



SAVONIA

■ OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

KOVAHITSIPINNOITETTUJEN TERÄSLEVYJEN ABRASIIVINEN KULUMINEN

TEKIJÄ: Petri Viitala

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma			
Työn tekijä(t) Petri Viitala			
Työn nimi Kovahitsipinnoitettujen teräslevyjen abrasiivinen kuluminen			
Päiväys	12.5.2016	Sivumäärä/Liitteet	104/4
Ohjaaja(t) Lehtori Mika Mäkinen, lehtori Tatu Westerholm			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Somotec Oy, Impoweld Oy, Impoinvest Oy, SKM Service Oy			
Tiivistelmä <p>Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia ja vertailla erilaisia kulutusta kestäviä kovahitsipinnoitettuja teräslevyjä eli ns. panssarilevyjä abrasiivisen kulutuksen kannalta. Työ oli osa Savonia-ammattikorkeakoulu Oy:n, Itä-Suomen yliopiston ja Savon koulutuskuntayhtymän yhteistä MaTKI-hanketta. Siihen osallistui myös maahan-tuojayritykset Somotec Oy, Impomet Oy, Impoinvest Oy ja SKM Service Oy.</p> <p>Tutkimustulosten tuli auttaa näitä tuotteita maahantuovia ja niitä käyttäviä yrityksiä niiden etsiessä keinoja kuluminen torjumiseksi. Tutkimustulosten tuli kertoa levyjen käyttäytymisen abrasiivisessa kulumisessa sekä niiden kovuuden ja karbidien jakautumisen pinnoitteissa.</p> <p>Tutkimusmenetelminä työssä käytettiin kovuuksien mittaamista Rockwell- ja Vickers-laitteilla, makro- ja mikro-hietarkastelua valo-optisella mikroskoopilla ja pyyhkäisymikroskoopilla (SEM) sekä ns. kumipyöräabraasiokoetta. Teoriamateriaali kerättiin standardeista, kirjallisuudesta, internetistä ja suoraan maahantuojilta. Tutkimusmateriaalit eli koekappaleet saatiin tutkimukseen osallistuvilta yrityksiltä.</p> <p>Tutkimustuloksina saatiin kaikille tuotteille niiden kovahitsin Rockwell- ja Vickers-kovuudet, alkuainepitoisuudet ja kulutuksenkestoarvot. Näiden tulosten perusteella tuotteita vertailtiin toisiinsa. Tutkimustulokset lähetettiin mukana tutkimuksessa olleille yrityksille. Tulevaisuudessa tutkimuksesta on tarkoitus tehdä kotimainen ja kansainvälinen julkaisu.</p>			
Avainsanat kovahitsaus, panssarilevy, abrasiivinen kuluminen,			
Julkinen			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Mechanical Engineering			
Author(s) Petri Viitala			
Title of Thesis Abrasive Wear of Hard Overlay Welded Steel Plates			
Date	May 12, 2016	Pages/Appendices	104/4
Supervisor(s) Mr. Mika Mäkinen, Senior Lecturer, Mr. Tatu Westerholm, Senior Lecturer			
Client Organisation /Partners Somotec Ltd, Impoweld Ltd, Impoinvest Ltd, SKM Service Ltd			
<p>Abstract</p> <p>The aim of this final year project was to research and compare a variety of wear resistant hard overlay welded steel plates concerning abrasive wearing. The work was part of a common MaTKI-project of Savonia University of Applied Sciences, University of Eastern Finland and Savo Consortium for Education. Four importer companies: Somotec Ltd, Impoweld Ltd, Impoinvest Ltd, SKM Service Ltd participated in the project as well. The research aimed at helping the importer companies of these products and their clients in the search for ways to prevent wear.</p> <p>The research methods used in this thesis were the hardness test by Rockwell and Vickers methods, the rubber wheel abrasion test and macro- and micro-structure reviewing by light optical microscope and scanning electron microscope (SEM). The theoretical material about wear and hardfacing was collected from the internet, standards, publications and importer companies. Sample pieces were obtained from the companies participating in the research.</p> <p>The results showed the abrasive wear behavior of the plates, Rockwell and Vickers hardness and the elemental concentrations in the overlay. Based on these results, products were compared to each other. The results were sent to companies who were involved in the research. It is planned to make domestic and international publications about the research in the future.</p>			
Keywords hardfacing, abrasion wear, hard overlay welded steel plate			
public			

ESIPUHE

Tämä opinnäytetyö on tehty Savonia-ammattikorkeakoulun Kuopion konetekniikan osastolle ja se on osa MaTKI-hanketta, jossa oppilaitos on mukana.

Haluan kiittää opiskeluajastani koko Savonia-ammattikorkeakoulun henkilökuntaa. Kiitän opinnäytetyössä saamastani avusta ja opastuksesta työn ohjaajaa, lehtori Mika Mäkistä sekä projekti-insinööri Arvo Tiilikaista ja laboratoriomestari Juhani Mikkosta. Lisäksi haluan kiittää opinnäytetyöni yhteistyökumppaneita Somotec Oy:tä, Impomet Oy:tä, Impoinvest Oy:tä sekä SKM Service Oy:tä. Kiitän myös opiskelutovereitani kaveruudesta, hyvästä yhteishengestä ja tuesta opiskelussani.

Erityiskiitokset vaimolleni Niinalle ja lapsilleni Nealle, Jennalle ja Jesselle sekä ystävilleni, jotka ovat jaksaneet rinnallani koko tämän opiskeluajan tukien ja motivoiden minua hyviin suorituksiin, kun oma usko on ollut koetuksella.

Leppävirralla 12.5.2016



Petri Viitala

ESIPUHE.....	4
1 JOHDANTO	7
2 YRITYSESITTELYT	8
2.1 Somotec Oy.....	8
2.2 SKM Service Oy	8
2.3 Impomet Oy	8
2.4 Impoinvest Oy	9
3 KULUMISEN TEORIAA.....	10
3.1 Hionta- eli abrasiivinen kuluminen.....	12
3.2 Tartunta- eli adhesiivinen kuluminen	14
3.3 Tribokemiallinen kuluminen	14
3.4 Väsymiskuluminen	14
4 KULUMISEN TORJUNTA METALLITEOLLISUUDESSA	15
4.1 Kovahitsaus.....	15
4.2 Panssarilevyt	17
5 TUTKITTAVAT TUOTTEET	18
5.1 Coroplate-panssarilevyt	18
5.2 Impoweld-W-panssarilevyt	20
5.3 Ultraplate-panssarilevyt.....	21
5.4 Vautid-panssarilevyt.....	24
5.5 SKM Ceramic 1 -keraamit	26
5.6 Hardox-kulutuslevyt	26
6 TUTKIMUSMETELMÄT JA TULOKSET	27
6.1 Kovuusmittaukset	27
6.2 Makrohietutkimukset stereomikroskoopilla ja dokumenttikameralla	39
6.3 Pyyhkäisyelektronimikroskooppitutkimukset (SEM)	45
6.4 Mikroskooppitutkimukset	57
6.5 Kumipyöräabraasiokoe	65
6.6 Tutkimustulosten ja tuotteiden vertailu.....	77
7 LOPPUPÄÄTELMÄT	79
LÄHTEET	80
LIITE 1: ROCKWELLIN KOVUUSKOKEEN (HRC) MITTAUSPÖYTÄKIRJA	83

LIITE 2: VICKERSIN KOVUUSKOKEEN MITTAUSPÖYTÄKIRJA	86
LIITE 3: EDS-ANALYYSIRAPORTTI (SEM)	89
LIITE 4: KUMIPYÖRÄABRAASIOKOKOEN MITTAUSPÖYTÄKIRJA.....	102

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö on tehty osana Itä-Suomen yliopiston, Savonia-ammattikorkeakoulun ja Savon koulutuskuntayhtymän yhteistä MaTKI-hanketta, jossa on tarkoituksena toteuttaa materiaalitekniikan TKI-keskuksen konseptointi ja toiminnan käynnistäminen Pohjois-Savossa. Projektin päätavoitteena on tiedottaa yrityksille alueen oppilaitosten materiaalitekniikan asiantuntemuksen, laitekannan, TKI-infrastruktuurin ja muiden palveluiden mahdollisuuksista sekä näiden mainittujen palveluiden liittäminen osaksi Pohjois-Savon yritysten tutkimus-, kehitys-, koulutus- ja innovaatiotoimintaa. (Pohjois-Savon Liitto, 2015)

Työn aihe tuli Savonia-ammattikorkeakoulun lehtori Mika Mäkiselältä, jolta tämän opinnäytetyön tekijä tiedusteli syksyllä 2015 opinnäytetyön tekemisen mahdollisuutta Savonia-ammattikorkeakoululle. Lehtori Mika Mäkinen myös ohjasi tämän opinnäytetyön. Tutkimukseen otti osaa myös neljä suomalaista yritystä, jotka toimittivat maahantuomaansa tai edustamaansa materiaalia tutkittavaksi. Mukana olevat yritykset ovat Somotec Oy, SKM Service Oy, Impomet Oy ja Impoinvest Oy.

Työn tavoitteena on tutkia ja vertailla markkinoilla olevien kulutusta kestävien kovahitsipinnoitettujen teräslevyjen eli ns. panssarilevyjen abrasiivista kulumista Kuopiossa Itä-Suomen yliopistolla ja Savonia-ammattikorkeakoululla olemassa olevilla laitteilla.

Työn teoriaosuudessa tutustutaan kulumiseen, neljään tärkeimpään kulumismekanismiin, kovahitsaukseen, tutkittaviin materiaaleihin ja tässä tutkimuksessa käytettäviin tutkimusmenetelmiin. Tutkimusvaiheessa pääpaino on panssarilevyjen abrasiivisen kulumisen, kovuuden ja mikrorakenteen tutkimisessa.

Kulumisen aiheuttaa suuria kuluja teollisuudelle ja siksi sitä myös tutkitaan paljon. Myös kulumisen estämiseen keskittyneet yritykset haluavat tietoa, jotta voivat palvella asiakkaitaan mahdollisimman hyvin räätälöimällä tuotteensa juuri näiden tarpeisiin sopiviksi. Tämän tutkimuksen tulokset auttavat niin panssarilevyjen toimittajia kuin tuotteita käyttäviä yrityksiäkin niiden etsiessä keinoja kulumisen hillitsemiseksi.

2 YRITYSESITTELYT

Tutkimukseen otti osaa neljä panssarilevyjen maahantuojayritystä ympäri Suomea: kuopiolainen Somotec Oy, pattijokelainen SKM Service Oy, tamperelainen Impomet Oy sekä tämän tytäryhtiö Impoinvest Oy. Yritykset ovat keskittyneet pääosin kulumisen torjuntaan liittyvien palvelujen tuottamiseen ja niihin tarkoitettujen tuotteiden edustamiseen ja maahantuontiin.

2.1 Somotec Oy

Kuopiolainen perheyritys Somotec Oy on erikoistunut erityisesti panssarilevyjen, hitsauslisäaineiden, erilaisten juotteiden sekä peittäusaineiden ja -tarvikkeiden maahantuontiin, myyntiin ja markkinointiin. Tuotevalikoiman ja toiminnan painopiste on kulumisen ja korroosion torjuntaan liittyvissä tuotteissa ja niihin liittyvissä palveluissa. Yritys toimittaa kansainvälisesti tunnettuja ja korkealle arvostettuja hitsausalan tuotteita teollisuudelle valmistukseen, kunnossapitoon ja korjaustarpeisiin. Se edustaa Corodurin kulutusta kestäviä hitsaustuotteita ja panssarilevyjä. (Somotec Oy, 2016a)

Somotec Oy on perustettu vuonna 1972, ja yritys työllistää tällä hetkellä kolme henkilöä. Yrityksen liikevaihto vuonna 2015 oli 944 000 euroa. (Suomen Asiakastieto Oy, 2016)

2.2 SKM Service Oy

SKM Service Oy Raahen Pattijoelta tarjoaa erilaisia palveluja teollisuuden tarpeisiin. Yrityksen erikoisosaamista ovat monipuoliset teollisuuden asennus-, ylläpito- ja kunnossapitotyöt, kuten säiliöiden korjaukset, putkistojen rakentaminen, asentaminen ja uusiminen, koneiden ja laitteiden asennukset, teräsrakenteisiin liittyvät työt sekä veto- ja valvontatehtävät seisakkeihin, investointeihin ja kunnossapitoon liittyvissä projekteissa. Yritys toimittaa, suunnittelee, esivalmistaa ja asentaa myös panssari- ja kovapinnoitelevyjä. Yritys on panssarilevyjä valmistavan Tecknoweld Alloysin valtuuttama kovapinnoitetuotteiden toimittaja Suomessa ja Ruotsissa. (SKM Service Oy, 2013)

SKM Service Oy on perustettu vuonna 2013, ja vuonna 2014 se työllisti 20 henkilöä. Yrityksen liikevaihto vuonna 2014 oli lähes 4,2 miljoonaa euroa. (Suomen Asiakastieto Oy, 2015a)

2.3 Impomet Oy

Tamperelainen Impomet Oy on erikoistunut kova-, korjaus- ja tuotantohitsauksen lisäaineiden maahantuontiin, myyntiin, asentamiseen ja markkinointiin. Tuotevalikoimaan kuuluvat myös panssarilevyt ja kulutuksen kestävät komposiitit. Yritys järjestää myös kulumisensorjunta- ja korjaushitsauskursseja. Impomet Oy on Shotecin ja Vautidin panssarilevyjen edustaja Suomessa. (Impomet Oy, 2007)

Impomet Oy on perustettu vuonna 1974, ja se työllisti 10 henkilöä vuonna 2014. Yrityksen liikevaihto vuonna 2014 oli noin 1,9 miljoonaa euroa. (Suomen Asiakastieto Oy, 2015b)

2.4 Impoinvest Oy

Impoinvest Oy on Impomet Oy:n tytäryhtiö. Yritys on erikoistunut erityisesti kulumisensorjuntaan liittyviin tuotteisiin ja palveluihin. Yritys toimittaa ja asentaa kulumista kestäviä tuotteita ja erilaisia pinnoitemateriaaleja. Impoinvest Oy edustaa Suomessa Kalenbornin panssarilevyjä, joita se markkinoi nimellä Impoweld. (Impoinvest Oy, 2016a)

Impoinvest Oy on perustettu vuonna 1991. Yrityksen liikevaihto vuonna 2014 oli 858 000 euroa. (Suomen Asiakastieto Oy, 2015c)

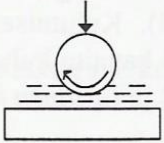
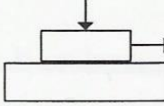
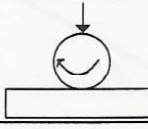
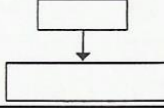
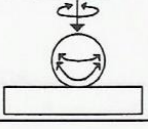
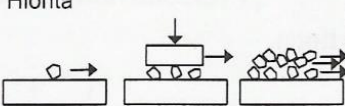
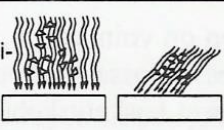
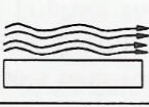
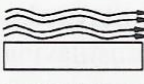
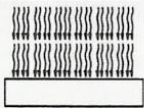

3 KULUMISEN TEORIAA

Kuluminen on yksi tribologisista ilmiöistä. Tribologiaksi kutsutaan tutkimusaluetta, jossa tarkastellaan kitkan, kulumisen ja voitelun merkitystä teollisuudessa lähinnä konetekniikan alueella. Kulumisessa aiheutuu materiaalihäviötä, jota syntyy kahden tai useamman kappaleen ollessa jonkinlaisessa suhteellisessa liikkeessä toisiinsa nähden. Kulumista tapahtuu toisin sanoen kappaleiden hangatessa, värähdellessä, iskeytyessä, vierissä tai liukuessa toisiaan vasten. Kulumista tapahtuu myös kappaleiden joutuessa neste- tai kaasuvirtaukseen, joissa mukana saattaa olla myös kiinteitä partikkeleita eli esimerkiksi metallihiukkasia tai muita epäpuhtauksia. Kulumiseen vaikuttavat tärkeimmät tekijät ovat käytössä olevat materiaalit ja niiden geometria, ympäristö- ja käyttöolosuhteet, kosketuspintojen koko sekä suhteellisen liikkeen kinematiikka eli nopeus, kiihtyvyyys tai pyörivän liikkeen kulmanopeus. (Kivioja;Kivivuori;& Salonen, 1997, ss. 11-12 ja 97)

Kuluminen on lähes aina haitallinen ilmiö teollisuudessa, koska siitä aiheutuu vuositasolla erittäin suuria kuluja. Kulumista voidaan kuitenkin myös hyödyntää esimerkiksi työstömenetelmänä las-tuavassa työstössä tai laakerien sisäänajossa toivottujen toimintaolosuhteiden saavuttamiseksi. (Kivioja;Kivivuori;& Salonen, 1997, s. 97)

