mm	Murtovenymä alkumittapituus	Lo	40,00	mm
	D	0,00	mm	loppumittapituus	Lu	55,10	mm
	d	0,00	mm	Venymäanturi alkumittapituus	Le	0,00	mm
	So	72,00	mm ²	Koekappaleen loppuhalkaisia	Du	0,00	mm

**Lopputulokset**

Suurin voima	Fm	36,694	kN	Kimmokerroin	E	5 624	10 ³ N/mm ²
Lujuus	Rm	509,6	N/mm ²	Korrelaatio		0,84	
Alempi myötöraja	ReL	379,9	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 % 0,0	N/mm ²
Ylempi myötöraja	ReH	383,7	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 % 0,0	N/mm ²
		0,000000		Venymisraja	Rp	0,00 % 0,0	N/mm ²
		0,000000		Koeaika		115,9	s
		0,000000		Murtovenymä	A	37,8	%
				Murtokurouma	Z	0,0	%

Kokeen mittauspistekäyrä

Alkuaineanalyysin raportti

Aika: 5.3.2019

Paikka: Itä-Suomen yliopisto, Kuopio

Mittauksen suorittaja: Laboratorioinsinööri, FT Jari Leskinen

Läsnäolijat: Juha Koponen, opinnäytetyön tekijä
Mika Mäkinen, materiaalitekniikan lehtori, Savonia-ammattikorkeakoulu

Alkuaineanalyysi tehtiin neljälle eri teräsmateriaalille, joista oli noin sokeripalan kokoiset näytepalat.

Kaikki näytteet olivat kiinni samassa näytteenpitimessä ja niille suoritettiin kolme erilaista mittausta:

1. Näytteistä valittiin kolme pistettä, joista 1. ja 2. oli puhtaasta, sileästä kohdasta ja 3. oli selkeästi likaisesta kohdasta. Näissä mittauksissa oli mukana myös hiili (C)
(sivut 2-9)
2. Mittauspisteestä 1 tehtiin toinen mittaus, jossa jätettiin hiili pois.
(sivut 10-13)
3. Alkuaineanalyysi valitulta alueelta. Näytteistä valittiin samankokoinen alue kohdasta, joka näytti puhtaalta. Laite mittasi alueen ja antoi tuloksen keskiarvona.
(sivut 14-17)

Mitattavana oleva näyte A, B C tai D näkyy nimessä Junttan(x), x:n paikalla.

Tuloksia kannattaa tarkastella mittauksista, joissa hiili on jätetty pois, koska hiilen arvo ei ole todellinen ja se huonontaa muiden alkuaineiden tulosten tarkkuutta.

Tulokset kohdassa paino %, antaa paremman kuvan ainemääristä.

Mittauspisteiden 1,2 ja 3 tulokset. (Näissä mittauksissa mukana myös hiili)

JunttanA 500x 15kV(1)

100 μ m

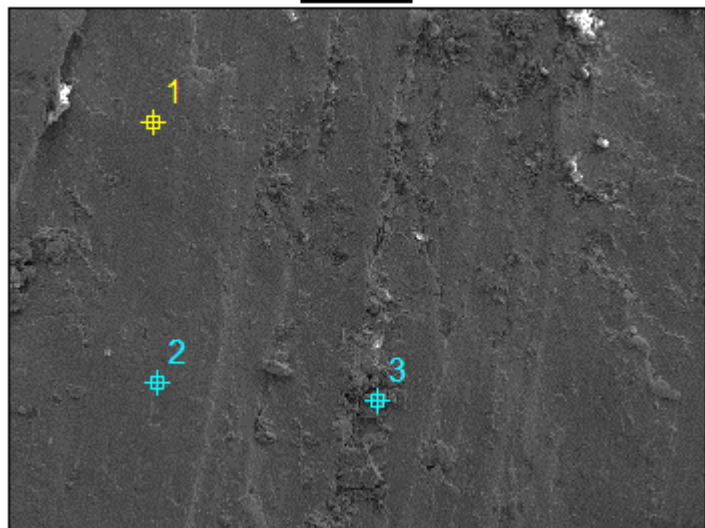


Image Name: Junttan A 500x 15 kV (1)
Image Resolution: 1024 by 768
Image Pixel Size: 0.61 μ m
Acc. Voltage: 15.0 kV
Magnification: 500

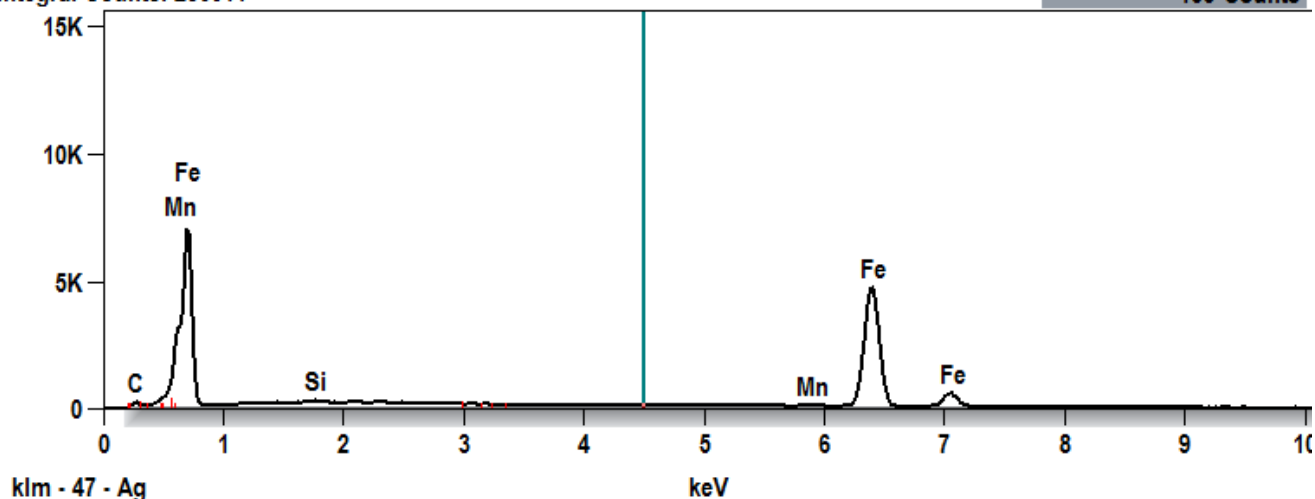
Full scale counts: 12892

Integral Counts: 286511

JunttanA 500x 15kV(1)_pt1

Cursor: 4.500 keV

150 Counts



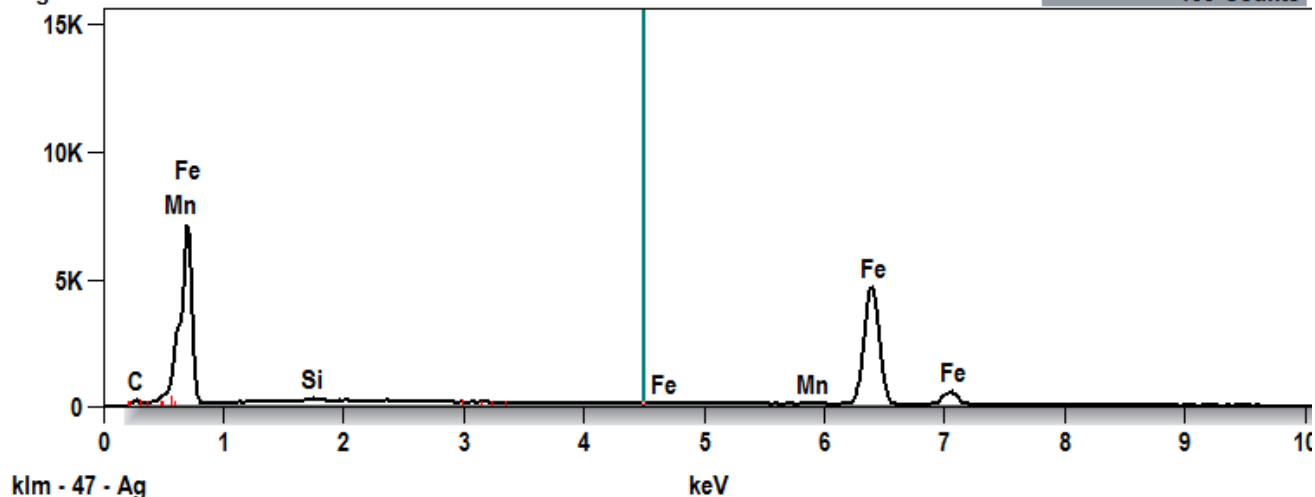
Full scale counts: 12892

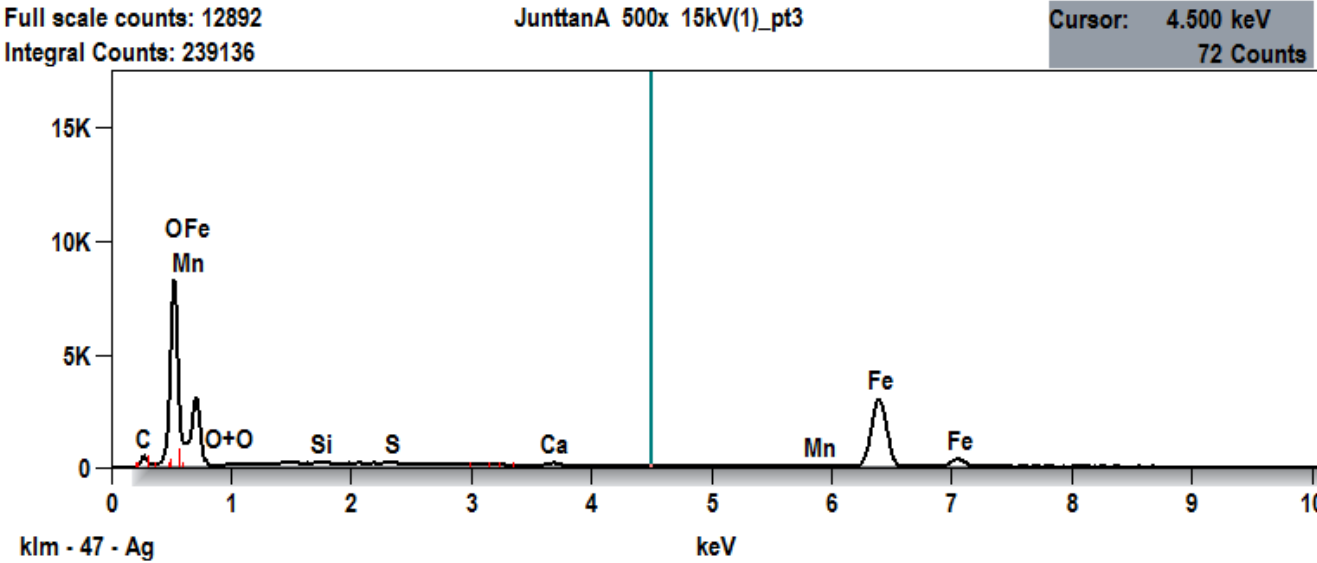
Integral Counts: 284679

JunttanA 500x 15kV(1)_pt2

Cursor: 4.500 keV

138 Counts





Weight %

	C	O	Si	S	Ca	Mn	Fe
JunttanA 500x 15kV(1)_pt1	2.58		0.32			1.88	95.22
JunttanA 500x 15kV(1)_pt2	2.67		0.26			1.41	95.66
JunttanA 500x 15kV(1)_pt3	4.57	26.84	0.12	0.15	0.59	0.65	67.07

Atom %

	C	O	Si	S	Ca	Mn	Fe
JunttanA 500x 15kV(1)_pt1	10.94		0.58			1.74	86.74
JunttanA 500x 15kV(1)_pt2	11.30		0.46			1.31	86.93
JunttanA 500x 15kV(1)_pt3	11.54	50.93	0.13	0.14	0.45	0.36	36.45

JunttanB 500x 15kV(1)

100 μ m

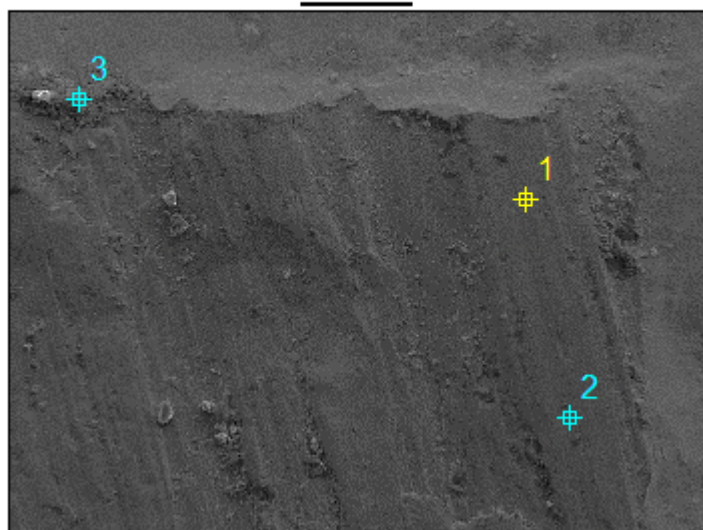


Image Name: JunttanB 500x 15kV(1)
Image Resolution: 1024 by 768
Image Pixel Size: 0.61 μ m
Acc. Voltage: 15.0 kV
Magnification: 500