Kuluminen jaetaan standardin DIN 50320 mukaan neljään mekanismiin: hionta- eli abrasiivinen kuluminen, tartunta- eli adhesiivinen kuluminen, kitka- eli tribokemiallinen kuluminen ja väsymiskuluminen (DIN 50320, 1979). Myös muita lajitteluperusteita käytetään ja jakoja mekanismeihin tarkennetaan nykyään mm. erilaisilla kulumiskartoilla. Kuva seuraavalla sivulla hahmottaa varsin selvästi kulumisen klassisen luokittelun kulumistyyppin ja -mekanismin mukaan (kuva 1). Kuluviissa kappaleissa on vaikuttamassa yhtä tai useampaa kulumismekanismia ja aina ei ole selvää syytä, mistä kuluminen johtuu. Tästä syystä kappaleiden tarkempaa kulumista on yleensä hankala tutkia. Ymmärtääkseen kulumista erilaiset kulumistyyppit ja -mekanismit on tunnettava ja osattava erottaa toisistaan. Yleensä prosessia tarkemmin tutkimalla löydetään ainakin yksi hallitseva kulumistekijä tai -mekanismi. (Kivioja;Kivivuori;& Salonen, 1997, s. 100)

Kulumista on yritetty laskea useilla erilaisilla kaavoilla, mutta kaikkien muuttujien mukaan ottaminen tuntuu lähes mahdottomalta. Kulumisen on kuitenkin pystytty osoittamaan olevan suoraan verrannollinen kappaleeseen kohdistuvaan kuormitukseen ja kääntäen verrannollinen sen lujuuteen. Kulumisen suuruutta taas voidaan mitata matkan funktiona suhteellisenä arvona, jolloin materiaalin tilavuus suhteutetaan liukumismatkaan. Tässä tutkimuksessa kulumista mitataan painohäviönä kulumisaikaan suhteutettuna, koska oletetaan kaikkien tutkittavien kappaleiden tiheyden olevan sama. Kulumista tutkittaessa on eroteltavissa selvästi kaksi vaihetta: sisäänajokuluminen ja tasainen kuluminen. Liikkeen alkaessa kuluminen on voimakkaimmillaan ja se tasoittuu vakioksi kosketuspintojen pinnankarheuden tasoittuessa ja epäpuhtauksien poistuessa kosketuspinoilta. (Kivioja;Kivivuori;& Salonen, 1997, ss. 102-103)

Systeemin rakenne	Kulumisen aiheuttava rasiustyyppi	Kulumistyyppi	Kulumismekanismi			
			Adheesio	Abraasio	Pinnanväsyminen	Tribo-kemiallinen
Kiinteiden pintojen välissä voiteluaine	Liukuminen Vierintä Isku Sysäykset 				X	X
Kiinteät pinnat toisiaan vasten	Liukuminen 	Liukumis-kuluminen	X	X	X	X
	Vierintä 	Vierintä-kuluminen	X	X	X	X
	Iskukuormitus 	Isku-kuluminen	X	X	X	X
	Värähtely 	Värähtely-kuluminen	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 1 Kulumistyyppit ja -mekanismit (Kivioja;Kivivuori;& Salonen, 1997, s. 101)

3.1 Hionta- eli abrasiivinen kuluminen

Abrasiivinen kuluminen eli abraasio on yleisin kulumismekanismi metalliteollisuudessa (esim. sintraamot), kaivosteollisuudessa (esim. murskaimissa, kuljettimissa), maataloudessa ja maansiirtoalalla (esim. maatalous- ja maansiirtokoneiden kauhat). Lähes 55 % teollisuuden eri alueilla esiintyvistä kulumisvaurioista on abrasiivisesta kulumisesta johtuvia (Kivistö, 1998).

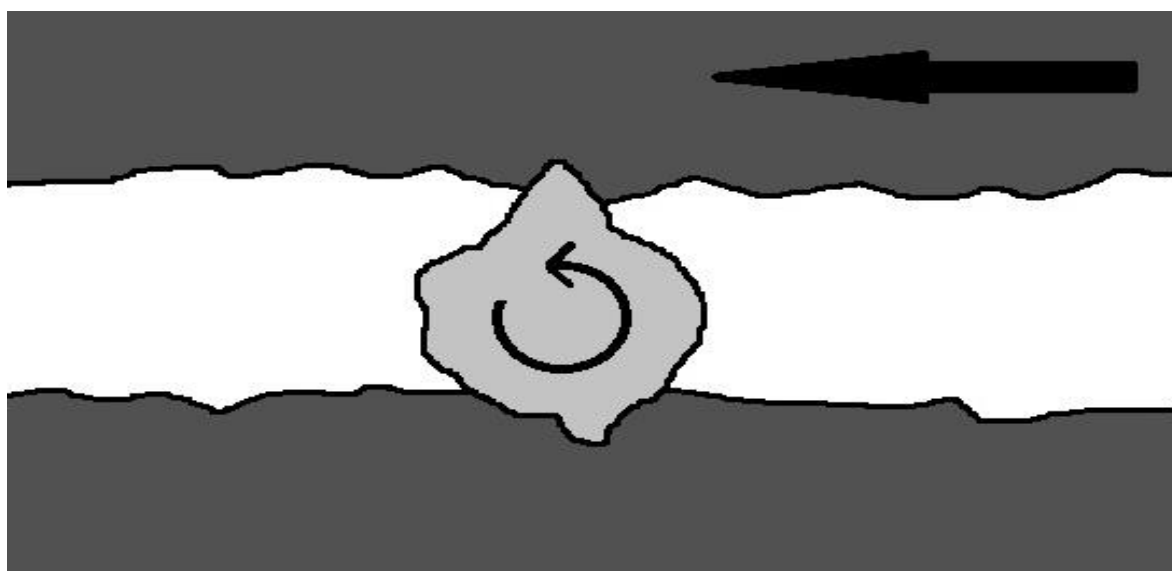
Abrasiivinen kuluminen on kovien ja hiovien partikkeleiden jauhautumista, iskeytymisestä, virtaamista, vierimistä tai liukumista yhtä tai useampaa pintaa vastaan. Abraasio voi johtua myös toisen kiinteän pinnan värähtelystä, iskeytymisestä, liukumisesta tai vierimisestä pehmeämpää pintaa vasten. Yleisesti puhutaan kahden kappaleen tai kolmen kappaleen abrasiivisesta kulumisesta (kuva 2 ja kuva 3). Pinta tai pinnat ovat tällöin pehmeämpää materiaalia kuin partikkelit, jolloin partikkelit pääsevät tunkeutumaan pintaan tai pintoihin aiheuttaen kulumista pääosin kyntämällä, hauraasti murtumalla tai lastuavan työstön mekanismeilla, kuten hioutumalla. Yleensä kulumisessa tärkeimpinä muuttujina olevien kuluttavien partikkeleiden koko, muoto, paine ja nopeus vaihtelevat. Adheesio ja tribokemiallinen kuluminen voivat ajan myötä kehittyä abrasiiviseksi kulumismekanismiksi, koska näissä kulumismekanismeissa irtoavat partikkelit saattavat kovettua muokkauslujittumisen johdosta pintaa tai pintoja kovemmiksi ja alkavan siten kuluttaa abraasion tavoin niiden kanssa kosketukseen joutuvia pintoja. (Kivioja;Kivivuori;& Salonen, 1997, ss. 108-111)

Materiaalien abrasiivista kulumista voidaan minimoida käyttämällä kulutukselle alttiina olevissa materiaaleissa kuluttavia partikkeleita kovempaa pintakovuutta. Muita keinoja ovat materiaalin kuuma-
lujuuden, muokkauslujittumiskyvyn ja työstökarkenevuuden lisääminen. Abraasiota voidaan torjua myös muuttamalla pintaan iskeytyvien kuluttavien partikkeleiden iskeytymiskulmaa, lyhentämällä kuluttavien partikkeleiden liukumismatkaa, vähentämällä kontaktia aiheuttavaa kuormaa tai pienentämällä kosketuspintojen ja kuluttavien partikkeleiden pinnankarheuksia. Kahden pinnan välistä abraasiota voidaan torjua esimerkiksi pinnankarheuksia tasoittamalla, voitelulla ja oikeilla materiaalivalinnoilla. Abraasiota kestävätkin parhaiten erilaiset kromirautaseokset, sekä karbideja sisältävät seokset. Iskuja vastaan kannattaa valita muokkauslujittuvaa mangaaniterästä tai hyvin iskuja kestävästä martensiittista terästä. (Kivioja;Kivivuori;& Salonen, 1997, ss. 338-341; Esab Oy, 2015)

Abrasiivisessa kulumisessa pinnassa on tyypillisesti nähtävissä seuraavalla sivulla kuvassa näkyviä erilaisia uurteita, uria ja naarmuja (kuva 4). Kovemmillä materiaaleilla on hyvin usein seurauksena myös murtumasäröjä. Erilaiset metallilastut ja hauraasti irronneet pienet partikkelit ovat tyypillisiä kulumistuotteita abraasiassa. (Kivioja;Kivivuori;& Salonen, 1997, s. 338)



KUVA 2 Kahden kappaleen abraasio (Viitala, 2016)



KUVA 3 Kolmen kappaleen abraasio, jossa välissä on kova partikkeli (Viitala, 2016)



KUVA 4 Abraasiassa on nähtävissä erilaisia uurteita, uria ja naarmuja (Adudra, 2016)

3.2 Tartunta- eli adhesiivinen kuluminen

Adhesiivinen kuluminen eli adheesio on toisia vastaan iskeytyvien, liukuvien, laahaavien tai pyörivien kappaleiden kulumista, jossa kappaleet ovat aina fyysisesti kosketuksessa toisiinsa. Adhesiivista kulumista tapahtuu usein esimerkiksi erilaisissa laakereissa ja ketjuissa. Kulumiseen vaikuttaa erityisesti kosketuspintojen fysikaalis-kemiallinen luonne, kuten kiderakenne, kidesuuntaus ja koheesiolujuus. (Stolarski, 1990, s. 19)

Adhesiivisesti kuluneissa pinnoissa on yleensä nähtävissä irtonaisia partikkeleita ja muokkautumista, kuten kuoppia ja kohoutumia sekä aineiden siirtymistä materiaalista toiseen. Kosketuspinnat ovat myös voineet tahmautua, leikkautua tai hitsautua toisiinsa kiinni kitkan ja lämmön vaikutuksesta. Tällöin puhutaan kylmähitsautumisesta. (Parikka & Lehtonen, 2000, ss. 7-8)

Adhesiivista kulumista torjutaan lähinnä riittävällä voitelulla sekä oikealla materiaalivalinnalla. Parhaiten adheesiota kestävät austeniittiset teräkset ja niukkaseosteiset martensiittiset teräkset. Myös erilaisia koboltti-seoksia käytetään adhesiiviselle kulumiselle alttiissa käyttöolosuhteissa, koska ne kestävät hyvin korkeita lämpötiloja ja hapettavia olosuhteita. (Esab Oy, 2015)

3.3 Tribokemiallinen kuluminen

Tribokemiallista kulumista voivat aiheuttaa niin nesteet, kaasut kuin kiinteät aineetkin. Kuluminen on vähäistä ja se on usein varsin hidas tapahtuma. Tribokemiallista kulumista tapahtuu vain materiaalien pintakalvoissa. Tämän mekanismin mukainen kuluminen aiheutuu metallin oksidikerroksen tai jonkun muun siinä vaikuttavan reaktiokerroksen vaurioituessa esimerkiksi kitkan ja lämmön vaikutuksesta. Tällöin paljaat metallipinnat reagoivat ympäristönsä kanssa, jolloin syntyy kemiallisia reaktioita, kuten korroosiota tai hapettumista. Tribokemiallinen kuluminen ilmenee metallioksideina, jolloin kiiltävässä ja tiiviissä pinnassa on erotettavissa metallihiukkasia ja erilaisia kalvoja. (Kivioja;Kivivuori;& Salonen, 1997, ss. 111-113 ja 338-341)

3.4 Väsymiskuluminen

Väsymiskuluminen eroaa muista kulumismekanismeista siinä, että se on mahdollista myös ilman pintojen koskettamista toisiinsa. Väsymiskuluminen vaatii aina vaihtelevaa ja pitkäaikaista mekaanista rasitusta. Väsymiskulumista esiintyy partikkeleiden vieressä materiaalin pinnoilla, jolloin pintaan muodostuu murtumia ja pisaran muotoisia ns. pitting-kuoppia. Lämpötilan vaihtelut tai lämmön epätasainen jakautuminen saattaa johtaa ns. termiseen väsymiseen. Pitkäaikainen värähtely on myös yksi väsymiskulumisen aiheuttaja. Väsymiskulumisessa pinnasta irtoaa voimakkaasti muokkautunutta kiiltävää metallihilsettä delaminaatiokulumisen johdosta, jossa pinnanalaisen muodonmuutoksen aiheuttamat säröt ydintyy ja alkavat edetä. Tällöin materiaalin pintaan vaikuttaa maksimipuristusjännitys ja hieman pinnan alle maksimileikkausjännitys, jolloin ennen pitkään syntyy säröjä deformaation eli plastisen muodonmuutoksen tai dislokaation eli kidevirheiden seurauksena. Särön eteneminen aiheuttaa lopulta partikkelin irtoamisen perusaineesta. (Kivioja;Kivivuori;& Salonen, 1997, ss. 113-114 ja 338-341)

4 KULUMISEN TORJUNTA METALLITEOLLISUUDESSA

Kulumisen estäminen täysin on lähes mahdotonta, mutta sitä voidaan hillitä monin tavoin. Käyttökohte ja olosuhteet määrittelevät pitkälti, mitä torjuntakeinoja milloinkin käytetään. Tyypillisimmät torjuntatavat teollisuudessa ovat voitelu, kulumista kestävien materiaalien ja lisäaineiden käyttäminen, hitsauspinnoitus sekä terminen ruiskutus.

Voiteleviin tuotteisiin kuuluvat mm. erilaiset rasvat ja öljyt. Kulumista kestävästä materiaaleista mainittakoon kovavalut, ja kovapinnoitelevyt, kuten komposiittilevyt ja tässä opinnäytetyössä tutkittavat kovahitsipinnoitetut teräslevyt eli ns. panssarilevyt. Lisäaineista voidaan mainita erilaiset komposiitit, korjausmassat, tekniset sprayt, juotteet, peittäusaineet, ruiskutuspulverit sekä hitsauslangat ja -puikot.

Hitsauspinnoitus voidaan toteuttaa esimerkiksi kovahitsaamalla tai laserilla. Kovahitsauksesta kerrotaan tarkemmin seuraavassa luvussa (4.1). Laserhitsauksessa jauhemainen lisäaine ja perusaine sulatetaan toisiinsa. Yksi pinnoitustapa on terminen ruiskutus, jossa pinnoite saadaan aikaan ruiskuttamalla kappaleen pintaan sulia metallipisaroita, jotka jähmettyessään muodostavat kovan suojaavan kerroksen. (Keltamäki, 2013)

4.1 Kovahitsaus

Kulutusta kestäväällä hitsauspinnoitteella valmistettuja teräslevyjä eli ns. panssarilevyjä valmistetaan usein hitsaamalla teräslevyjen päälle kulutukselta suojaava kerros lisäaineella, joka on valmistettu alkuperäistä teräslevyä kestävämmästä tai vähintään yhtä kestävästä seoksesta. Tätä toimenpidettä kutsutaan kovahitsaukseksi. Tutkittavana olleet panssarilevyt olivat valmistettu juuri tällä tekotavalla, joten käydään läpi hiukan myös kovahitsauksen teoriaa.

Kovahitsausta käytetään panssarilevyjen valmistuksen lisäksi erityisesti kulutukselle ja lämmölle alttiiden uusien pintojen päällystämiseen ennen niiden käyttöönottoa ja vanhojen jo kuluneiden pintojen korjaamiseen. Kovahitsauksen yhtenä tavoitteena on helpottaa hankalien osien valmistamista, koska kovahitsauksella on mahdollista antaa riittävät ominaisuudet juuri siihen osaan kappaletta kuin on tarvetta. Tämä mahdollistaa sen, että muut kappaleen osat voidaan jättää perusmateriaalipinnalle tai rakentaa helpommin käsiteltävästä materiaalista. Korjaushitsauksessa kovahitsauksen tavoite on palauttaa kappale edullisesti käyttökuntoon eli antaa kuluneelle osalle sen alkuperäiset muodot ja mitat, jolloin sen käyttöikä saadaan pidennettyä. Tuotetta tai sen osaa ei siten tarvitse vaihtaa kokonaan tai ainakaan kovin usein ja varaosien tarve vähenee. Näin säästetään myös tuotantokustannuksissa. (Ovako Oy, 2012, s. 35)

Kovahitsauksen käyttökohteissa olosuhteet vaihtelevat ja niissä ilmenee useita erilaisia kulutusmekanismeja, joten lisäaineen valinta on haastavaa ja tällöin joudutaan yleensä joistakin ominaisuuksista tinkimään tai tekemään kompromisseja. Esimerkiksi hyvän abrasiivisen kulutuksen kestävyys saa-

uttaakseen on yleensä vaikea saada lisäksi hyvää kuuman-, korroosion- ja iskunkestävyyttä. Kovahitsauksessa käytettävien lisäaineiden valinta tehdäänkin yleensä aina useiden eri kriteerien perusteella. Tärkeimmät niistä ovat käyttöolosuhteet, vallitseva kulutusmekanismi, hitsiaineen tarvittava kovuus, kulumiskestävyys sekä perusaineen materiaali ja erityisesti sen kovuus, koostumus ja lämpökäsittely. Lisäksi huomioon otettavia tekijöitä ovat esimerkiksi lisäaineen syöpymisen-, päästön- ja hilseilynkestävyydet sekä pinnan mahdollinen viimeistely esimerkiksi koneistamalla. Hitsaustapa määrittelee myös omalta osaltaan mitä lisäaineita on käytettävissä eli onko hitsausmenetelmänä puikko-, täytelanka- vai jauhekaarihitsaus. (Ovako Oy, 2012, s. 35; Vuoristo, 1999, ss. 145-147)

Markkinoilla on runsaasti erilaisia kovahitsaukseen soveltuvia hitsauspuikkoja, -lankoja ja -lisäaineita. Kuvasta alla nähdään karkeasti jaoteltuna erilaisten pinnoitemateriaalien soveltuvuuden erilaisiin käyttökohteisiin (kuva 5). Standardissa SFS-EN 14700 (2005) esitetään kovahitsauksen eri tarpeisiin soveltuvat lisäaineet tarkemmin. Hitsauslisäaineet voidaan kuitenkin jakaa karkeasti neljään eri luokkaan myös halutun lopputuloksen mukaan:

1. Puikot, jotka antavat karkaistun eli martensiittisen rakenteen hitsiaineelle. Näissä puikoissa kromin, nikkelin ja mangaanin sekä muiden seosaineiden osuudet ovat yleensä pieniä.
2. Puikot, joilla saadaan aikaiseksi kovia karbideja sisältävä sitkeä matriisi eli stelliitti. Tämä matriisi voi olla rauta-, nikkeli- tai kobolttipohjainen ja ne sisältävät kromi-, volframi- ja boorikarbideja.
3. Volframikarbidirakeita sisältävät täytelangat, joilla syntyy kovia mikrorakeita ja sitkeä matriisi.
4. Hitsauksen jälkeen muokkauslujittuvat austeniittiset hitsauslisäaineet, kuten erilaiset hitsausjauheet. (Suomen Hitsaustekniikan Yhdistys ry, 2014, s. 209)

Abrasiivisen kulumiskestävyyden takaavat kovahitsauksessa perusaineen pinnalle tuodut karbidit, sillä karbideiden jakautuminen, tyyppi ja määrä ratkaisevat pinnoitteen kulumiskestävyyden. Karbidit ovat hiilen ja jonkin sitä vähemmän elektronegatiivisen aineen kanssa muodostuneita yhdisteitä. Yleisimpiä seosaineita abrasiivisen kulumisen torjunnassa ovat kromi, molybdeeni, volframi ja vanadiini. Karbideja sisältäviä hitsauspinnoitteita kutsutaan kermeteiksi. (Seppälä, 2007, s. B1.2; Esab Oy, 2015, s. 8; Vuoristo, 1999, s. 145)

	Materiaalityyppi	Pinnoiteominaisuudet	Käyttökohte
Abraasiokestävyys kasvaa	Austeniittiset mangaaniteräksiset	Sitkeä, halkeilun kestävä ja pehmeä, muokauslujittumiskykyinen (kovuus kasvaa 170 HV → 550 HV)	Suuret kuormat, raskaat iskut
ja sitkeys alenee	Martensiittiset ja pikateräksiset	Hyvä yhdistelmä abraasion ja iskunkestävyyttä. Abraasiokestävyys kasvaa hiili- ja kromiseostuksen mukana iskunkestävyyden heiketessä	Kuiva metalli/metalli liukuva kontakti
alaspäin mentäessä	Nikkeli- ja koboltiseokset	Kulumisen, korroosion ja lämmönkesto, korkea lujuus, alhainen sitkeys	Abraasiokuluminen yhdistettynä korkeaan lämpötilaan ja/ tai korroosioon
↓	Martensiittiset ja korkeakromiset raudat	Erinomainen kestävyys useimpien mineraalien abraasiota vastaan	Hyvin abrasiiviset olosuhteet
	Wolframikarbidikomposiitit	Paras kestävyys kovien mineraalien abraasiota vastaan liukuissa pinnoissa	Paras abraasiokestävyys, korkeimmat kustannukset

KUVA 5 Hitsauspinnoitemateriaalien ominaisuudet ja käyttöalueet (Vuoristo, 1999, s. 146)

4.2 Panssarilevyt

Kulutusta kestäväällä pinnoitteella varustettujen teräslevyjen maahantuojat käyttävät näistä tuotteista yleisesti nimitystä panssarilevyt. Näitä panssarilevyjä ei tule sekoittaa sotilasteollisuudessa käytössä oleviin ballistisiin panssareihin. Kuvassa sivun alareunassa on tyypillinen panssarilevy (kuva 6). Kulutuskerros valmistetaan kovahitsaamalla tai metallijauheesta puristamalla eli sintraamalla. Hitsausmenetelmissä ja käytettävissä lisäaineissa on eroja. Kulutuskestävyyden levyille antavat erilaiset kovat karbidit. (Impomet Oy, 2016a)

Panssarilevyjen käyttökohteina ovat lähinnä koneet ja laitteet, joita käytetään olosuhteissa, joissa vaaditaan normaalia korkeampaa kulumisen ja korroosion kestävyttä. Kaivokset, terästeollisuus, kivimurskaamot sekä erilaiset maanrakennus- ja maatalouskoneet ovat hyviä esimerkkejä panssarilevyjen käyttökohteista. Levyjen käyttäminen lisää laitteiden ja koneiden käyttöikää, käyttöastetta sekä vähentävät tuotantokatkosten tarvetta ja korjauskustannuksia (Impomet Oy, 2016a).

Levyjä on saatavilla eri paksuisina ja levyt suunnitellaan erilaisiin käyttötarpeisiin tai suoraan asiakkaiden vaatimusten mukaisesti. Oikeastaan yleispätevää panssarilevyä ei ole, vaan tuote valitaan ja usein myös valmistetaan aina käyttökohteen mukaan. Perusmateriaalin ja pinnoitteen valintaan vaikuttavat levyn käyttöolosuhteet ja haluttu lujuus. Näistä syistä eri panssarilevyjen vertaileminen keskenään on vaikeaa.

Panssarilevyjen työstettävyys on hieman rajallista niiden kovan pinnoitteen takia, sillä niitä voidaan koneistaa yleensä vain hiomalla. Leikkaus onnistuu yleensä vain plasmalla tai korkeapainevesisuihkulla. Levyjä voidaan taivuttaa ja niitä voidaan liittää toisiin materiaaleihin tai toisiinsa lähinnä vain perusmateriaalista olevasta pohjalevystä hitsaamalla tai pulttiliitoksilla. (Maakasi Oy, 2014)

Suomessa panssarilevyjä maahantuovat tai valmistavat useat eri yritykset. Kuopiolainen Somotec Oy edustaa Corodurin Coroplate-panssarilevyjä, tamperelainen Impoment Oy Vautidin ja Shotecin panssarilevyjä, Impomet Oy:n tytäryhtiö Kalenbornin Kalmetall-panssarilevyjä, pattijokelainen SKM Service Tecknoweld Alloysin Ultraplate-panssarilevyjä ja espoolainen Suomen Elektrodi Oy Up-Plate-panssarilevyjä. Panssarilevyjä on saatavilla myös oululaiselta Maakasi Oy:ltä ja kajaanilaiselta Ykkösmetalli Oy:ltä.



KUVA 6 Coroplate 143 -panssarilevy (Viitala, 2016)

5 TUTKITTAVAT TUOTTEET

Panssarilevyjä saatiin tutkittavaksi neljältä maahantuojalta. Panssarilevyjen toimittajille laadittiin sähköposti, missä pyydettiin kolmea panssarilevyn koekappaletta, joiden koko tuli olla kulutuslaitteeseen sopivia eli mitoiltaan noin 20 mm x 50 mm. Levyjen paksuudeksi sovittiin hyvin yleisesti käytetyt 8 mm + 5 mm panssarilevyt, joissa siis perusmateriaalit ovat 8 mm paksua teräslevyä ja kovahitsatut kulutuspinnot 5 mm. Sovittiin myös, että tutkittavaksi toimitettavien panssarilevyjen piti vastata ominaisuuksiltaan Vautid 100 -panssarilevyä. Vertailukappaleiksi saatavilla oli kulutustestiin ke-raaminen kulutuslevy SMK Ceramic 1, Hardox 400 -kulutusteräs sekä tavallinen S235-teräs.

5.1 Coroplate-panssarilevyt

Coroplate-panssarilevyt valmistaa Corodur Verschleiss-Schutz GmbH Saksan Thalessa (Corodur Verschleiss-Schutz GmbH, 2015). Suomeen yrityksen hitsaus- ja panssarilevytuotteita tuo kuopiolainen Somotec Oy (Somotec Oy, 2016b).

Corodur ei tee varsinaista massatuotantoa, vaan kaikki tuotannossa lähtee asiakatarpeista. Asiakas voi määrittellä levyn pinnoitteen, sen paksuuden, perusmateriaalin, koon, muodon, taivutukset ja muun käsittelyn tarpeidensa mukaan. Levyjen pinnoite hitsataan Corodurin omilla Corthal® -ydintäytelangoilla ns. Open Arc -menetelmällä, jossa lanka suojaa itse itsensä hitsausprosessissa eikä suojakaasua näin ollen tarvita. Lankoja on useita erilaisia eri käyttötarkoituksiin. Kuvasta alla selviää mm. Corodurin käyttämät perusmateriaalit ja lisäaineet (kuva 7). (Corodur Verschleiss-Schutz GmbH, 2015; Somotec Oy, 2016b)

Tutkittavaksi saatiin Coroplate 143 -panssarilevyä, jonka pinnoite on hitsattu Corthal®143 -täytelangoilla. Langan tarkemmat tiedot löytyvät seuraavan sivun kuvasta (kuva 8). Pinnoite sisältää mm. kromi- ja niobiumkarbideita, ja sen maahantuojan ilmoittama pintakovuus on noin 60–62 HRC. (Corodur Verschleiss-Schutz GmbH, 2015; Somotec Oy, 2016b)

Available dimensions of standard wear plates			Standard choice for hardfacing alloys	
Size	Dimension	Coated area	PTA-powder	Thaloy® WSC-DUR 60/40 (Ni-B-Si-alloy + 60 % WSC)
Small	2000 x 1000 mm	1900 x 900 mm	flux-cored wires	Corthal® 55 Fe-C-Cr-B-alloy
Medium	2500 x 1250 mm	2350 x 1100 mm		Corthal® 143 Fe-C-Cr-Nb-B-alloy
Large	3000 x 1500 mm	2850 x 1350 mm		Corthal® 60 Fe-C-Cr-Nb-alloy
Super	3000 x 2000 mm	2850 x 1850 mm		Corthal® 61 Fe-C-Cr-Nb-B-alloy
				Corthal® 65 Fe-C-Cr-Nb-Mo-V-W-alloy
Thickness of plates			Standard choice for base materials	
open-arc-surfacing with flux-cored wire electrode:			S235JRG2, S355J2G3, 16 Mo3/15Mo3, 13CrMo4-5,	
3+3mm, 4+3 mm ,5+3 mm, 6+4 mm, 6+5 mm, 8+4 mm, 8+4+4 mm, 8+5 mm, 8+5+5 mm, 10+5+5 mm ...			13CrMo4-4	

KUVA 7 Coroplate-panssarilevyjen standardit kokoluokat, kovahitsien ja perusmateriaalien paksuudet, käytettävät lisäaineet ja perusmateriaalit (Corodur Verschleiss-Schutz GmbH, 2015)

Kromikarbidit (mineraalihankaus, isku)

Corthal® 143

Luokitukset:	DIN 8555:									
	MF-10-60-GR									
Kuvaus ja käyttökohteita:	<p>Corthal®143 on C-, Cr, Nb, B-seosteinen täytelanka kohteisiin, joissa sovellukset joutuvat voimakkaan mineraalihankauskulumisen kohteeksi. Seos kestää myös kohtalaisesti iskuja. Hitsi ei ole koneistettavaa.</p> <p>Käyttökohteita: sementtipumput, kulutuslevyt, sekoittajien osat, tuulettimien siivet, kourut, ...</p>									
Tyypillinen koostumus (%):	C	Si	Mn	Cr	Nb	B	Fe			
	5.2	1.5	0.2	30	1.1	0.6	Loput			
Ominaisuudet:	Kovuus:	Rakenne:								
	60-62 HRC	Austeniittinen, primaarikarbidit ja eutektiset M ₇ C ₃ -karbidit								

KUVA 8 Coroplate 143 on hitsattu Corthal®143 -täytelangalla (Somotec Oy, 2010)

Coroplate 143 -panssarilevyn koekappaleet leikattiin plasmalla isommasta levystä eikä niiden kylkiä hiottu, vaan ne jätettiin epätasaisiksi. Levyn pinta oli hieman ruosteinen, mutta varsin tasainen, vaikka siinä oli nähtävissä hitsiliitokset, jotka erottuvat myös alla olevassa kuvassa (kuva 9).



KUVA 9 Coroplate 143 (Viitala, 2016)

5.2 Impoweld-W-panssarilevyt

Impoweld-W- eli oikeastaan Kalmetall-W-panssarilevyysarjaa valmistaa maailmanlaajuisesti toimivan yhdysvaltalaisen Kalenborn Abresistin tytäryhtiön Kalenborn Technologies LCC Tenneseessä (Kalenborn Abresist, 2016). Suomeen yrityksen tuotteita tuo tamperelaisen Impomet Oy:n tytäryhtiö Impoinvest Oy, joka markkinoi näitä panssarilevyjälevyjä nimellä Impoweld-W (Impoinvest Oy, 2016b).

Levyt koostuvat täytelangalla jauhekaassa hitsaamalla valmistetusta pinnoitteesta ja perusmateriaalista. Perusmateriaalien standardin mukainen paksuus on 6 mm, 8 mm tai 10 mm ja perusmateriaaleina S235, S355 tai 1.4301, jotka ovat hitsattavia teräksiä. Levyjen minimikoko on 900 mm x 1 900 mm ja maksimikoko 1 900 mm x 3 900 mm, joten ne sopivat laajojenkin pintojen suojaamiseen. Erikoiskokoja voidaan myös valmistaa tilauksesta erityisvaatimuksiin. Levyt soveltuvat erilaisiin tuotantolaitoksiin ja rakennemetalleiksi ja jopa kantaviksi rakenteiksi, kun tarvitaan korkeaa iskun- ja kulutuksenkestävyyttä korkeissakin lämpötiloissa. Valmistaja lupaa Kalmetall-W 145 -levyille jopa +750 °C käyttölämpötilan. (Kalenborn International, 2016; Impoinvest Oy, 2016b)

Tutkittavaksi saatiin Impoweld-W 100- eli Kalmetall-W 100 -panssarilevyä, jonka pinnoite sisältää maahantuojan internetsivulta otetun kuvan mukaan hiiltä 5 %, kromia 30 % ja rautaa 60 % (kuva 10). Tämän lähinnä kromikarbideja sisältävä seos saavuttaa pinnoitteen makrokovuudeksi noin 60 HRC. (Kalenborn International, 2016; Impoinvest Oy, 2016b)

Tutkittavaksi tulleiden koekappaleiden pinta oli lievän ruosteen peitossa, kuten kuvasta seuraavalla sivulla selvästi nähdään (kuva 11). Pinnassa oli nähtävissä halkeamia ja palojen kyljessä muutamia huokosia hitsissä. Muuten tuote oli varsin tasapaksu.

Levytyyppi	Pinnoitteen analyysi (%)	Tiheys	Pinnoite- vahvuudet	Lämpö- laajenema	Max. käyttö- lämpötila	Kulutuskestävyys*			Kovuus
						hiova	isku	lämpö	
Impoweld W 100	C 5, Cr 30, Fe 60	7,8 dm ³	3–20 mm	12 ¹⁰	350 °C	2	1	1	700 HV
Impoweld W 143	C 5, Cr 22, Nb 7, Fe 60	7,8 dm ³	3–20 mm	12 ¹⁰	350 °C	3	1	1	740 HV
Impoweld W 145	C 5, Cr 21, Nb 7, Mo 7, Fe 60	7,8 dm ³	3–20 mm	12 ¹⁰	750 °C	3	1	1	800 HV
Impoweld W 150	C 5, Cr 30, B 1, Fe 60	7,8 dm ³	3–20 mm	12 ¹⁰	350 °C	4	0	1	820 HV
Impoweld W 151	C 5, Cr 30, Mo 3	7,8 dm ³	3–20 mm	12 ¹⁰	550 °C	2	1	2	700 HV

* 1 = soveltuu melko hyvin, 2 = soveltuu hyvin, 3 = soveltuu erittäin hyvin, 4 = soveltuu parhaiten, 0 = ei suositella

KUVA 10 Impoweld-W-panssarilevyt (Impoinvest Oy, 2016b)



KUVA 11 Impoweld-W 100 (Viitala, 2016)

5.3 Ultraplate-panssarilevyt

Ultraplate-panssarilevyjä valmistaa intialainen Tecknoweld Alloys. Suomeen ja Ruotsiin yrityksen tuotteita tuo pattijokelainen SKM Service Oy. (SKM Service Oy, 2015)

Valmistaja on kehittänyt oman menetelmän levyjen pinnoittamiseen. Levyt valmistetaan puikkohit-saus- eli ns. Metal Arc -menetelmällä, jolla saavutetaan pieni liukoisuus perusmateriaaliin ja tasainen karbidikerros lähemmäksi perusainetta. Prosessissa käytetään CNC/PLC-ohjattuja hitsauslaitteita. Laitteiden avulla saavutetaan yhdenmukainen pinnoitepaksuus ja hitsirivin leveys. Yrityksellä on täysin varusteltu laboratorio Intiassa, missä se testaa materiaaleja ja tuotteitaan. Levyt on tutkittu levyjä valmistavan yrityksen toimesta myös standardin ASTM G65 mukaisella kumipyöräabraasiolaitteella, joten maahantuojasta on mielenkiintoista nähdä, eroavatko tässä tutkimuksessa tehdyt testit valmistajan tekemistä tutkimuksista. (Tecknoweld Alloys, 1999)

Pohjamateriaaleina Ultraplate-levyissä käytetään normaaleja rakenneteräksiä, lisäksi on saatavilla tilauksesta kulutusteräksiä ja ruostumatonta terästä. Kaikki saatavilla olevat levynpaksuudet käyvät perusmateriaalien paksuuksiksi. Kulutuslevyjen kovuudet vaihtelevat valmistajan tiedon mukaan 55:n ja 72:n HRC välillä. Pinnoitteet sisältävät lähinnä kromikarbideja. Tilauksesta on saatavilla kovametalli- ja titaanikarbidituotteitakin. Levyjen vakiomitat ovat 1 000 mm x 1 500 mm, 1 400 mm x 2 850 mm ja 1 750 mm x 2 850 mm. Pinnoitteen paksuus on 3–10 mm. (Tecknoweld Alloys, 1999)

SKM Service Oy:ltä tutkittavaksi saatiin Ultraplate 2000-, 3000- ja 4000 -panssarilevyt. Ultraplate-levyt eroavat muiden valmistajien levyistä jonkin verran mm. kromipitoisuudeltaan ja seosaineiltaan, joten ne eivät ole suoraan verrattavissa muihin tutkittavana olleisiin levyihin. Levyjen koostumukset selviävät seuraavalla sivulla olevasta valmistajalta saadusta kuvasta (kuva 12).