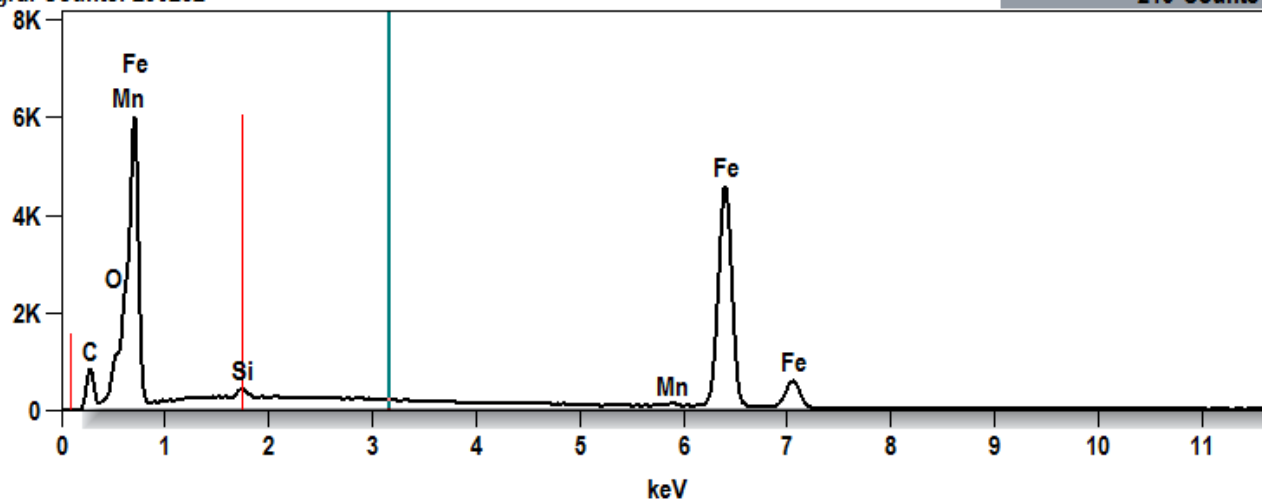
Full scale counts: 6034

JunttanB 500x 15kV(1)_pt1

Cursor: 3.172 keV

Integral Counts: 295282

215 Counts



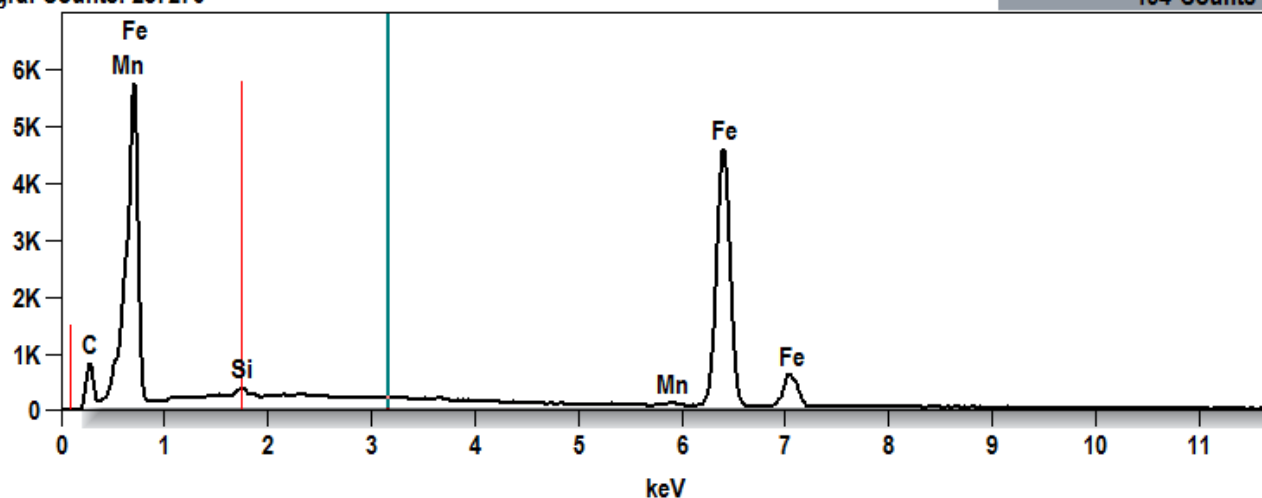
Full scale counts: 5760

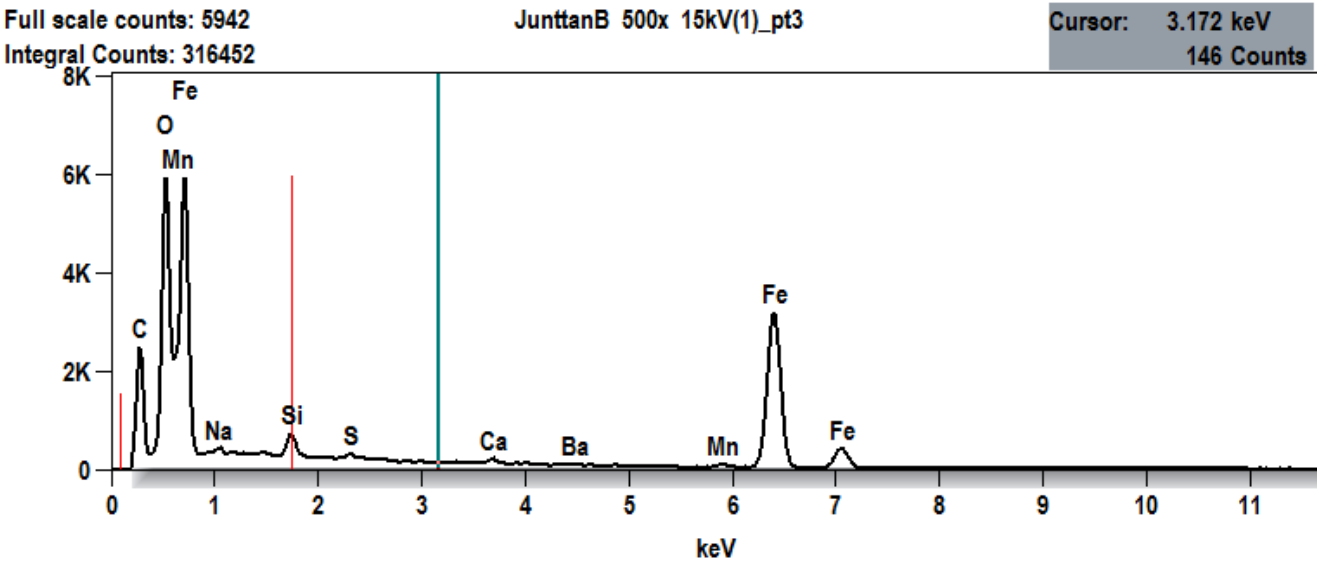
JunttanB 500x 15kV(1)_pt2

Cursor: 3.172 keV

Integral Counts: 287276

194 Counts





weight %

	C	O	Na	Si	S	Ca	Mn	Fe	Ba
JunttanB 500x 15kV(1)_pt1	10.98	1.77		0.56			0.71	85.98	
JunttanB 500x 15kV(1)_pt2	10.85			0.46			0.85	87.84	
JunttanB 500x 15kV(1)_pt3	22.54	21.87	0.53	1.18	0.25	0.51	0.80	51.98	0.36

Atom %

	C	O	Na	Si	S	Ca	Mn	Fe	Ba
JunttanB 500x 15kV(1)_pt1	35.19	4.27		0.76			0.50	59.28	
JunttanB 500x 15kV(1)_pt2	36.01			0.66			0.62	62.71	
JunttanB 500x 15kV(1)_pt3	43.88	31.96	0.54	0.98	0.18	0.29	0.34	21.77	0.06

JunttanC 500x 15kV(1)

100 μm

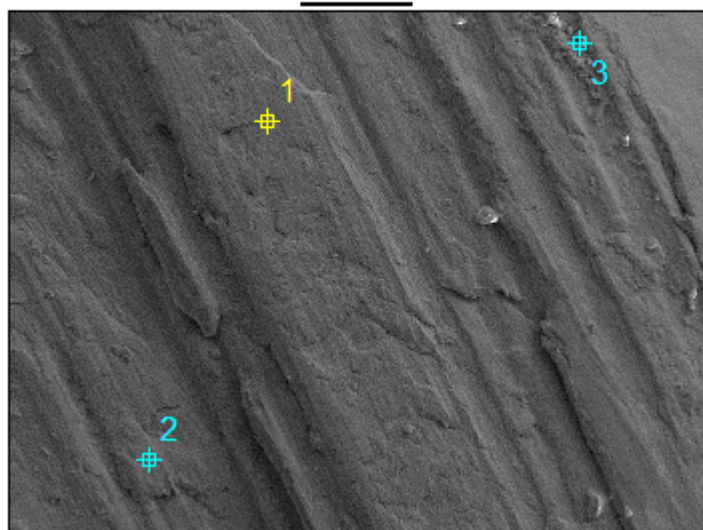
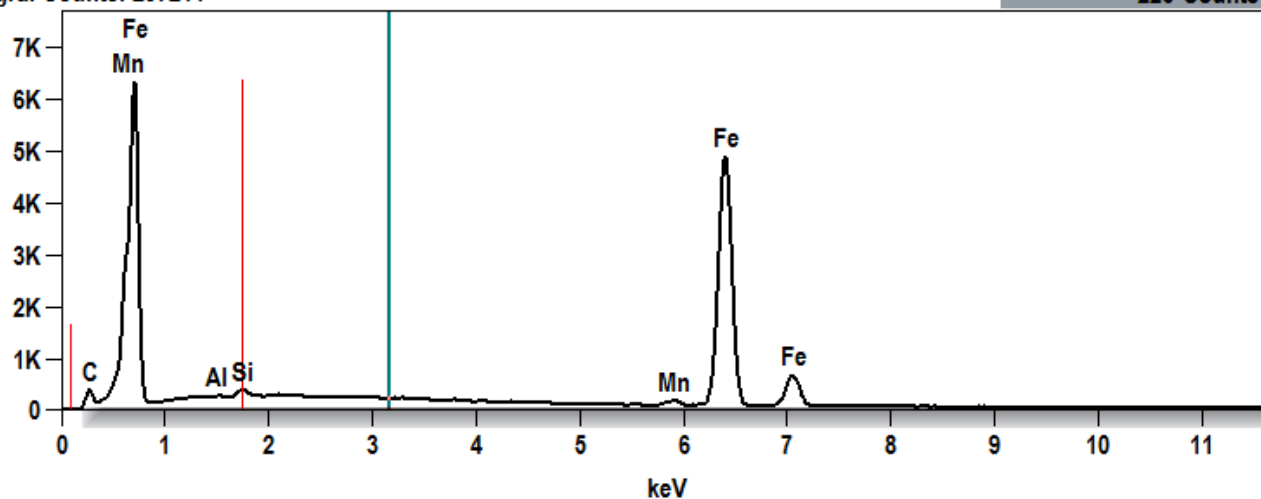


Image Name: JunttanC 500x 15kV(1)
 Image Resolution: 1024 by 768
 Image Pixel Size: 0.61 μm
 Acc. Voltage: 15.0 kV
 Magnification: 500

Full scale counts: 6347
 Integral Counts: 297211

JunttanC 500x 15kV(1)_pt1

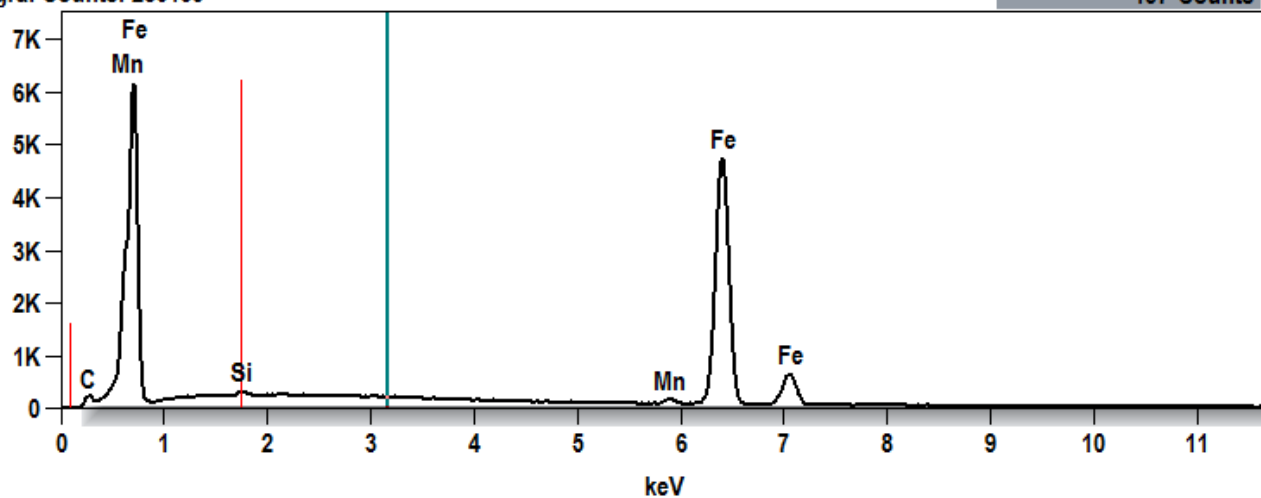
Cursor: 3.172 keV
 226 Counts

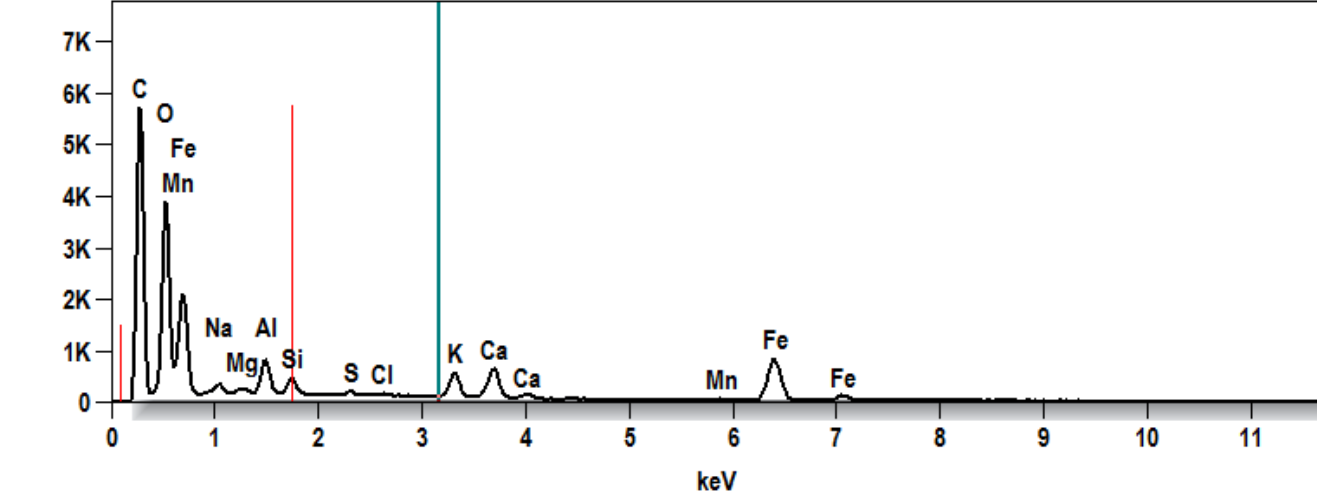


Full scale counts: 6209
 Integral Counts: 285139

JunttanC 500x 15kV(1)_pt2

Cursor: 3.172 keV
 197 Counts





Weight %

	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Mn	Fe
JunttanC 500x 15kV(1)_p t1	4.54				0.09	0.44					1.39	93.54
JunttanC 500x 15kV(1)_p t2	2.22					0.30					1.33	96.15
JunttanC 500x 15kV(1)_p t3	46.78	27.37	0.56	0.19	1.61	0.76	0.24	0.14	2.21	3.21	0.58	16.34

Atom %

	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Mn	Fe
JunttanC 500x 15kV(1)_p t1	18.01				0.16	0.75					1.21	79.86
JunttanC 500x 15kV(1)_p t2	9.52					0.56					1.24	88.68
JunttanC 500x 15kV(1)_p t3	63.07	27.70	0.40	0.13	0.97	0.44	0.12	0.06	0.92	1.30	0.17	4.74

JunttanD 500x 15kV(1)

100 μ m

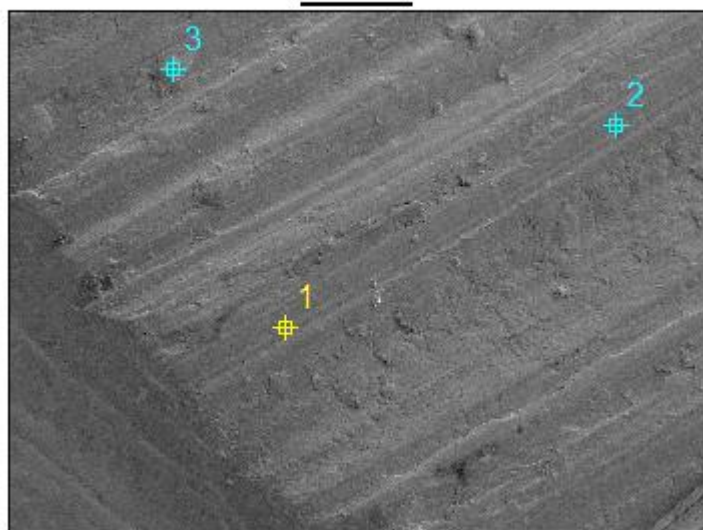
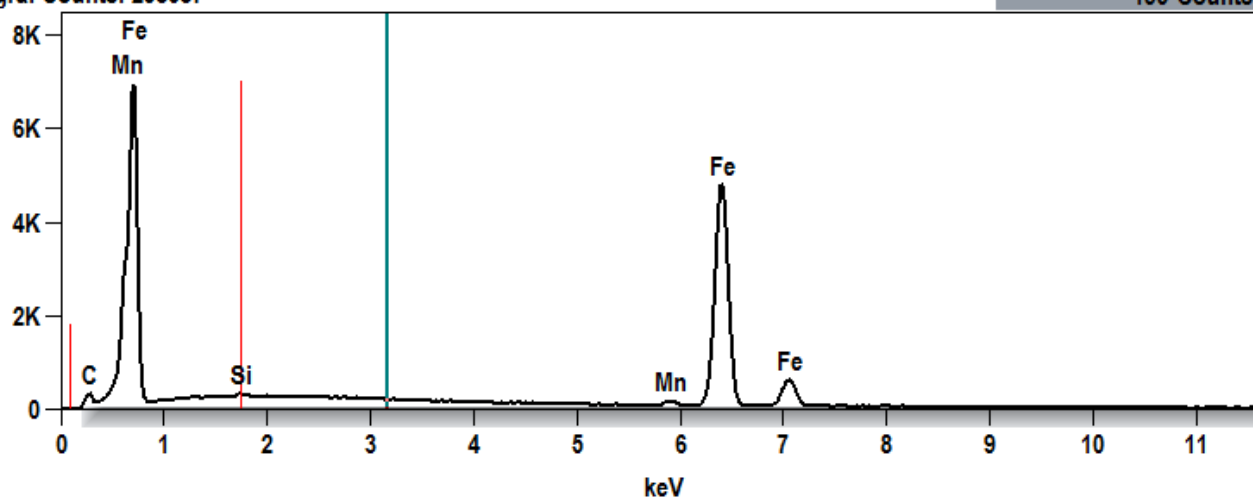


Image Name: JunttanD 500x 15kV(1)
 Image Resolution: 1024 by 768
 Image Pixel Size: 0.61 μ m
 Acc. Voltage: 15.0 kV
 Magnification: 500