► Isku ja kulutus				
Tuote	Kromi %	Hiili %	Seosaineet	Kovuus Rockwell C
Ultraplate 1000	18-22	3.5-4.5	Mn	55-60
Ultraplate 3000	22-26	4.0-5.0	Mn, B	57-60
Ultraplate 5000	28-32	4.5-5.5	B, Ti	57-60
CCC	26-28	4.5-5.5	B,Mn,W	57-60
► Kulutus ja eroosio				
Tuote	Kromi %	Hiili %	Seosaineet	Kovuus Rockwell C
Ultraplate 2000	20-40	4.0-5.0	Nb	58-60
► Kuluminen ja eroosio korkeissa lämpötiloissa				
Tuote	Kromi %	Hiili %	Seosaineet	Kovuus Rockwell C
Ultraplate 4000	22-26	4.0-5.0	Nb, Mo B	60-62
Ultraplate 6000	26-28	4.5-5.5	Nb, Mo, B, V	62-65
Ultraplate Super	28-32	4.5-5.5	Nb, Mo, V, W	63-68
CTC 2000	24-28	4.5-5.5	Nb, Mo, V, W, B	60-65
► Korkea kuluminen				
Tuote	Kromi %	Hiili %	Seosaineet	Kovuus Rockwell C
Ultraplate W2W	26-30	4.0-5.0	W ₂ C-35% Mn	68-72

KUVA 12 Tecknoweld Alloysin panssarilevyt (SKM Service Oy, 2015)

Kuten seuraavan sivun yläreunan kuvasta huomataan, Ultraplate 2000 -koekappaleet olivat keltaisen maalin peitossa (kuva 13). Pinta oli epäsymmetrinen hitsausprosessin luonteen vuoksi, hitsiliitosten urat olivat melko syvät. Pinnassa ei näkynyt halkeamia. Hitsausroiskeita tai näkyviä halkeamia ei huomattu.

Ultraplate 3000 -sarjasta tutkittavaksi saatiin sekä ohuempi että paksumpi tuote. Kuvassa seuraavalla sivulla keskellä nähtävässä ohuimmassa tuotteessa (6/4) perusmateriaali oli 6 mm paksu ja kovahitsi oli 4 mm (kuva 14). Alimmassa saman sivun kuvassa esiintyvässä paksummassa tuotteessa (8/5) oli 8 mm perusmateriaalia ja 5 mm kovahitsiä (kuva 15). Pinnat olivat molemmissa jonkin verran epäsymmetrisiä paksuudeltaan, mutta ne olivat kuitenkin tästä panssarilevysarjasta tasaisimpia, eikä niissä esiintynyt suuria hitsausroiskeita. Ruostettakaan ei ollut nähtävissä. Pinnassa oli nähtävissä myös kuuma- ja kutistushalkeamia.



KUVA 13 Ultraplate 2000 (Viitala, 2016)



KUVA 14 Ultraplate 3000 (6/4) (Viitala, 2016)



KUVA 15 Ultraplate 3000 (8/5) (Viitala, 2016)

Ultraplate 4000 -panssarilevyn koekappaleissa oli havaittavissa vihreää maalia ja hieman ruostetta, kuten kuvasta alla huomataan (kuva 16). Kappaleet oli leikattu 6 mm + 4 mm paksusta panssarilevystä, eivätkä ne siis olleet sovitun kokoisia. Levyjen koekappaleet kuitenkin tutkittiin, vaikka niitä ei voida suoraan verrata muihin tutkittavana olleisiin tuotteisiin. Koepalat olivat hyvin epäsymmetrisiä paksuudeltaan ja niissä oli muutamia halkeamia.



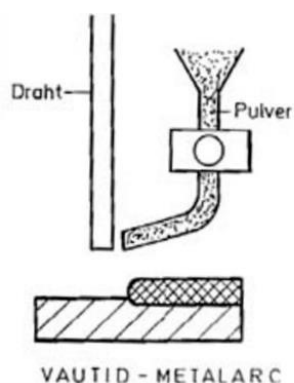
KUVA 16 Ultraplate 4000 (Viitala, 2016)

5.4 Vautid-panssarilevyt

Vautid-panssarilevyjen valmistaja on maailmanlaajuisesti toimiva saksalainen Vautid Groupiin kuuluva Vautid-Shah (Vautid-Shah, 2011). Suomeen yrityksen panssarilevyjä tuo tamperelainen Impomet Oy (Impomet Oy, 2016a).

Valmistajan mukaan Vautid-panssarilevyjä ei tulisi verrata perinteisillä jauhekaarimenetelmillä tai ydintäytelangoilla hitsattuihin panssarilevyihin, koska ne on valmistettu valmistajan itsensä kehittämällä täysin tietokoneohjatulla Vautid Metal Arc -prosessilla. Hitsausmenetelmä on esitetty seuraavan sivun kuvassa (kuva 17). Prosessin etuna on, että lisäaineella on vain hyvin pieni liukoisuus perusmateriaaliin, jolloin riski perusmateriaalin vaurioitumiseen pienenee ja karbideja syntyy jo lähelle perusmateriaalia. Prosessissa sulan runsasseosteisen lisäaineen jäähtytys on nopea, jolloin saavutetaan kestävä ja luotettava pinnoitetta. (Doka Industry Ltd., 2016a)

Levyjen pinnoite muodostuu kromikarbideista, karbidikomplekseista, volframikarbideista ja/tai metalliborideista. Karbidikompleksit ovat hiilen ja metallien muodostamia kompleksioneja ja boridit ovat boorin ja sitä elektropositiivisemmän atomin, tyypillisesti metallin, muodostamia yhdisteitä. Pinnoitteen paksuus vaihtelee 3 mm ja 20 mm välillä ja perusaineen paksuus 5 mm ja 30 mm välillä. Perusmateriaaleina käytetään erilaisia rakenne-, painelaite- ja hienoraeteräksiä sekä 300, 400 ja 500 Brinellin (HB) kovuisia kulutusteräksiä. Impomet Oy toimittaa 1 150 mm x 2 400 mm ja 1 400 mm x 2 900 mm kokoisia panssarilevyjä. Tilauksesta on saatavilla myös asiakkaan määrityksen mukaisia levyjä. (Doka Industry Ltd., 2016a; Impomet Oy, 2016b)



KUVA 17 Vautid on kehittänyt oman Vautid Metal Arc -prosessin pinnoitteen valmistamiseen (Doka Industry Ltd., 2016b)

Tutkittavaksi saatiin Vautid 100 -panssarilevyä. Levyn kovahitsattu pinnoite sisältää maahantuojan mukaan hiiltä 4,6 %, kromia 28 % ja mangaania 1 % ja tuotteen pinnan makrokovuus on noin 60 HRC (kuva 18). Maksimi käyttölämpötila +350 °C. (Impomet Oy, 2016a)

Levytyyppi	Pinnoitteen analyysi (%)	Makrokovuus	Mikrokovuus	Pinnoitevahvuus	Käyttölämpötila
Vautid 100	C 4.6, Cr 28, Mn 1	60 HRC	2200 HV ₁₀	3–20 mm	max. 350 °C
Vautid 100T	C 4.6, Cr 28, Mo 3, Ni 2	60 HRC	2200 HV ₁₀	3–20 mm	max. 550 °C
Vautid 143	C 4.8, Cr 22, Nb 6, Mn 1	61 HRC	2200–2400 HV ₁₀	3–20 mm	max. 350 °C
Vautid 145	C 5.5, Cr 22, Nb 6, Mo 6, W 2, V 1	64 HRC	2200–3000 HV ₁₀	3–15 mm	max. 750 °C
Vautid 147	C 3.5, Cr 31, Ni 0.1	67 HRC		3–10 mm	max. 750 °C
Vautid 150	C 4.5, Cr 27, B 2, Mn 1	61 HRC	2200–3700 HV ₁₀	3–6 mm	max. 350 °C

KUVA 18 Vautidin panssarilevyt (Impomet Oy, 2016b)

Alla olevasta kuvasta nähdään, että koepaloissa oli hieman ruostetta (kuva 19). Niiden pinta oli hit-sausroiskeista johtuen varsin tasaisesti karhea. Koepalat olivat melko tasapaksuja. Joitakin pieniä halkeamia oli myös havaittavissa.



KUVA 19 Vautid 100 (Viitala, 2016)

5.5 SKM Ceramic 1 -keraamit

SKM Ceramic 1 -keraamit ovat niin uusi tuote myös SKM Service Oy:lle, ettei niistä ole saatavilla ollenkaan tietoa kirjallisuudesta tai internetistä. Tuote on keraaminen kulutuslevy ja siinä on joko 95 % tai 99 % alumiinioksidia eli aluminaa (Kähkönen, Saku; SKM Service Oy, 2016). Enempää ennakkotietoja tuotteesta ei saatu. Levy ei vastaa millään tasolla muita tutkittavia tuotteita, mutta sille tehtiin Rockwell C -kovuustutkimukset ja kumipyöräabraasiokoe vertailumielessä. Näin pystytään ainakin tutkimaan keraamisen kulutuslevyn ja kovahitsattujen panssarilevyjen eroja jollakin tasolla. Tuote on varsin tasalaatuinen pinnaltaan verrattuna panssarilevyihin, kuten alla olevasta kuvasta nähdään (kuva 20).



KUVA 20 SKM Ceramic 1 (Viitala, 2016)

5.6 Hardox-kulutuslevyt

Hardox-kulutusteräslevyjä valmistaa ruotsalainen SSAB, jolla on oma edustus myös Suomessa (SSAB, 2016a). Tämän lisäksi niitä maahantuo ainakin Terästyö T. Salminen (Terästyö T. Salminen Oy, 2016).

Hardox-tuoteperheen valikoima on todella laaja. Siihen kuuluu lukuisten erilaisten kulutuslevyjen lisäksi myös putkia ja pyörötankoja. Panssarilevyille vertailukappaleeksi saatavana oli Hardox 400 -kulutusterästä. SSAB on ilmoittanut sen kovuudeksi noin 400 HBW, joka vastaa noin 42 HRC ja 412 HV10. Hardox 400 on läpikova, hyvin taivutettavissa ja hitsattavissa. Levyä on saatavilla sekä 2–8 mm ohutlevyinä että 3,2–130 mm teräslevyinä. Sen kemiallinen koostumus selviää alla olevasta kuvasta (kuva 21). (SSAB, 2016b)

Kemiallinen koostumus (lämpöanalyysi)								
C ^{*)} (max %)	Si ^{*)} (max %)	Mn ^{*)} (max %)	P (max %)	S (max %)	Cr ^{*)} (max %)	Ni ^{*)} (max %)	Mo ^{*)} (max %)	B ^{*)} (max %)
0.32	0.70	1.60	0.025	0.010	1.40	1.50	0.60	0.004

Teräs on hienoraekäsitelty. ^{*)}Varsinaiset seosaineet.

KUVA 21 Hardox 400 -kulutuslevyn kemiallinen koostumus (SSAB, 2016b)

6 TUTKIMUSMETELMÄT JA TULOKSET

Tutkimusmenetelmiksi valittiin panssarilevyjen kovuuksien mittaaminen, alkuaineanalyysi, kumipyöräabraasiokoe ja mikrorakenteen tutkiminen. Valmistajien antamat kovuusarvot ovat yleensä useiden mittaustulosten keskiarvoja, joten haluttiin tutkia, kuinka hyvin nuo valmistajien antamat arvot pitävät paikkansa. Tämän lisäksi haluttiin tutkia tarkemmin pinnoitteiden hitsien laatua, rakennetta ja erityisesti niiden karbidijakaumia. Pääpaino oli kuitenkin panssarilevyjen abrasiivisen kulumisen tutkimisella.

Laitteet saatiin käyttöön Savonian-ammattikoulun ja Itä-Suomen yliopiston laboratorioista, joissa myös tutkimukset suoritettiin. Tutkimukset suoritettiin voimassa olevien standardien mukaisesti. Standardissa SFS-EN ISO 15614-7 on kuvailtu päällehitsauksen rikkovan aineenkoetuksen tutkimusmenetelmistä kovuuskokeiden ja makro- ja mikrohetutkimusten suorittaminen ja niissä käytettävät standardit (SFS-EN ISO 15614-7, 2007).

6.1 Kovuusmittaukset

Kaikissa kovuusmittauksissa arvojen vaihteluiden ja virheiden mahdollisuutta lisäävät mahdolliset huokosten, hitsauspalon rajojen, isojen kovien karbidien tai karbidikasautumien osuminen mittausalueelle, sekä karbidien muoto, määrä ja suuntautuneisuus matriisissa. Tuloksiin voivat vaikuttaa myös tuotantoprosesseissa johtuneet virheet, kuten hitsausvirtojen, lämpötilojen ja työskentelyolosuhteiden muutokset sekä mahdollinen lisäaineiden epätasaisuus. Standardi määrittelee, että kovuuskokeet tulisi tehdä puhtaalle, sileälle ja tasaiselle pinnalle (EN ISO 6508-1, 2015). Käsittelemättömien panssarilevyjen pintojen kovuuden mittaaminen on myös erittäin haasteellista, koska pinnat jäävät hitsauksen jäljiltä hyvin epätasaisiksi. Pinnoissa on yleensä myös paljon epäpuhtauksia, kuten ruostetta tai rasvoja. Myös mahdollinen oksidikerros vaikuttaa hieman pinnan kovuuteen. Näistä edellä mainituista syistä käsittelemättömien pintojen kovuuksien mittaustuloksissa esiintyi suurta hajontaa ja myös pieniä eroja verrattaessa valmistajan ilmoittamiin arvoihin. Pinnoitteen ja koko tuotteen kovuudesta saatiin kuitenkin varsin selkeä kuva, koska kovahitsin kovuus mitattiin pinnan kovuuden lisäksi myös tuotteen poikkileikkauksesta koko matkalta pinnasta perusaineeseen. Virheen mahdollisuuden todennäköisyyttä tarkasteltiin satunnaisilla mittauksilla koepalasta.

Tässä tutkimuksessa panssarilevyjen pintojen kovuudet mitattiin Rockwell C -kovuuskokeella (HRC) standardin EN ISO 6508-1 mukaisesti kovahitsin pinnasta ennen kulutustestiä. Rockwell-kovuusmittauksissa laitteena oli seuraavalla sivulla kuvassa nähtävä Brevetti Afri Metal Tester O.M.A.G. 296 RS Digitronic, jossa on 120° timanttikartio (kuva 22). Kokonaisvoiman vaikutusaikana oli 3 sekuntia ja kuormana 1471 N. Arvoihin on lisätty virheen mahdollisuus, joka on mittauslaitteen sertifikaatin mukaan $\pm 1,5$ HRC. Laitteen toistettavuusvirhe on $\pm 0,8$ HRC.

Mittaus tehtiin siten, että ensin mitattiin kovuus kustakin koepalasta käsittelemättömältä pinnalta viidestä eri kohdasta ja tulokset merkittiin tietokoneelle MS Excelillä laadittuihin mittauspöytäkirjoi-

hin. Tämän jälkeen laskettiin mittaustulosten keskiarvo siten, että pienin ja suurin mitattu kovuusarvo jätettiin huomioimatta eli laskettiin kolmen keskeisimmän mittaustuloksen keskiarvon. Näitä käsittelemättömältä pinnalta mitattuja HRC-arvoja ei siis voida aiemmin tässä luvussa mainituista syistä pitää täysin luotettavina. Tästä syystä koepalojen pinnoista hiottiin tämän jälkeen noin 0,5–1,0 mm koko ajan paloja jäähdyttäen, jonka jälkeen kovuudet mitattiin uudestaan ja näin saatiin tasaisemmat ja luotettavimmat kovuusmittaustulokset tuotteiden pinnoista. Molempien mittaustapojen tulokset merkittiin mittauspöytäpöytäkirjaan. Saaduista mittaustuloksista tehtiin yhteenvedot sekä kuviot. Tuloksia verrattiin toisiinsa ja valmistajan tai maahantuojien antamiin kovuusarvoihin.