Full scale counts: 6994
 Integral Counts: 298587

JunttanD 500x 15kV(1)_pt1

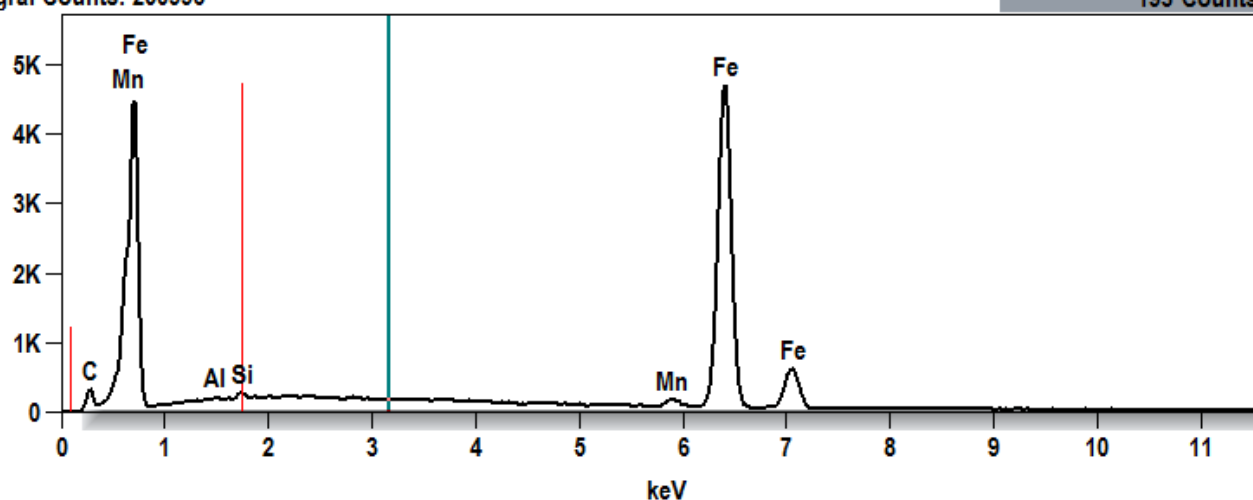
Cursor: 3.172 keV
 195 Counts

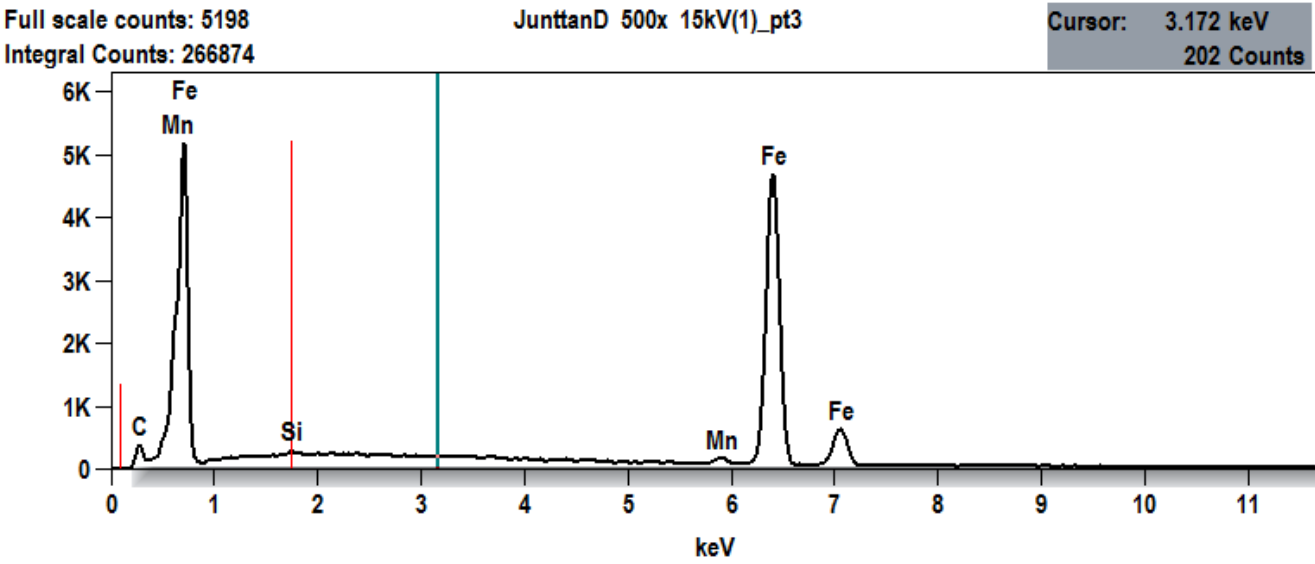


Full scale counts: 4704
 Integral Counts: 250996

JunttanD 500x 15kV(1)_pt2

Cursor: 3.172 keV
 193 Counts





Weight %

	<i>C</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Fe</i>
<i>JunttanD 500x 15kV(1)_pt1</i>	3.61		0.22	1.87	94.30
<i>JunttanD 500x 15kV(1)_pt2</i>	4.17	0.14	0.24	1.54	93.91
<i>JunttanD 500x 15kV(1)_pt3</i>	4.92		0.17	1.70	93.22

Atom %

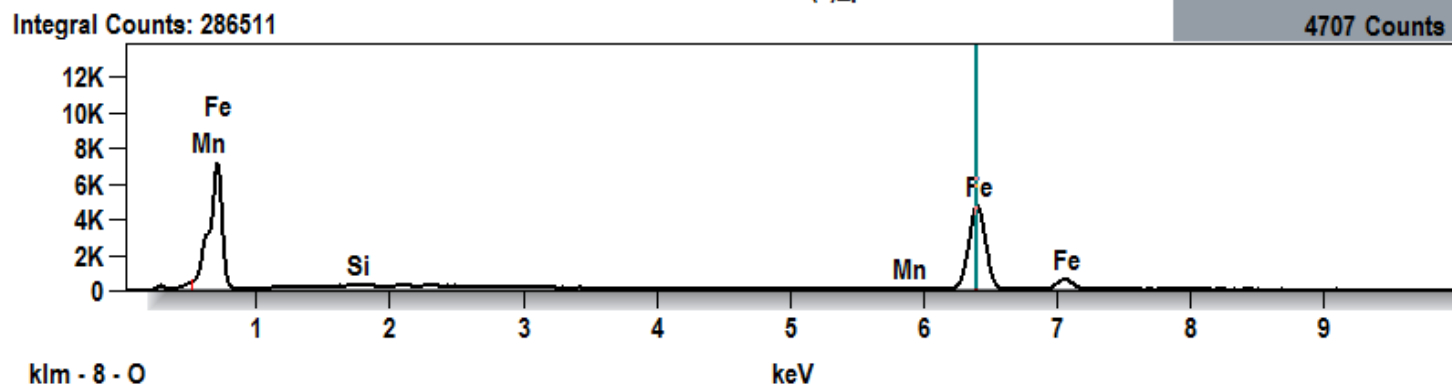
	<i>C</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Fe</i>
<i>JunttanD 500x 15kV(1)_pt1</i>	14.81		0.38	1.68	83.14
<i>JunttanD 500x 15kV(1)_pt2</i>	16.76	0.24	0.42	1.36	81.23
<i>JunttanD 500x 15kV(1)_pt3</i>	19.36		0.29	1.46	78.90

Mittauspisteen 1 tulokset, ilman hiiltä

Full scale counts: 9721

JunttanA 500x 15kV(1)_pt1

Cursor: 6.398 keV
4707 Counts



Live Time: 15.0 sec.

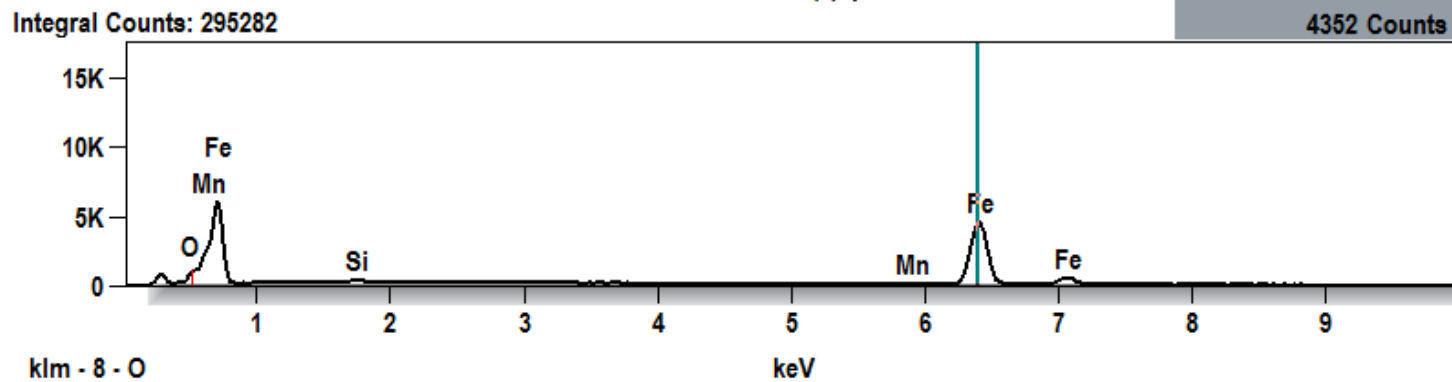
Quantitative Results for: JunttanA 500x 15kV(1)_pt1

Element	Weight %	Atom %
Si	0.33	0.66
Mn	1.93	1.95
Fe	97.74	97.39
Total	100.00	100.00

Full scale counts: 9721

JunttanB 500x 15kV(1)_pt1

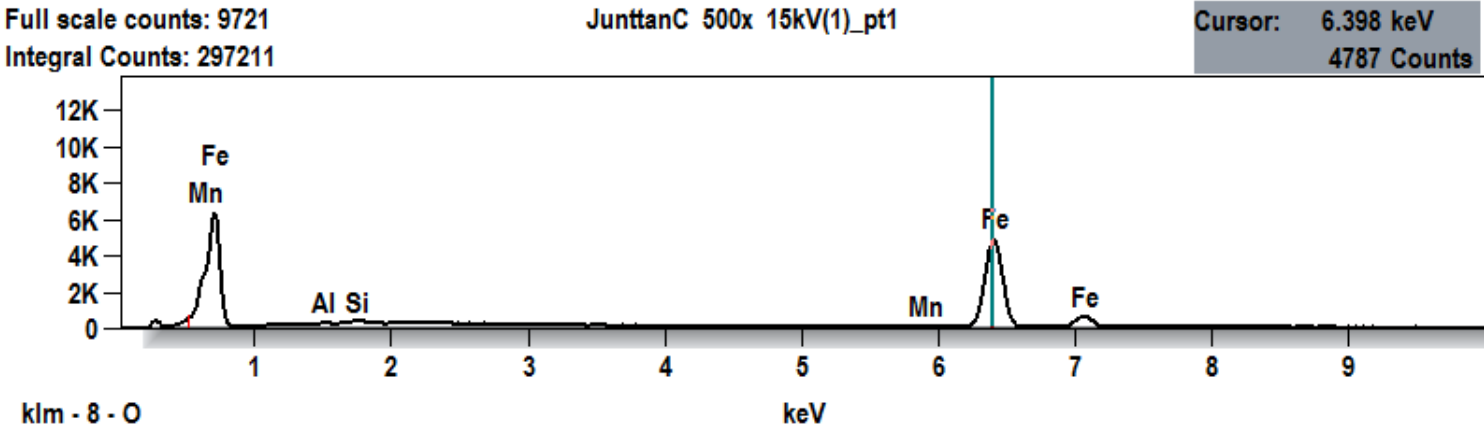
Cursor: 6.398 keV
4352 Counts



Live Time: 30.0 sec.