Hitsin rakenteen kovuus eli lähinnä panssarilevyn perusmateriaalin, hitsin muutosvyöhykkeen ja itse kovahitsiaineen kovuus mitattiin Vickers-kovuuskokeella (HV10) standardien EN ISO 6507 ja ISO 9015-1 mukaan. Laitteena toimi kuvassa alla oleva DuraScan-20 Hardness Tester (kuva 22). Mittalaitteen mittausepävarmuus on laitteen asiakirjojen mukaan noin ± 7 HV10. Karbidikovuutta mitataan mikrokovuuksia mittaamalla, koska makrokovuus ilmoittaa vain perusmassan kovuuden (Sepälä, 2007). Tätä mittaustapaa tutkijalla ei ollut käytössä, joten karbidien kovuudesta ei saatu tietoa.

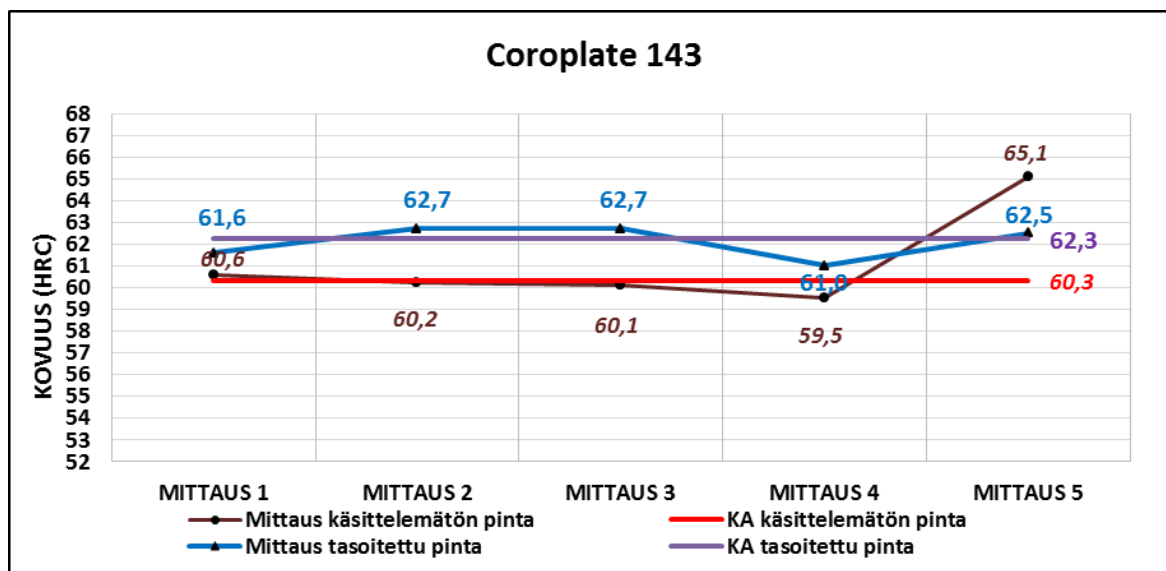
Vickers-mittaus aloitettiin noin millimetrin päästä tuotteen kovahitsatusta pinnasta, jonka jälkeen mitattiin kovuus millimetrin välein aina perusaineeseen asti. Viimeinen mittaus otettiin noin millimetrin päästä perusaineen pohjapinnasta. Mittaus pyrittiin suorittamaan kohdasta, jossa hitsausvirheet, kuten halkeamat, huokokset ja sulkeumat eivät vaikuttaisi kokeen tulokseen merkittävästi. Mittausriiven sijainti on nähtävissä osassa hieistä otetuissa valokuvista.



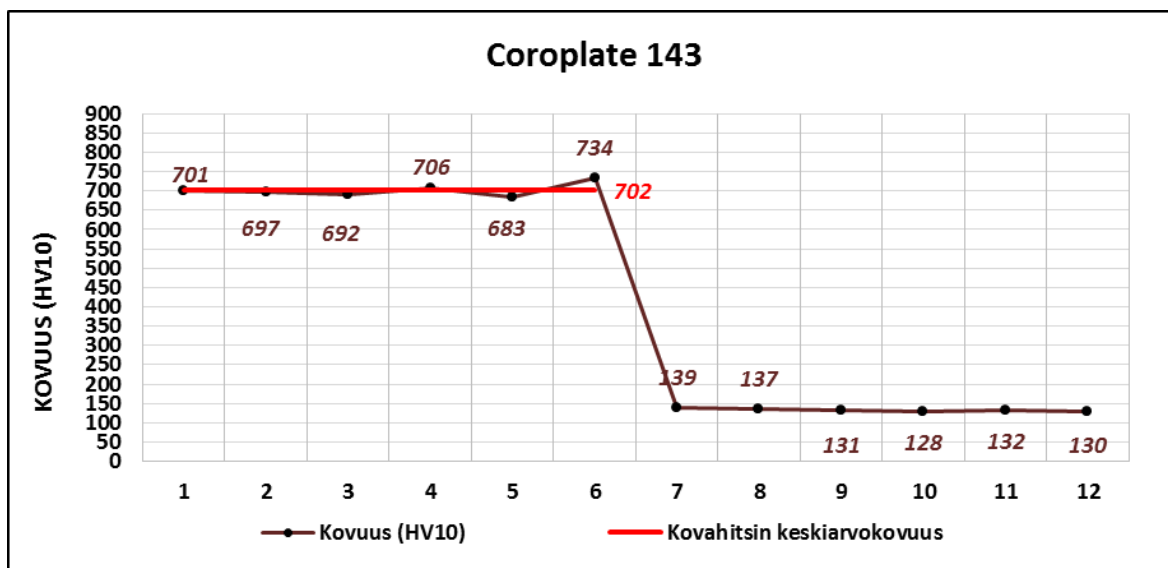
KUVA 22 Vasemmalla Rockwell-kovuusmittauslaite Brevetti Afri Metal Tester O.M.A.G. 296 RS Digital ja oikealla Vickers-mittauslaite DuraScan-20 Hardness Tester (Viitala, 2016)

Corodurin Coroplate 143 -panssarilevyn kovahitsattu pinta oli tutkittavista panssarilevyistä kovuudeltaan selkeästi kovimpia. Se huomattiin sekä käsittelemättömän että hiotun pinnan kovuusmittauksissa. Ero pienimmän ja suurimman kovuusarvon välillä oli pienin tutkittavista tuotteista, mikä kertoo tuotteen tasalaatuisuuden kovuuden osalta. Keskimääräinen pinnankovuus oli tämän tutkimuksen perusteella käsittelemättömältä pinnalta mitattuna $60,3 \pm 1,5$ HRC ja hiotulta pinnalta mitattuna $62,3 \pm 1,5$ HRC. Maahantuoja ilmoitti tuotteen pinnankovuudeksi 60–62 HRC, joten tuotteen tutkimuksessa mitattu kovuus vastasi varsin hyvin tätä ilmoitettua kovuutta (Somotec Oy, 2010). Kuviossa alla selviää kaikki tälle koekappaleelle mitatut pinnankovuusarvot sekä lasketut keskimääräiset pinnankovuudet (kuvio 1).

Coroplate 143 -panssarilevyn kovahitsi osoittautui myös Vickersin kovuuskokeessa varsin kovaksi, sillä kovahitsin keskikovuudeksi mitattiin noin 702 ± 7 HV10. Kuten kuvio seuraavalla sivulla osoittaa, tuote osoittautui varsin tasalaatuiseksi tässäkin kovuuskokeessa, sillä suurimman ja pienimmän arvon ero oli vain 51 HV10 (kuvio 2). Panssarilevyjen perusmateriaaleja ei tässä tutkimuksessa tarkemmin tarkasteltu, eikä niistä ollut annettu tarkempaa tietoa myöskään maahantuojaan toimesta, mutta tässä tuotteessa myös perusmateriaali oli varsin tasalaatuista. Koekappaleessa kovahitsipinnoite ulottui mittauskohdassa noin 6 mm päähän pinnasta.

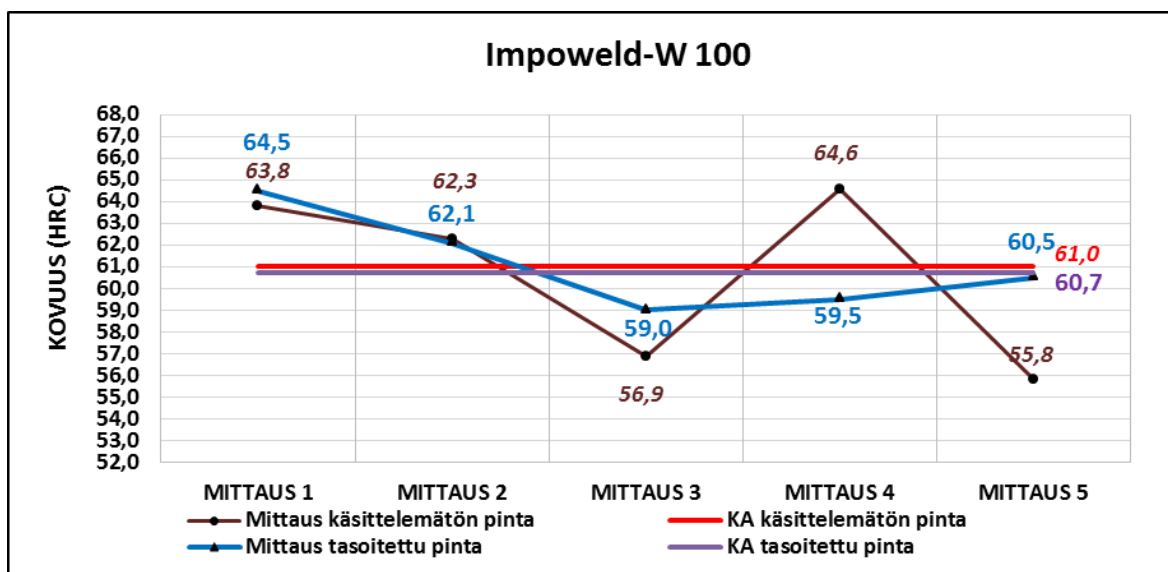


KUVIO 1 Coroplate 143 -panssarilevyn pinnankovuus (HRC) (Viitala, 2016)



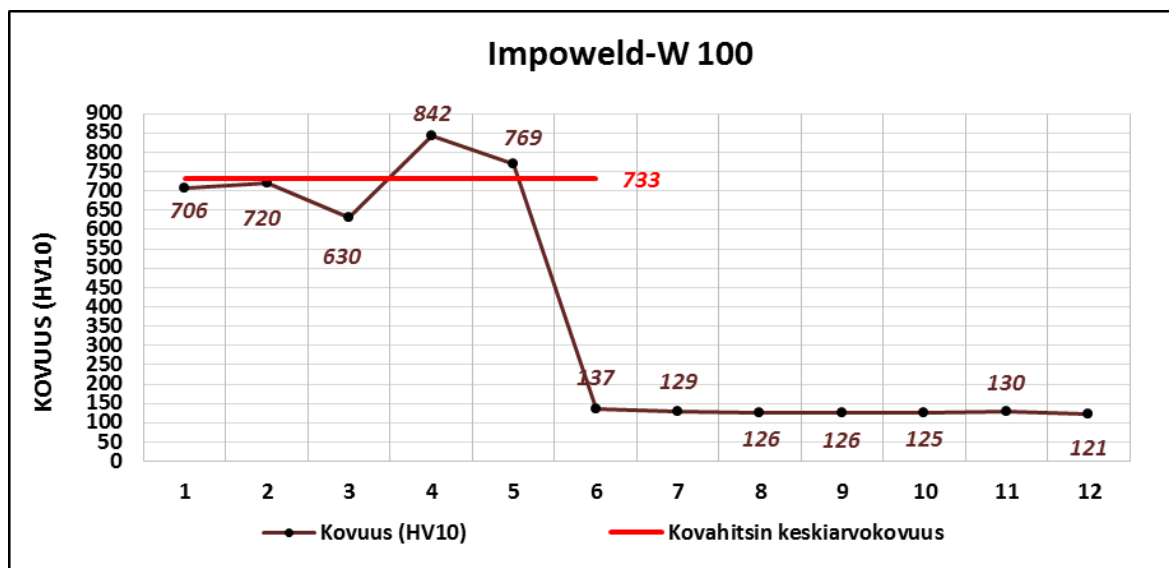
KUVIO 2 Coroplate 143 -panssarilevyn kovahitsin ja perusmateriaalin Vickers HV10 -kovuus (Viitala, 2016)

Impoweld-W 100 -panssarilevy oli keskiarvoltaan toiseksi kovin tutkituista panssarilevyistä. Valmistaja ilmoittaa levyn kovuudeksi noin 60 HRC (Impoinvest Oy, 2016b). Sen keskimääräinen mitattu kovuus oli tässä tutkimuksessa käsittelemättömältä pinnalta mitattuna hieman ilmoitettua kovempi eli $61,0 \pm 1,5$ HRC. Ero pienimmän ja suurimman tuloksen välillä oli 8,8 HRC, mikä johtui lähinnä kappaleen hitsatun pinnan epätasaisuudesta. Hiotulta pinnalta mitatut tulokset eivät poikenneet merkittävästi käsittelemättömältä pinnalta mitatuista. Keskiarvokovuudeksi saatiin hiotulta pinnalta mitattuna $60,7 \pm 1,5$ HRC ja suurimman ja pienimmän arvon eroksi 5,5 HRC. Kuvio alla esittää koekappaleen HRC-pinnankovuudet (kuvio 3).



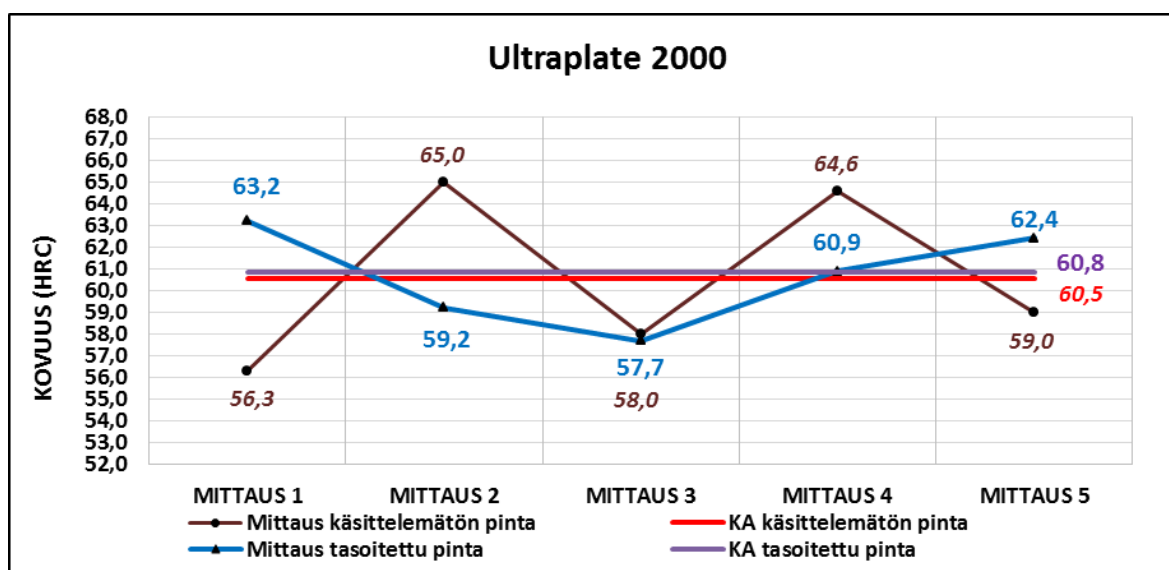
KUVIO 3 Impoweld-W 100 -panssarilevyn pinnankovuus (HRC) (Viitala, 2016)

Vickersillä mitattuna Impoweld-W 100 oli kovin tutkituista panssarilevyistä. Muista mittauskohdista poikkeava korkein tulos (842 HV10) saattaa selittyä kovan karbidin tai karbidikasautuman osuudesta mittausalueelle. Keskimääräiseksi kovuudeksi mitattiin tällä menetelmällä noin 733 ± 7 HV10. Kuten alla olevasta kuviosta on nähtävissä, perusmateriaali oli varsin tasalaatuinen (kuvio 4). Kovahitsipinnoite ulottui mittauskohdassa noin 5 mm päähän pinnasta.