Quantitative Results for: JunttanB 500x 15kV(1)_pt1

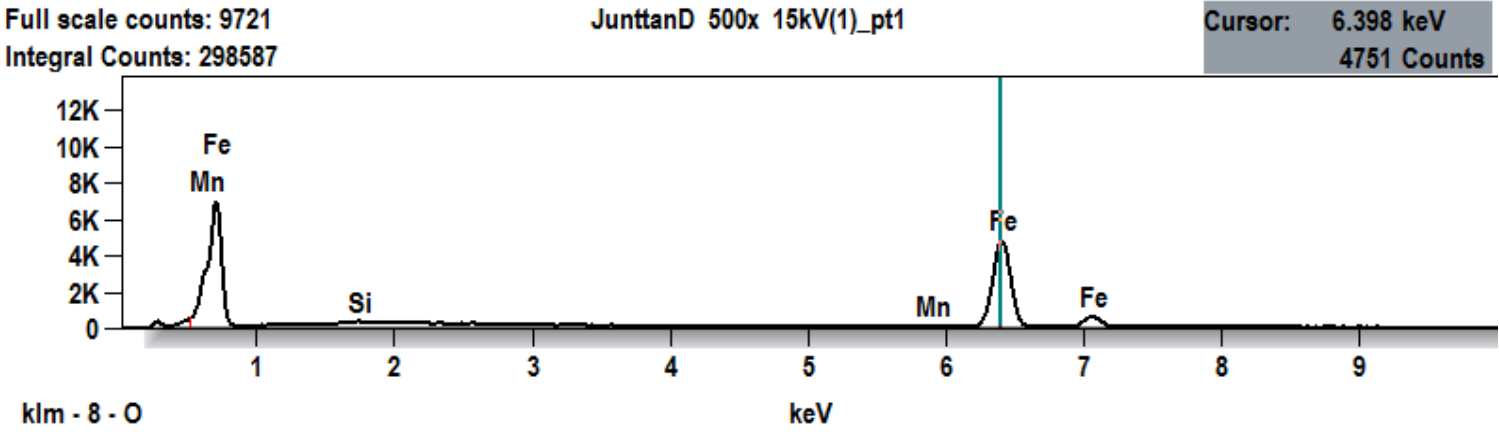
Element	Weight %	Atom %
O	1.48	4.96
Si	0.66	1.25
Mn	0.80	0.78
Fe	97.06	93.01
Total	100.00	100.00



Live Time: 30.0 sec.

Quantitative Results for: JunttanC 500x 15kV(1)_pt1

Element	Weight %	Atom %
Al	0.10	0.20
Si	0.47	0.94
Mn	1.45	1.47
Fe	97.97	97.39
Total	100.00	100.00



Live Time: 30.0 sec.

Quantitative Results for: JunttanD 500x 15kV(1)_pt1

Element	Weight %	Atom %
Si	0.23	0.46
Mn	1.94	1.97
Fe	97.83	97.58
Total	100.00	100.00

Aluemitauksen tulokset

JunttanA 200x 20kV(1)

250 µm

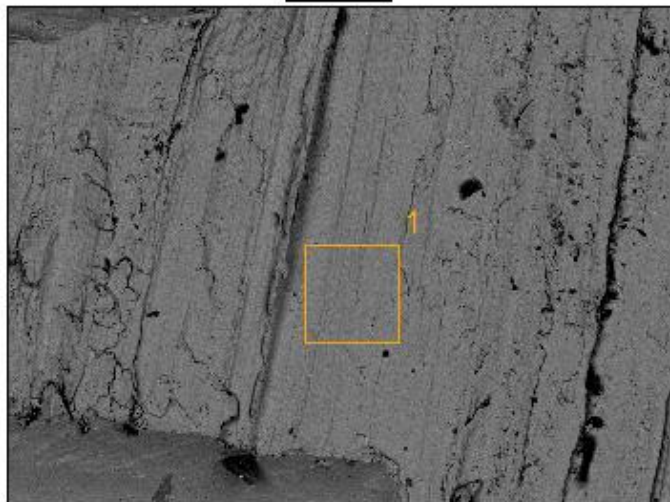


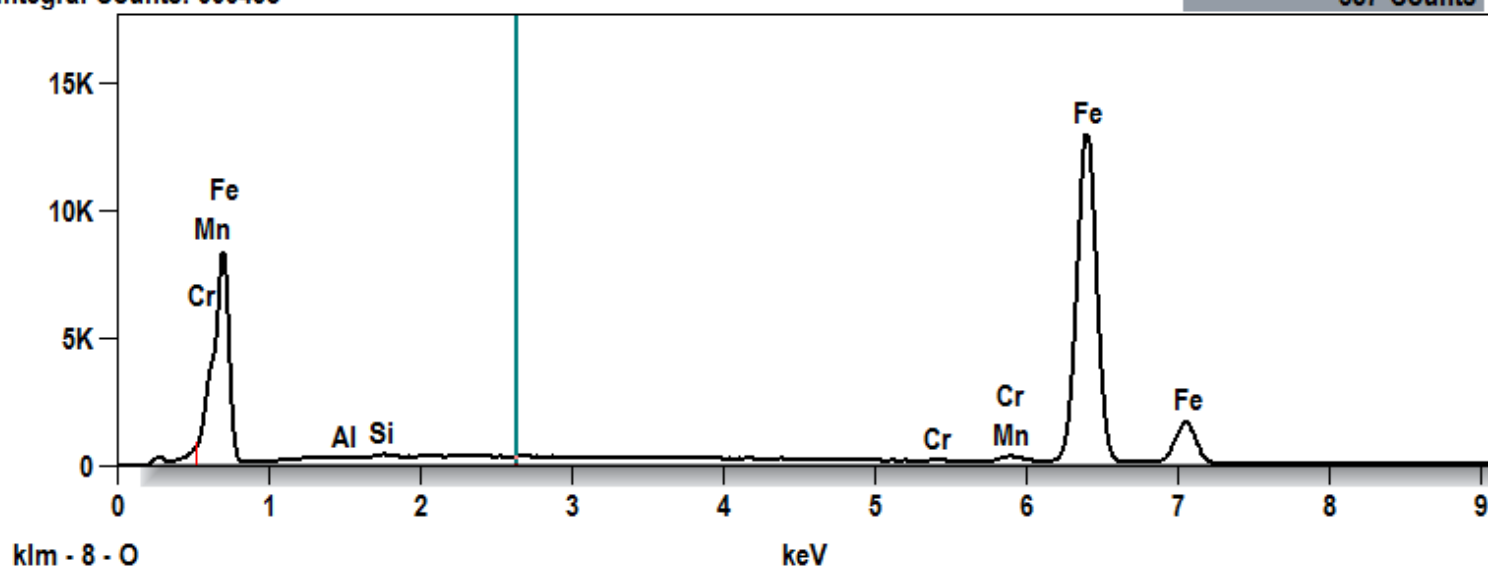
Image Name: JunttanA 200x 20kV(1)
Image Resolution: 1024 by 768
Image Pixel Size: 1.52 µm
Acc. Voltage: 20.0 kV
Magnification: 200

Full scale counts: 13048

Integral Counts: 550498

JunttanA 200x 20kV(1)_pt1

Cursor: 2.643 keV
387 Counts



Weight %

	Al	Si	Cr	Mn	Fe
JunttanA 200x 20kV(1)_pt1	0.14	0.29	0.13	1.61	97.84

Atom %

	Al	Si	Cr	Mn	Fe
JunttanA 200x 20kV(1)_pt1	0.28	0.58	0.14	1.63	97.38

JunttanB 200x 20kV(1)

250 µm

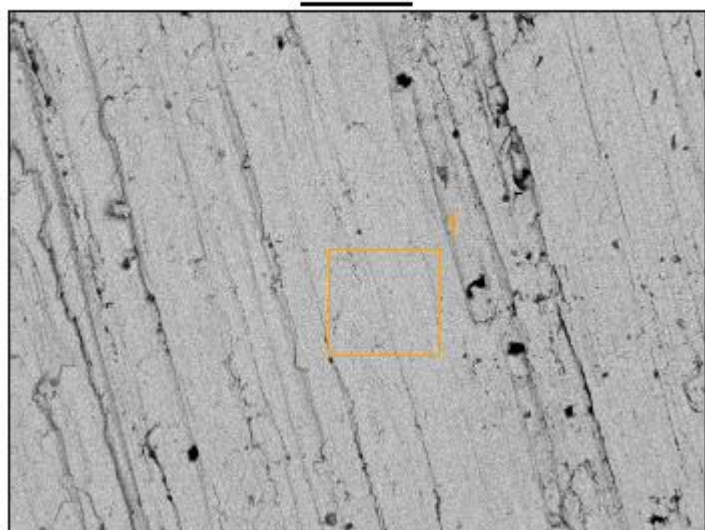


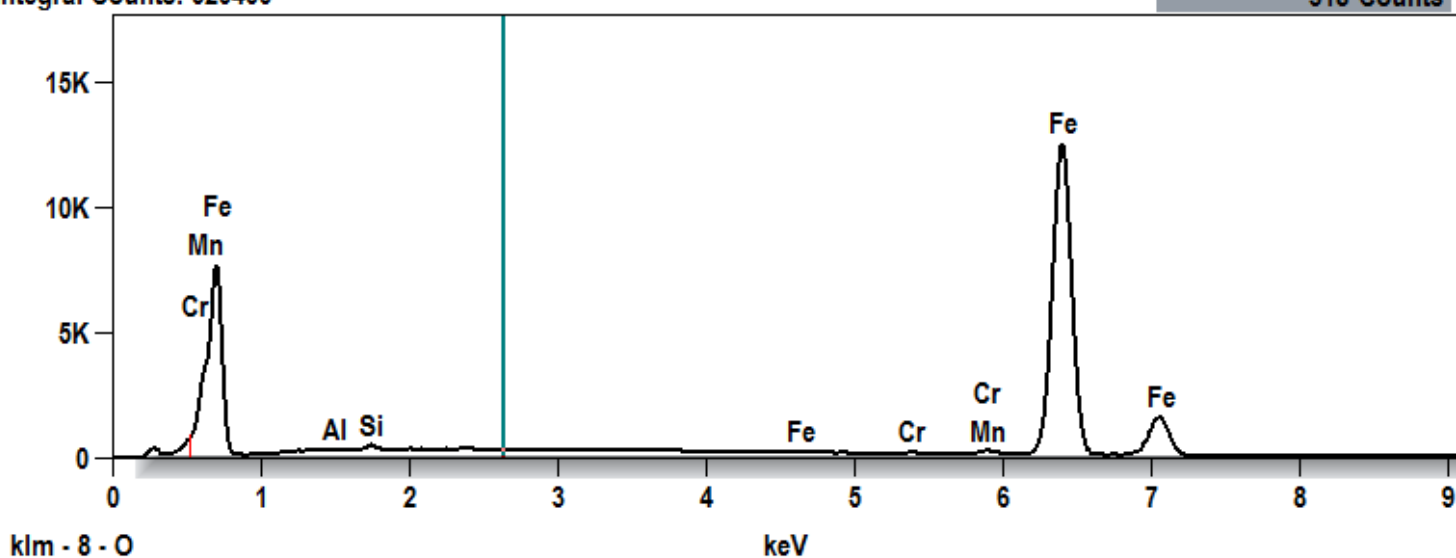
Image Name: JunttanB 200x 20kV(1)
Image Resolution: 1024 by 768
Image Pixel Size: 1.52 µm
Acc. Voltage: 20.0 kV
Magnification: 200

Full scale counts: 13048

Integral Counts: 520400

JunttanB 200x 20kV(1)_pt1

Cursor: 2.643 keV
318 Counts



Weight %

	Al	Si	Cr	Mn	Fe
JunttanB 200x 20kV(1)_pt1	0.19	0.41	0.12	0.82	98.45

Atom %

	Al	Si	Cr	Mn	Fe
JunttanB 200x 20kV(1)_pt1	0.39	0.82	0.13	0.83	97.83

JunttanC 200x 20kV(1)

250 µm

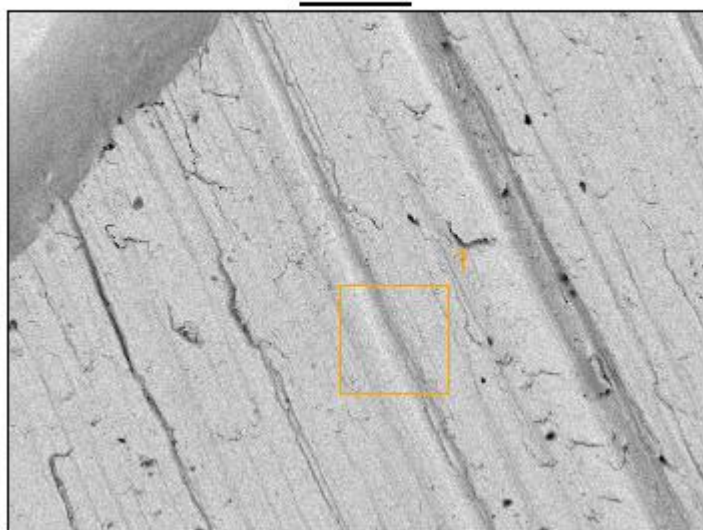


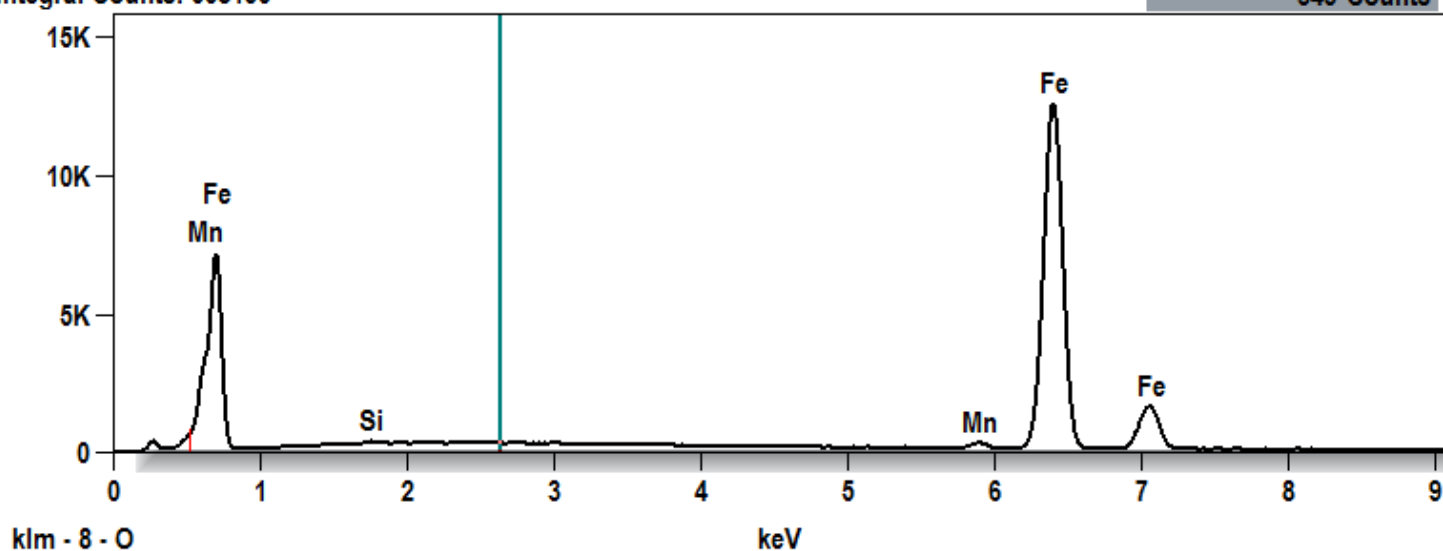
Image Name: JunttanC 200x 20kV(1)
Image Resolution: 1024 by 768
Image Pixel Size: 1.52 µm
Acc. Voltage: 20.0 kV
Magnification: 200

Full scale counts: 13048

Integral Counts: 508195

JunttanC 200x 20kV(1)_pt1

Cursor: 2.643 keV
349 Counts



Weight %

	Si	Mn	Fe
JunttanC 200x 20kV(1)_pt1	0.20	1.32	98.47

Atom %

	Si	Mn	Fe
JunttanC 200x 20kV(1)_pt1	0.40	1.34	98.26

JunttanD 200x 20kV(1)