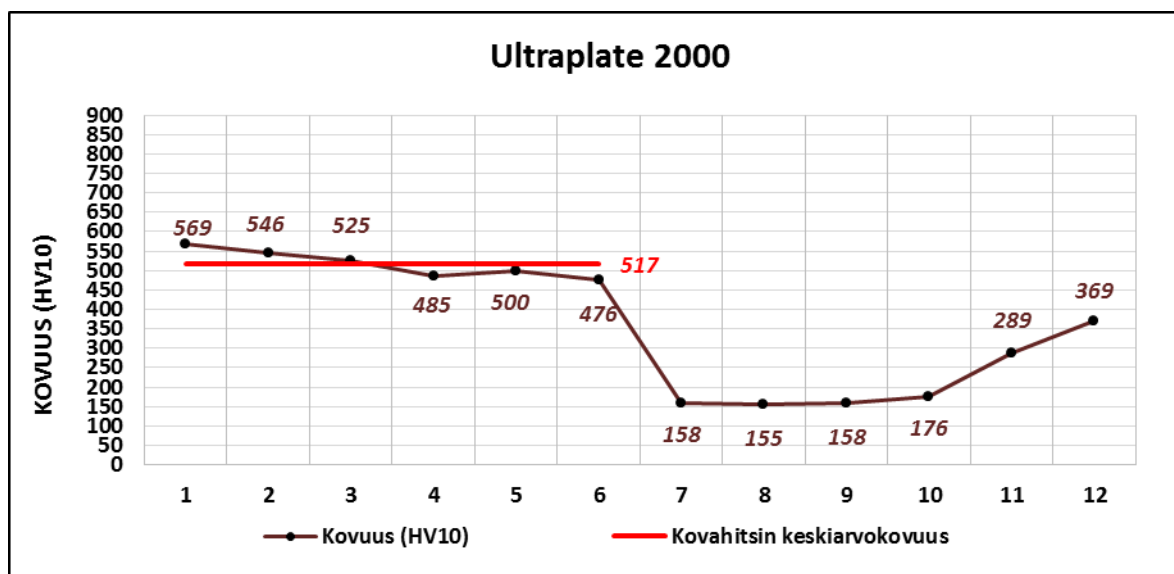
KUVIO 4 Impoweld-W 100 -panssarilevyn kovahitsin ja perusmateriaalin Vickers HV10 -kovuus (Viitala, 2016)

Ultraplate 2000 oli käsittelemättömältä pinnalta mitattuna kovin Ultraplate-sarjan levyistä. Sen mitattu kovuus oli enemmän, kuin valmistajan ilmoittama arvio 58–60 HRC (SKM Service Oy, 2015). Kuviosta alla nähdään, että koekappaleen käsittelemättömän pinnan kovuudeksi mitattiin $60,5 \pm 1,5$ HRC ja pienimmän ja suurimman arvon eroksi 8,7 HRC (kuvio 5). Hioltulta pinnalta mitattuna ero pienimmän ja suurimman arvon välillä oli 5,5 HRC ja keskimääräinen kovuus $60,8 \pm 1,5$ HRC.



KUVIO 5 Ultraplate 2000 -panssarilevyn pinnankovuus (HRC) (Viitala, 2016)

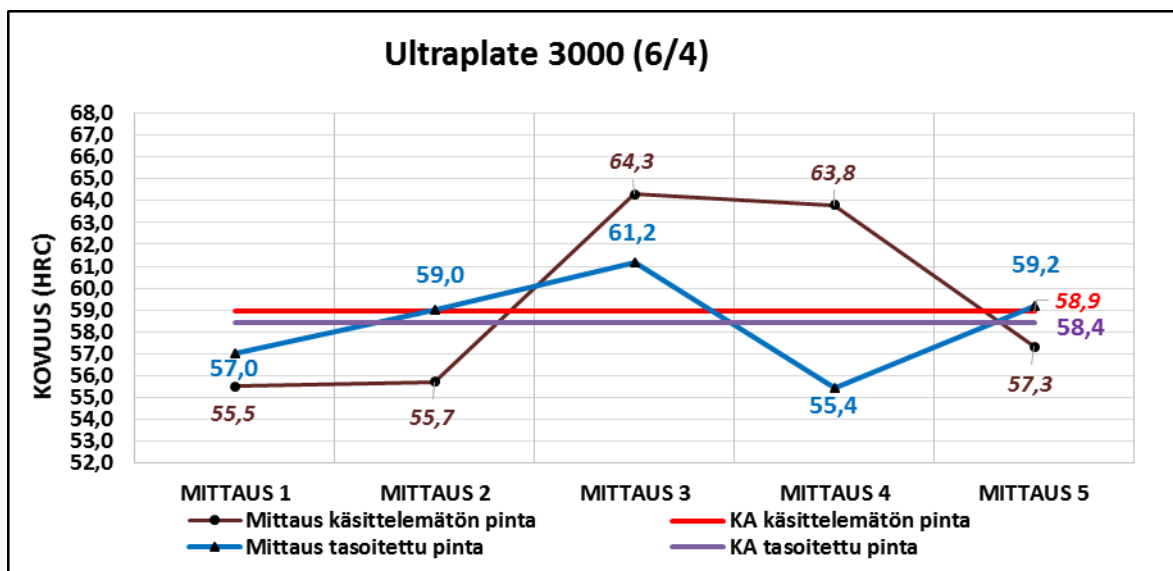
Ultraplate 2000 -panssarilevyn Vickers-kovuuskokeen tulokset erosivat varsin paljon Rockwell-mittauksista. Kovahitsin keskikovuudeksi mitattiin 517 ± 7 HV10, mikä vastaa Rockwell C -asteikolla vain noin 50,5:ttä HRC:tä. Syytä tähän ei löydetty; ehkä pinta on jotenkin lujittunut hitsauksen jälkeen tai karbidikasaumia ei vain sattunut mittausalueelle. Perusmateriaalina koekappaleessa oli käytetty ilmeisesti jotain karkaistua levyä, koska kovuusarvot kasvoivat ennen levyn pohjapintaa nopeasti. Kuten kuviosta yllä huomataan, kovahitsipinnoite ulottui mittauskohdassa noin 6 mm päähän pinnasta (kuvio 6).



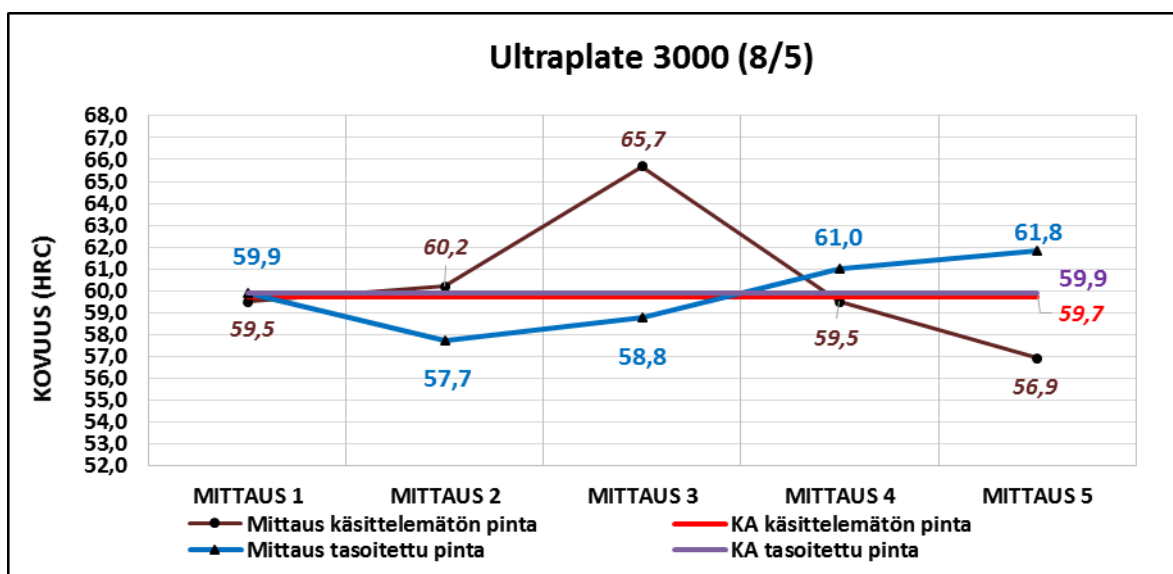
KUVIO 6 Ultraplate 2000 -panssarilevyn kovahitsin ja perusmateriaalin Vickers HV10 -kovuus (Viitala, 2016)

Ultraplate 3000 -panssarilevystä saatiin tutkittavaksi kaksi erikokoisesta panssarilevystä leikattua koekappaletta: 6 mm + 4 mm ja 8 mm + 5 mm. Tutkimuksessa mitattiin kovuudet molemmista, vaikka niiden pintamateriaali pitäisi olla samalla lisäaineella hitsattu. Valmistajan ilmoittama keskimääräinen kovuusarvio 57–60 HRC (SKM Service Oy, 2015) pitää hyvin paikkansa, sillä kuten kuviot seuraavalla sivulla osoittavat, käsittelemättömältä pinnalta mitattuna mitattiin koepalojen keskikovuusiksi $58,9 \pm 1,5$ HRC ja $59,7 \pm 1,5$ HRC (kuvio 7 ja kuvio 8). Molempien koekappaleiden isoimman ja pienimmän arvon ero oli 8,8 HRC. Ohuemman koekappaleen keskimääräinen pinnankovuus osoittautui tässä mittauksessa Ultraplate-levyistä ja myös koko tutkittavana olleista levyistä pehmeimmäksi, tosin erot olivat pieniä. Tulokset tasoittuivat hiotulta pinnalta mitattaessa: pienimmän ja suurimman arvon ero oli ohuemmassa tuotteessa hiotulta pinnalta mitattuna 5,5 HRC ja paksummassa tuotteessa vain 3,3 HRC. Keskikovuudet eivät kuitenkaan muuttuneet merkittävästi: ohuempi $58,4 \pm 1,5$ HRC ja paksumpi tuote $59,9 \pm 1,5$ HRC.

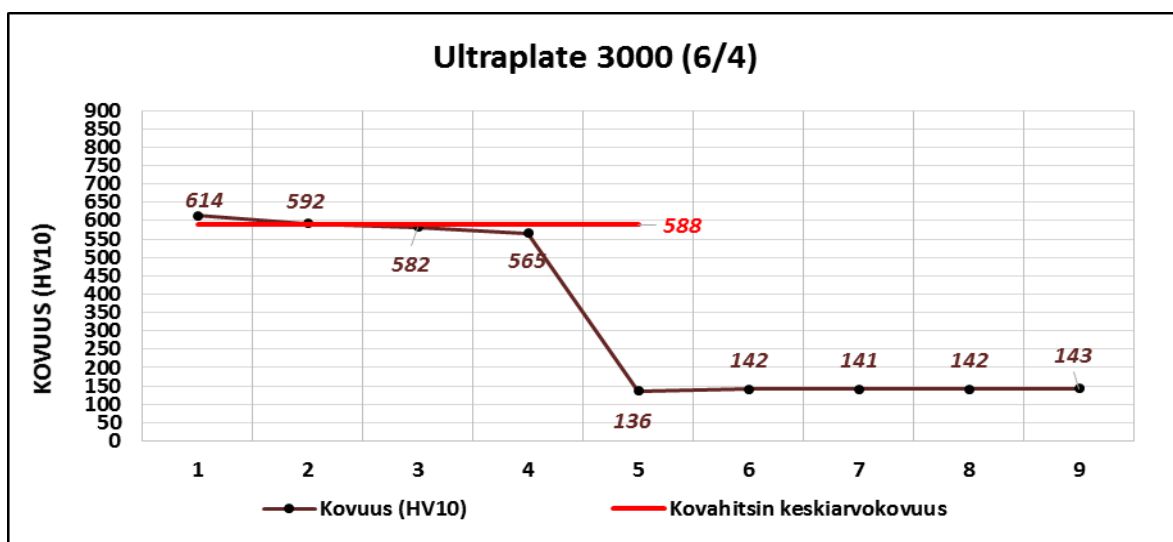
Kuviot seuraavilla sivuilla osoittavat, että erot ohuemman ja paksumman Ultraplate 3000 -levyn välillä näkyivät myös Vickers-kovuuskokeessa (kuvio 9 ja kuvio 10). 10 mm paksun levyn kovahitsipinnoite ulottui noin 4 mm syvyyteen ja sen keskikovuus oli noin 588 ± 7 HV10 ja 13 mm paksun levyn kovahitsipinnoite ulottui mittausten perusteella mittauskohdassa myös 4 mm syvyyteen ja sen keskikovuus oli 545 ± 7 HV10. Perusmateriaalien kovuudet olivat varsin lähellä toisiaan.



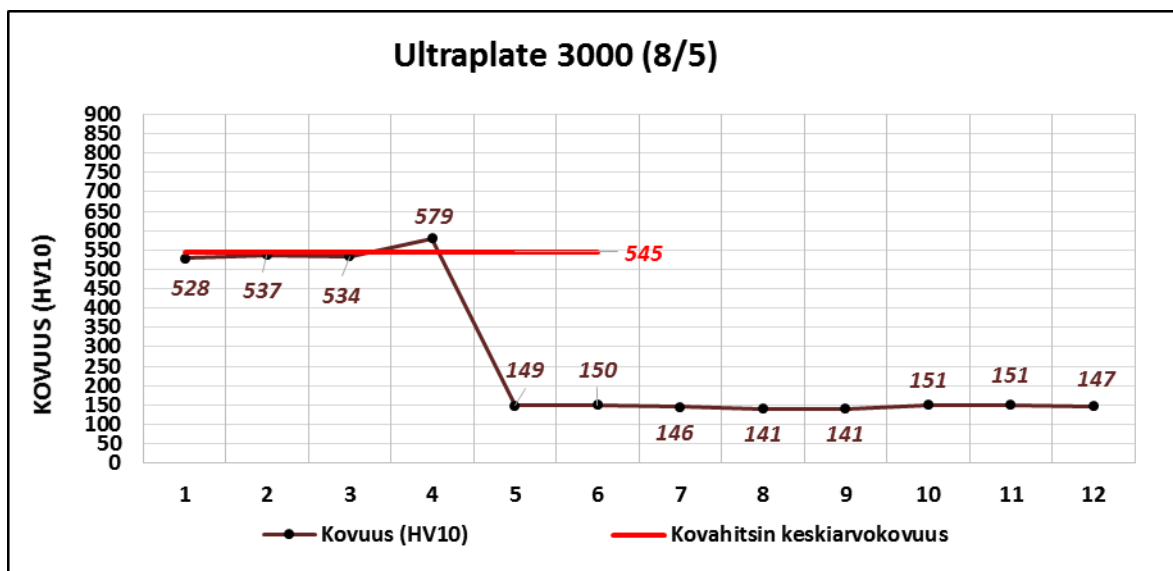
KUVIO 7 Ultraplate 3000 (6/4) -panssarilevyn pinnankovuus (HRC) (Viitala, 2016)



KUVIO 8 Ultraplate 3000 (8/5) -panssarilevyn pinnankovuus (HRC) (Viitala, 2016)

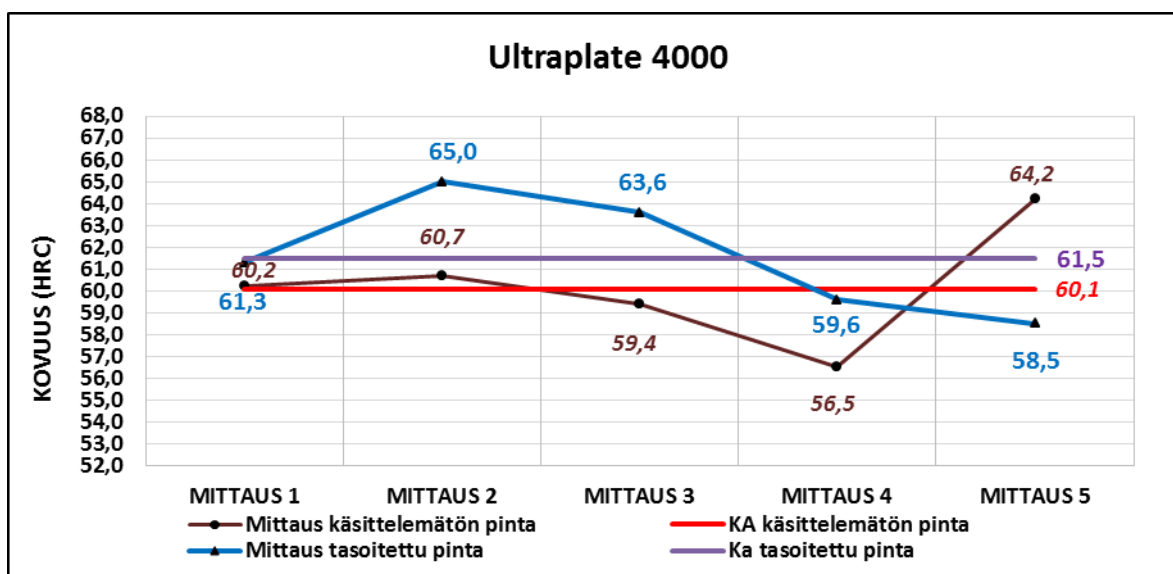


KUVIO 9 Ultraplate 3000 (6/4) -panssarilevyn kovahitsin ja perusmateriaalin Vickers HV10 -kovuus (Viitala, 2016)



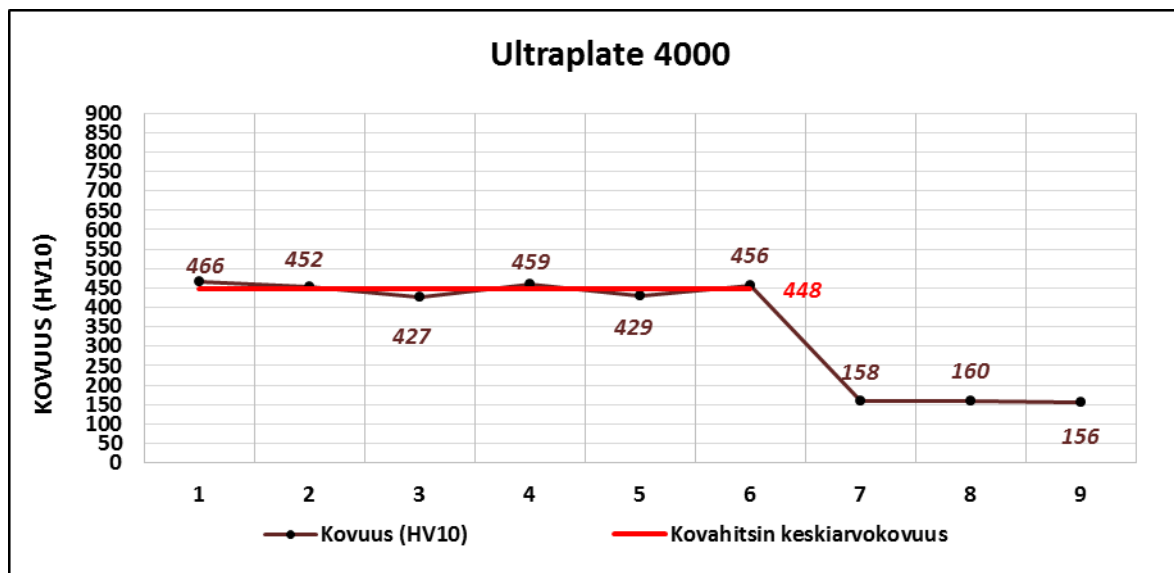
KUVIO 10 Ultraplate 3000 (8/5) -panssarilevyn kovahitsin ja perusmateriaalin Vickers HV10 -kovuus (Viitala, 2016)

Ultraplate 4000 -panssarilevy on valmistajan mukaan kovin tutkittavaksi lähetetyistä Ultraplate-sarjan levyistä. Maahantuojan tietojen mukaan panssarilevyn kovuus on noin 60–62 HRC (SKM Service Oy, 2015). Käsittlemättömältä pinnalta mitattuna sen keskimääräinen kovuus jäi kuitenkin jopa pienemmäksi kuin Ultraplate 2000 -panssarilevyn, koska sen keskimääräiseksi pinnan kovuudeksi mitattiin $60,1 \pm 1,5$ HRC. Pienimmän ja suurimman arvon ero oli pienin tämän sarjan levyistä 7,7 HRC. Hiotulta pinnalta mitattiin kuitenkin Ultraplate-sarjan korkein keskiarvokovuus $61,5 \pm 1,5$ HRC. Pienimmän ja suurimman arvon ero pieneni hieman sen ollessa nyt 6,5 HRC. Kuvio alla esittää tämän tuotteen koekappaleen HRC-mittaustulokset (kuvio 11).



KUVIO 11 Ultraplate 4000 -panssarilevyn pinnankovuus (HRC) (Viitala, 2016)

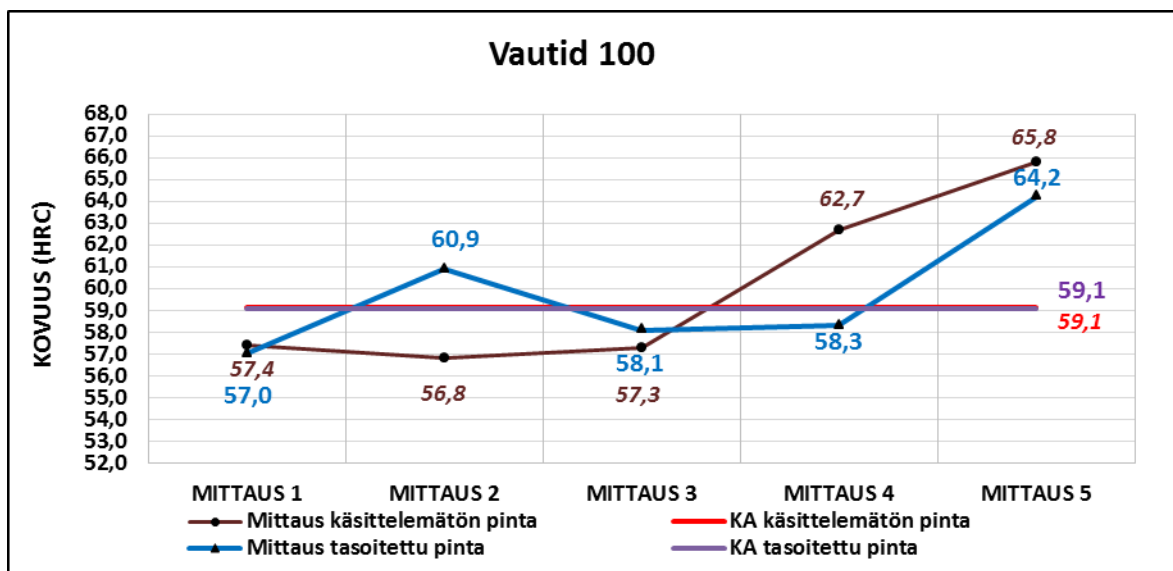
Vickersillä saadut mittaustulokset osoittivat Ultraplate 4000 -panssarilevyn kovahitsin tasalaatuisimmaksi kaikista tutkittavana olleista panssarilevyistä. Yllättäen se oli kuitenkin tutkimuksen pehmein panssarilevy Vickersillä mitattuna. Sen kovahitsin keskiarvokovuudeksi mitattiin vain 448 ± 7 HV10. Kuviosta alla huomataan, että hitsauspinnoite ulottui noin 6 mm syvyyteen pinnasta (kuvio 12). Tuote ei ole täysin vertailukelpoinen paksumpiin panssarilevyihin ohuemman kovahitsikerroksensa takia.



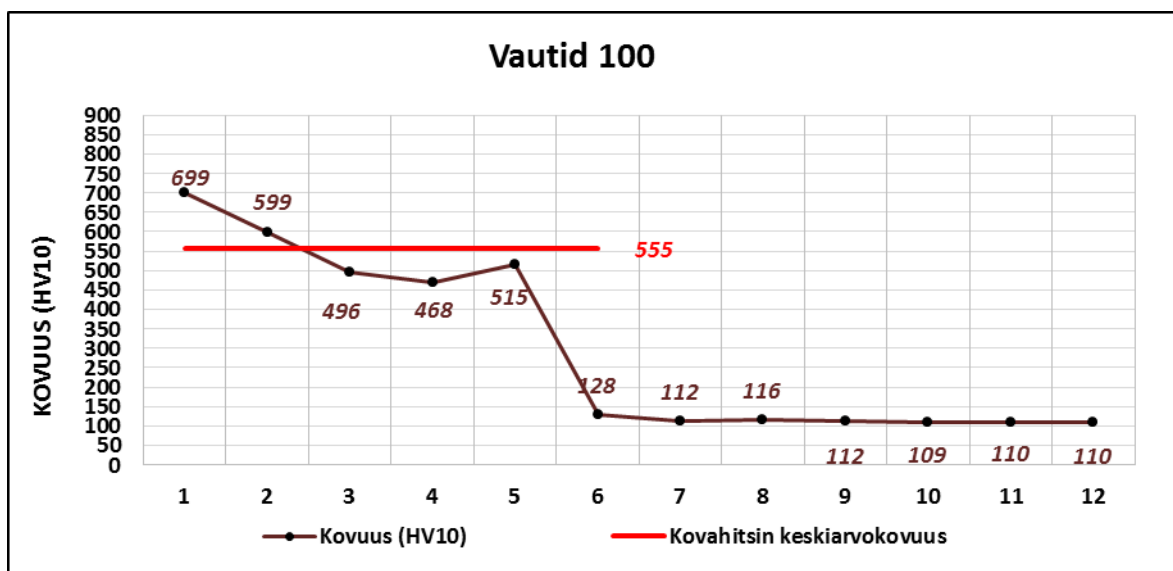
KUVIO 12 Ultraplate 4000 -panssarilevyn kovahitsin ja perusmateriaalin Vickers HV10 -kovuus (Viitala, 2016)

Vautid 100 -panssarilevy on tutkituista panssarilevyistä kovuudeltaan ainoa, minkä sekä käsittelemättömältä että hiotulta pinnalta mitattu keskimääräinen kovuus jäi tutkimuksessa alle valmistajan ilmoittaman 60:n HRC -kovuuden (Impomet Oy, 2016a). Tosin mitattu kovuus pysyi edelleen virhetoleranssien sisällä. Keskimääräinen pinnankovuus oli molemmissa mittauksissa sama eli $59,1 \pm 1,5$ HRC. Kuviosta seuraavalla sivulla nähdään, että käsittelemättömältä pinnalta mitattu keskiarvokovuus vaihteli 56,8:n HRC:n ja 65,8:n HRC:n välillä ja koekappaleen pienimmän ja suurimman mitausarvon ero oli koko tutkimuksen suurin eli 9,0 HRC (kuvio 13). Hiotulta pinnalta mitattuna tuo ero hieman tasaantui, mutta oli edelleen koko joukon suurin.

Myös Vickers-kovuuskoe osoitti, että Vautid 100 -panssarilevyn kovahitsin kovuusarvojen pienimmän ja suurimman arvon ero oli suurin tutkittavista tuotteista eli peräti 231 HV10. Ero voi selittyä kovan karbidin osumisesta mittauskohtaan, mistä korkein lukema mitattiin tai pinnan muokkauslujittumisesta jostain syystä juuri mittauskohdalla. Keskiarvokovuus oli 555 ± 7 HV10, ja se asettui vertailussa hieman keskiarvon alapuolelle. Kuvio seuraavalla sivulla osoittaa mittaustulokset ja kovahitsin keskiarvokovuuden tälle tuotteelle (kuvio 14).

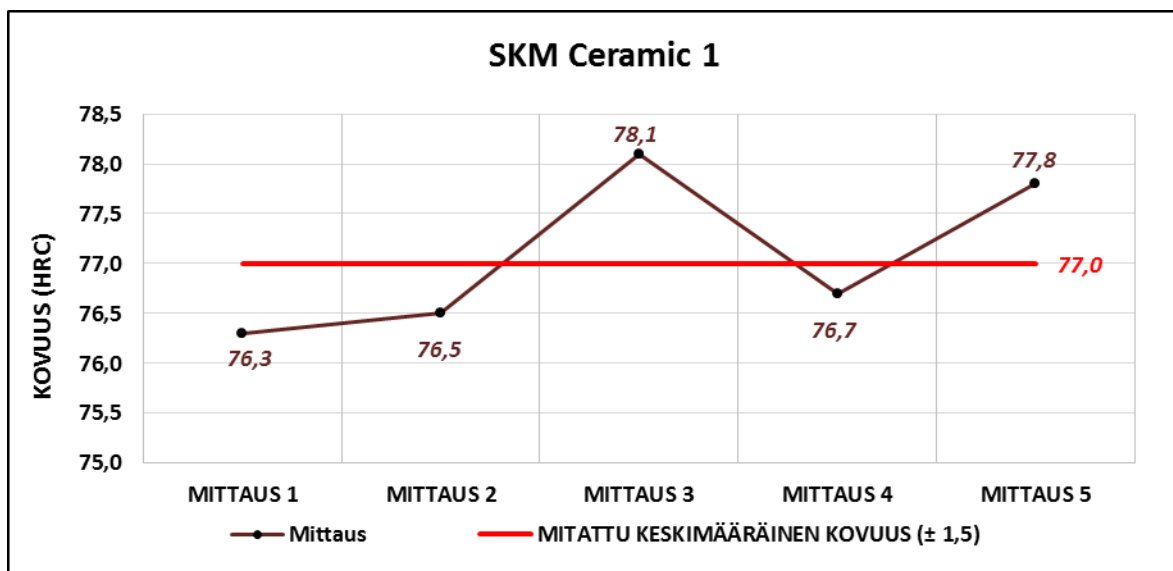


KUVIO 13 Vautid 100 -panssarilevyn pinnankovuus (HRC) (Viitala, 2016)



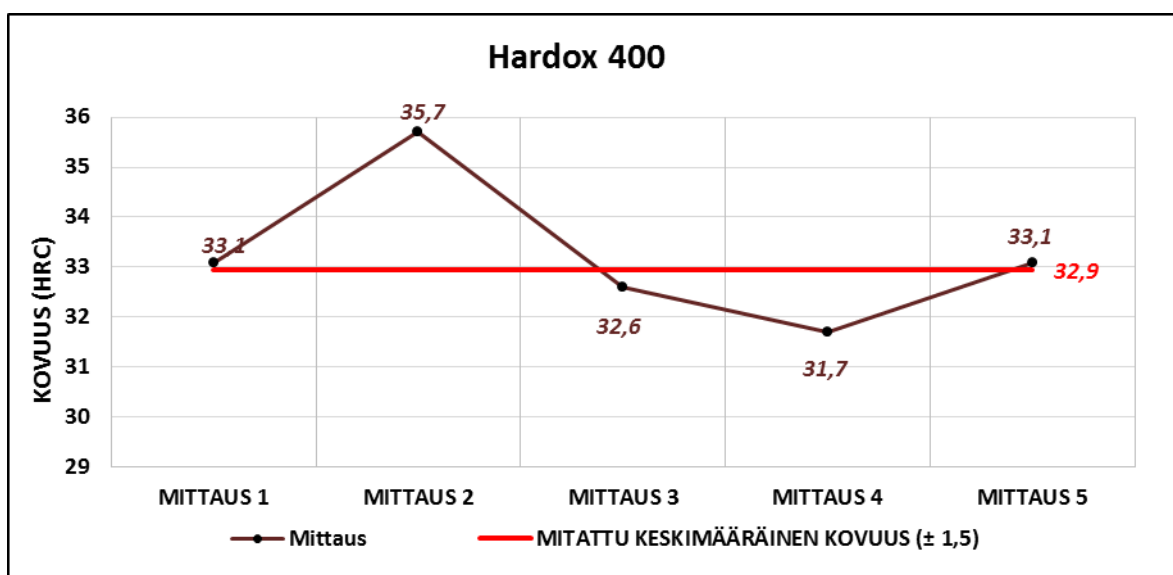
KUVIO 14 Vautid 100 -panssarilevyn kovahitsin ja perusmateriaalin Vickers HV10 -kovuus (Viitala, 2016)

Keraamisesta SKM Ceramic 1 -keraamista ei ollut saatavilla aiemmin tutkittua kovuutta tai sitä ei ainakaan tutkijoille ilmoitettu. Tuotteen pinta oli erittäin tasainen ja hyvälaatuinen, mikä näkyi myös mittaustuloksissa. Ero pienimmän ja suurimman arvon välillä oli vain 1,8 HRC. Tuote oli myös varsin kova, koska koekappaleen keskimääräiseksi kovuudeksi mitattiin $77,0 \pm 1,5$ HRC, kuten kuvio seuraavalla sivulla osoittaa (kuvio 15). Tuotteesta mitattiin vain HRC -kovuudet, koska tuotteessa ei ole kovahitsiä.



KUVIO 15 SKM Ceramic 1 -keraamin pinnankovuus (Viitala, 2016)

Hardox 400 -kulutusteräksestä mitattiin vain sen pintakovuus. Tuotteessa ei ole kovahitsiä, joten Vickers-mittauksia ei sille tehty. Tämän koekappaleen keskikovuudeksi mitattiin $32,9 \pm 1,5$ HRC. Tämä kulutusteräs on siis noin puolet pehmeämpää kuin panssarilevyjen kovahitsattu pinta. Kuten kuvioista alta huomaamme, tuote oli pinnaltaan varsin tasalaatuinen, koska pienimmän ja suurimman tuloksen ero oli vain noin 4,0 HRC (kuvio 16).



KUVIO 16 Hardox 400 -kulutusteräksen pinnankovuus (HRC) (Viitala, 2016)

Verrattaessa panssarilevyjen kovuuksia valmistajien antamiin kovuusarvoihin, suuria heittoja Rockwell C -mittaustuloksissa ei esiintynyt. Tutkittavana olleista tuotteista kovimmaksi kovahitsatulla pinnalla varustetuksi panssarilevyksi osoittautui tässä tutkimuksessa käsittelemättömältä pinnalta mitattuna Impoweld-W 100 ja pehmeimmäksi Ultraplate 3000 (6/4). Tasaisimmaksi tuotteeksi kovuudeltaan osoittautui Coroplate 143 ja suurimmat pienimmän ja suurimman kovuusarvon erot oli Vautid 100 -panssarilevyllä. Hioltulta pinnalta mitattuna kovin panssarilevy oli Coroplate 143 ja pehmein Ultraplate 3000 (6/4). Erot olivat tosin pieniä ja virheen mahdollisuus mittaustuloksissa on

mahdollista tuotteiden pinnanlaadun vaihtelun vuoksi, joten näitä tuloksia tulee tarkastella pienellä kriittisyydellä. Taulukko alla esittää tässä tutkimuksessa Rockwellin kovuuskoemenetelmällä mitattujen tuotteiden keskimääräiset pinnankovuudet, pienimmän ja suurimman tuloksen erotuksen, sekä valmistajan ilmoittaman keskimääräisen pinnankovuuden (taulukko 1).