250 µm

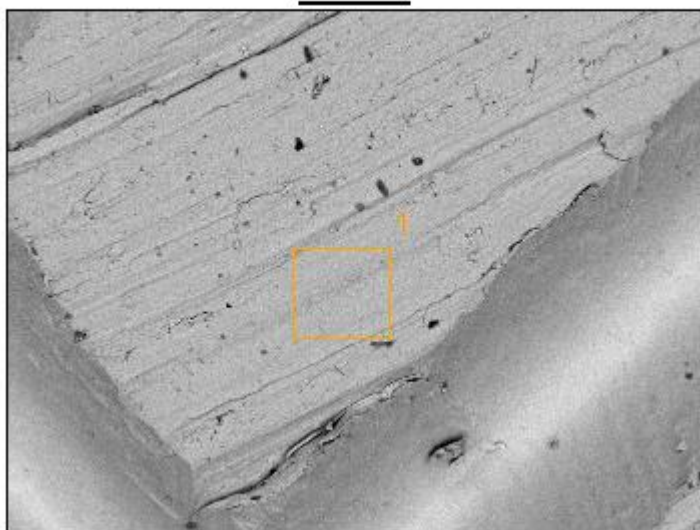


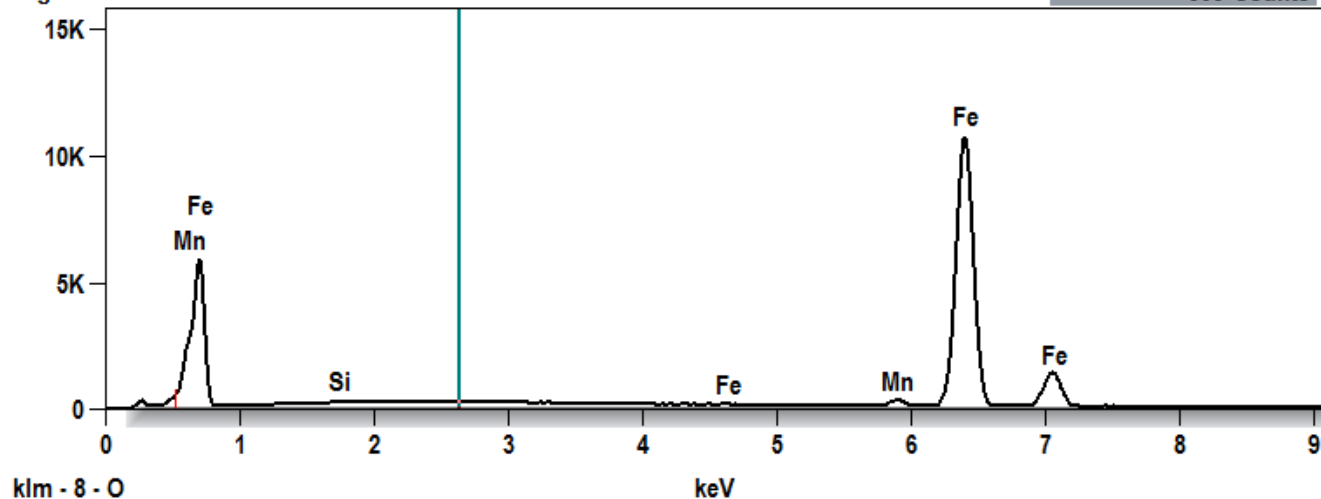
Image Name: JunttanD 200x 20kV(1)
Image Resolution: 1024 by 768
Image Pixel Size: 1.52 µm
Acc. Voltage: 20.0 kV
Magnification: 200

Full scale counts: 13048

JunttanD 200x 20kV(1)_pt1

Cursor: 2.643 keV
303 Counts

Integral Counts: 432444



Weight %

	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Fe</i>
<i>JunttanD 200x 20kV(1)_pt1</i>	0.23	1.91	97.85

Atom %

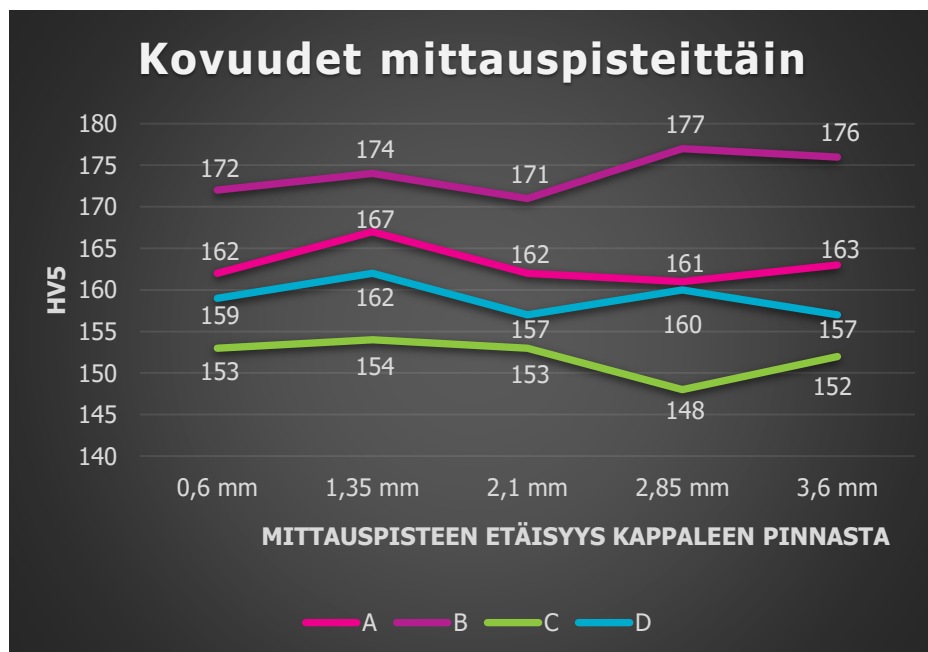
	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Fe</i>
<i>JunttanD 200x 20kV(1)_pt1</i>	0.46	1.94	97.60

Kovuusmittauksen mittauspöytäkirja

Paikka: Savonia-ammattikorkeakoulu, Materiaalitekniikan laboratorio
 Päivämäärä: 16.4.2019
 Standardi: ISO 6507-1:2018
 Mittaustapa: Vickers HV5
 Mittauslaite: DuraScan-20
 Mittausepävarmuus: Noin ± 7 HV10
 Mittauksen suorittaja: Juha Koponen

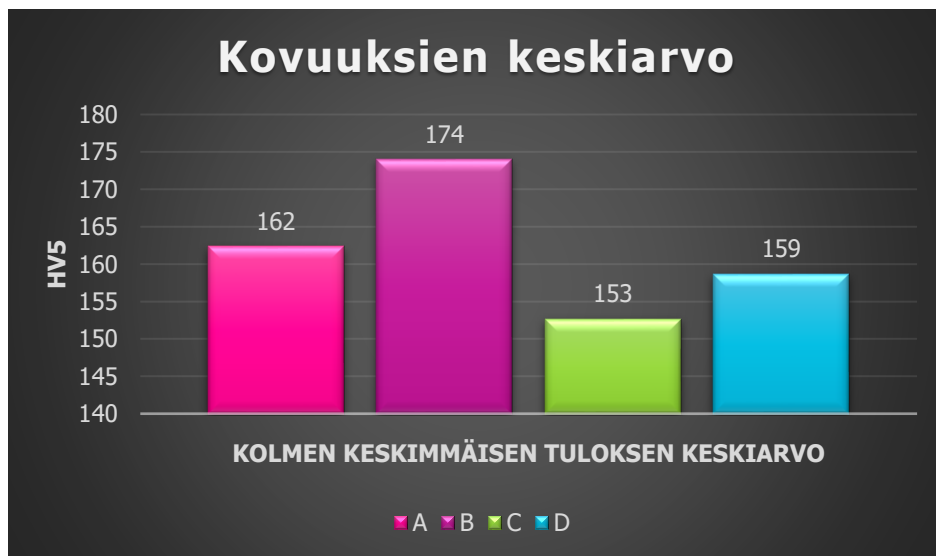
Mittausetäisyys pinnasta (mm)	A	B	C	D
0,6	162	172	153	159
1,35	167	174	154	162
2,1	162	171	153	157
2,85	161	177	148	160
3,6	163	176	152	157

Tulosten vertailu



Tuloksista poistettiin pienin ja suurin arvo. Kolmesta jäljellejääneistä otettiin kovuuden keskiarvo, jonka perusteella näytteitä vertaillaan opinnäytetyössä.

	A	B	C	D
1	161	171	148	157
2	162	172	152	157
3	162	174	153	159
4	163	176	153	160
5	167	177	154	162
Keskiarvo	162	174	153	159



13 LIITE 4. ISKUSITKEYDEN MITTAUSPÖYTÄKIRJA

Iskusitkeyden mittauspöytäkirja

Standardi: SFS-EN ISO 148-1

Koesauvan koko: L= 55 mm, W= 10 mm, B= 5 mm

Koesauvat merkattu materiaalin mukaan A, B, C ja D, ja numeroitu 1-12

Koelämpötilat: mittaus 1, +22 °C, mittaus 2, noin -20 °C, mittaus 3, noin -35 °C

Koe: Charby V-koe

Mittaus 1.

	A	B	C	D
1	82	28	77	80
2	90	25	75	84
3	89	28	79	82
4	97	29	69	81
Keskiarvo	92	28	77	82

Mittaus 2.

	A	B	C	D
5	61	14	72	86
6	47	14	72	85
7	61	15	65	79
8	63	14	69	81
Keskiarvo	62	14	72	83

Mittaus 3.

	A	B	C	D
9	50	12	54	87
10	43	9	64	85
11	44	11	76	83
12		10	72	78
Keskiarvo	47	11	59	83

Keskiarvot

	20 °C	-20 °C	-35 °C
A	92	62	47
B	28	14	11
C	77	72	59
D	82	83	83

Murtunut stanssausjäljestä, ei huomioida lopullisissa tuloksissa
murtunut täydellisesti