Vertailukappaleena olleen keraamisen SKM Ceramic 1 -keraamin ero kovahitsattuun panssarilevyyn näkyi tässä tutkimuksessa siten, että pinnanlaatu oli parempi ja kovuusarvojen mittaaminen siten luotettavampaa. Keraaminen levy oli myös huomattavasti kovempaa kuin kovahitsattu. Kulutusteräs Hardox 400 oli myös tasalaatuinen tuote panssarilevyihin verrattuna, mutta se oli noin puolet pehmeämpää. S235-perusteräksestä ei mitattu kovuuksia.

Vickers-kovuusmittausten perusteella tasalaatuisimmiksi tuotteiksi osoittautui Coroplate 143, Ultraplate 3000 -levyt sekä Ultraplate 4000. Taulukosta seuraavalta sivulta nähdään, että suurin ero pienimmän ja suurimman kovuusarvon välillä oli Impoweld-W 100 -panssarilevyssä (taulukko 2). Kovahitsipinnoitteista kovin on Impoweld-W 100 -panssarilevyllä, mistä mitattiin myös kovin Vickers-arvo eli 843 HV10. Kovin perusmateriaali oli Ultraplate 2000 -panssarilevyllä. Taulukosta huomaamme myös, että Ultraplate 4000 -panssarilevyn kovahitsin rakenne oli pehmein ja pehmein perusmateriaali oli Vautid 100 -panssarilevyllä. Kokonaisuutena pehmein levy oli Ultraplate 3000 (8/5).

Kovahitsit ulottuivat keskimäärin 5 mm syvyyteen pinnasta. Parhaat panssarilevyt tällä osa-alueella olivat Coroplate 143 ja Ultraplate 2000, joiden hitsit ulottuivat noin 6 mm syvyyteen. Ultraplate 3000 -panssarilevyjen pinnoitteet olivat ohuimpia eli noin 4 mm.

TAULUKKO 1 Pinnankovuuksien vertailu (HRC) (Viitala, 2016)

Tuote	Mitattu keskimääräinen pinnankovuus ($\pm 1,5$) käsittelemätön pinta	Pienimmän ja suurimman arvon erotus käsittelemätön pinta	Mitattu keskimääräinen pinnankovuus tasoitettu pinta ($\pm 1,5$)	Pienimmän ja suurimman arvon erotus tasoitettu pinta	Valmistajan ilmoittama kovuus
Coroplate 143	60,3	3,0	62,3	1,7	60-62
Hardox 400	32,9	4,0	33,0	2,4	42
Impoweld-W 100	61,0	8,8	60,7	5,5	60
SKM Ceramic 1	77,0	1,8	<i>ei mitattu</i>		ei tiedossa
Ultraplate 2000	60,5	8,7	60,8	5,5	58-60
Ultraplate 3000 (6/4)	58,9	8,8	58,4	5,8	57-60
Ultraplate 3000 (8/5)	59,7	8,8	59,9	3,3	57-60
Ultraplate 4000	60,1	7,7	61,5	6,5	60-62
Vautid 100	59,1	9,0	59,1	7,2	60
KESKIARVO (panssaril)	60,0	7,8	60,4	5,1	

TAULUKKO 2 Vickers HV10 vertailu (Viitala, 2016)

	Coroplate 143	Impoweld- W 100	Ultraplate 2000	Ultraplate 3000 (6/4)	Ultraplate 3000 (8/5)	Ultraplate 4000	Vautid 100	KA kaikki
Kovahitsin keskiarvokovuus	702	733	517	588	545	448	555	584
Perusmateriaalin keskiarvokovuus	133	128	218	141	147	158	114	148
Koko tuotteen keskiarvokovuus	418	380	367	340	280	351	298	348
Kovahitsin suurimman ja pienimmän arvon erotus	51	212	93	49	51	39	231	104
Perusmateriaalin suurimman ja pienimmän arvon erotus	11	16	214	7	10	4	19	40
Koko tuotteen suurimman ja pienimmän arvon erotus	606	721	414	478	438	310	590	508

6.2 Makrohietutkimukset stereomikroskoopilla ja dokumenttikameralla

Hieet valmistettiin vain panssarilevyjen koekappaleista. Hieiden valmistamiseksi jouduttiin leikkaamaan kulmahiomakoneella sopivan kokoiset kappaleet valmistajien lähettämistä kappaleista. Toimenpide lämmitti hiukan kappaleita, mutta lämmön ei katsottu vaikuttaneen kappaleen kovahitsin kovuuteen tai mikrorakenteeseen ratkaisevasti. Tämän jälkeen hieet valmistettiin ja hiottiin standardin SFS-EN ISO 17639 (2013) mukaan seuraavan sivun kuvassa näkyvillä laitteilla (kuva 23).

Makrohietutkimuksessa tarkasteltiin lähinnä pinnoitteessa esiintyviä hitsausvirheitä sekä pinnoitteen ja perusaineen suhdetta. Silmämääräisen tutkimisen lisäksi makrohietä tarkasteltiin sivulla 41 kuvassa nähtävällä stereomikroskoopilla ja ne valokuvattiin samassa kuvassa nähtävällä dokumenttikameralla (kuva 24).

Kovahitsauspinnoitetuissa panssarilevyissä näkyi tuotantoprosessin luonteesta johtuvia, jopa ilman apulaitteita havaittavia poikkeamia mitoissa, ulkonäössä sekä pinnan tasaisuudessa. Kaikissa hieistä otetuissa valokuvissa on nähtävissä hitsipinnoitteissa pieniä reikiä eli huokosia. Nämä hitsausvirheet ovat hyvin tyypillisiä hitsatuissa ja valetuissa tuotteissa ja varsinkin kovahitseissä. Hiessä oli nähtävissä myös pieniä kutistumishalkeamia, mutta niitä pidetään normaaleina ja jopa ominaispiirteinä näissä tuotteissa. Joissakin tuotteissa esiintyi myös sulkeumia. Hitsin ja perusaineen rajat olivat hieissä myös varsin selvästi nähtävissä. Joissakin valokuvissa on nähtävissä selvästi Vickersin kovuuskokeen jättämiä jälkiä.

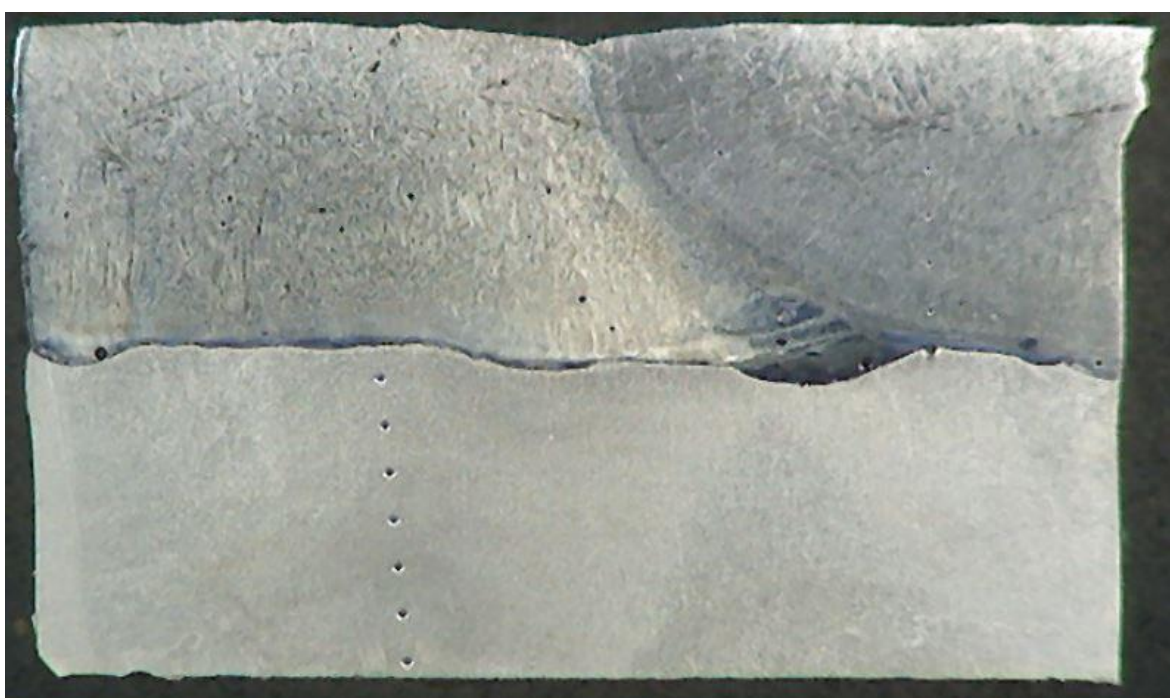


KUVA 23 Hieiden valmistukseen käytetty laitteisto: muovimuotin valamiseen käytetty laite (vas. yllä), jäähdyttävä tasohiomakone (oik. yllä) ja hieiden hiomalaite (alla) (Viitala, 2016)



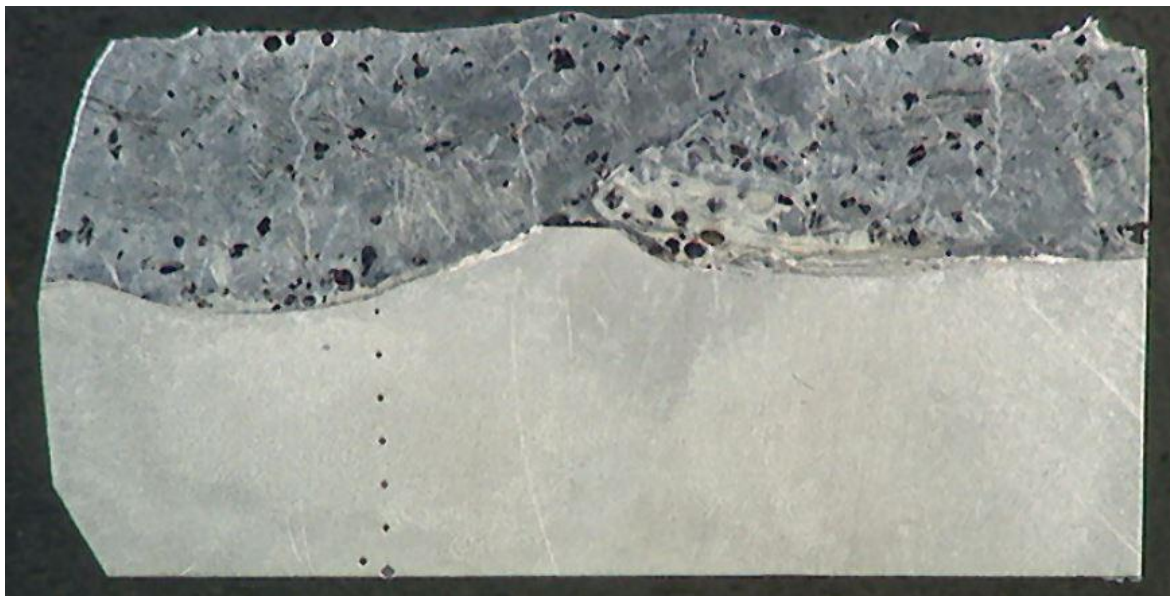
KUVA 24 Makrohietutkimuksissa käytetty stereomikroskooppi (vas.) ja dokumenttikamera (oik.) (Viitala, 2016)

Coroplate 143 -panssarilevyn hieestä otetussa kuvassa alla näkyy selvästi hitsipalon raja lähes keskellä hietää (kuva 25). Halkeamia ja suuria huokosia koekappaleessa otetussa hieessä ei näy. Raja perusmateriaalin ja kovahitsin välillä on tutkittavista koepaloista kokonaisuutena tasaisimpia, mikä kertoo tasaisesta perusaineen sekoittumisesta pinnoitteen hitsauksessa käytettyyn lisäaineeseen. Vickers-kovuuskokeen jäljet näkyvät vasemmalla.



KUVA 25 Coroplate 143 -panssarilevyn hie (Viitala, 2016)

Impoweld-W 100 -levyn hieestä otetussa kuvassa näkyy useita pieniä halkeamia ja hyvin pieniä huokosia (kuva 26). Hieen keskellä näkyy selkeästi hitsipalojen raja. Kovahitsin ja perusmateriaalin raja on selvästi näkyvissä ja perusmateriaali on sekoittunut lisäaineeseen epätasaisesti varsinkin kuvassa vasemmalla puolella näkyvällä alueella. Vickers-kovuuskokeen jäljet näkyvät selvästi vasemmalla.



KUVA 26 Impoweld-W 100 -panssarilevyn hie (Viitala, 2016)

Ultraplate 2000 -levyn hieestä otetussa valokuvassa näkyy useita pieniä halkeamia, mutta vain muutamia huokosia (kuva 27). Hitsipalon raja jää kuvassa aivan oikeaan reunaan. Kovahitsin ja perusmateriaalin raja näkyy myös selvästi ja se on varsin epätasainen. Se tarkoittaa, että perusmateriaalin ja hitsin lisäaine ovat sekoittuneet epätasaisesti. Vickers-kovuuskokeen mittausrivi näkyy vasemmalla.



KUVA 27 Ultraplate 2000 -panssarilevyn hie (Viitala, 2016)

Ultraplate 3000 (6/4) -panssarilevyn hieestä otetussa kuvassa näkyy pieniä huokosia ja sulkeumia (kuva 28). Myös yksi, koko hitsin läpi edennyt halkeama erottuu kuvan vasemmassa reunassa. Perusmateriaali ja lisäaine ovat sekoittuneet tasaisesti, joten hitsin raja perusmateriaalin kanssa on hyvin tasainen. Hitsipalon rajoja ei hieessä näy.



KUVA 28 Ultraplate 3000 (6/4) -panssarilevyn hie (Viitala, 2016)

Ultraplate 3000 (8/5) -panssarilevyn hieestä otetussa kuvassa alla näkyy kaksi koko hitsin läpi edennyttä halkeamaa ja erikokoisia sulkeumia ja huokosia (kuva 29). Hitsipalon rajoja ei erotu. Perusmateriaalin ja hitsin raja on varsin tasainen ja selvä, eikä korkeaa sekoittumista perusaineen ja lisäaineen välillä ole erotettavissa. Vickers-kovuuskokeen mittausjäljet näkyvät vasemmalla.



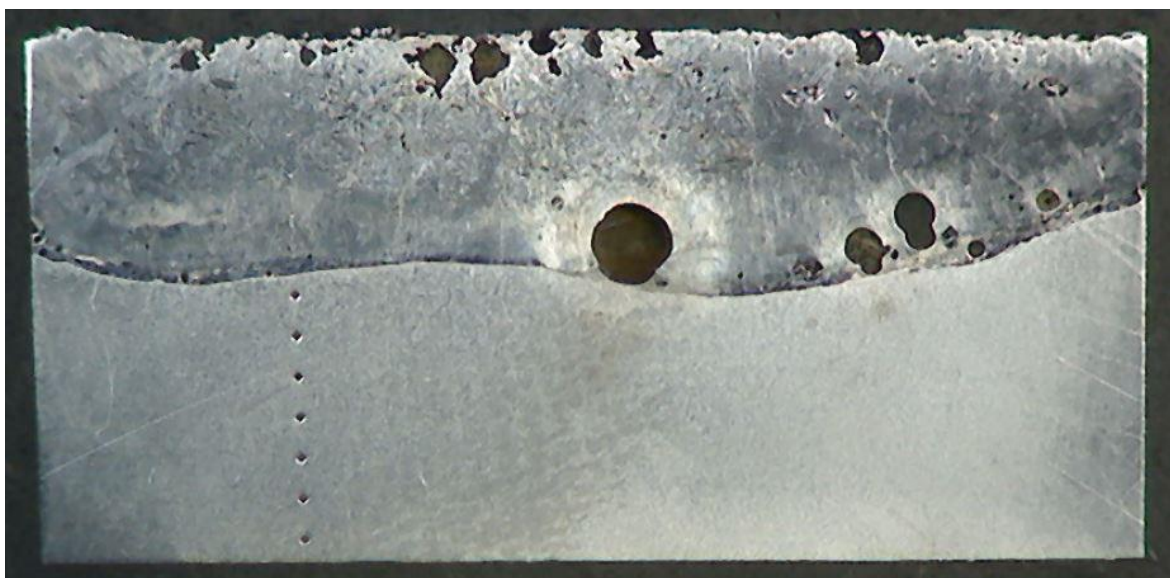
KUVA 29 Ultraplate 3000 (8/5) -panssarilevyn hie (Viitala, 2016)

Ultraplate 4000 -levyn hieestä otetussa kuvassa näkyy vasemmassa reunassa hitsipalon raja (kuva 30). Hitsissä on myös pieniä halkeamia ja muutamia erikokoisia huokosia ja sulkeumia. Perusmateriaalin ja kovahitsin raja erottuu selkeästi ja perusmateriaali on sekoittunut vain hieman hitsauslisäaineeseen.



KUVA 30 Ultraplate 4000 -panssarilevyn hie (Viitala, 2016)

Vautid 100 -levyn hieestä otetussa kuvassa alla näkyy sekä pieniä että todella suuria huokosia varsinkin kovahitsin ja perusmateriaalin rajavyöhykkeellä (kuva 31). Joitain ohuita halkeamiakin poikkeileikkauksessa näkyy. Hitsipalon rajoja ei näy koekappaleesta otetussa hieessä. Kuvassa näkyy myös vasemmalla Vickers-kovuuskokeen perusmateriaaliin jättämä mittausjälkien rivi. Perusmateriaali ja hitsin lisäaine ovat sekoittuneet toisiinsa jonkin verran, mikä näkyy epätasaisena hitsin rajana.



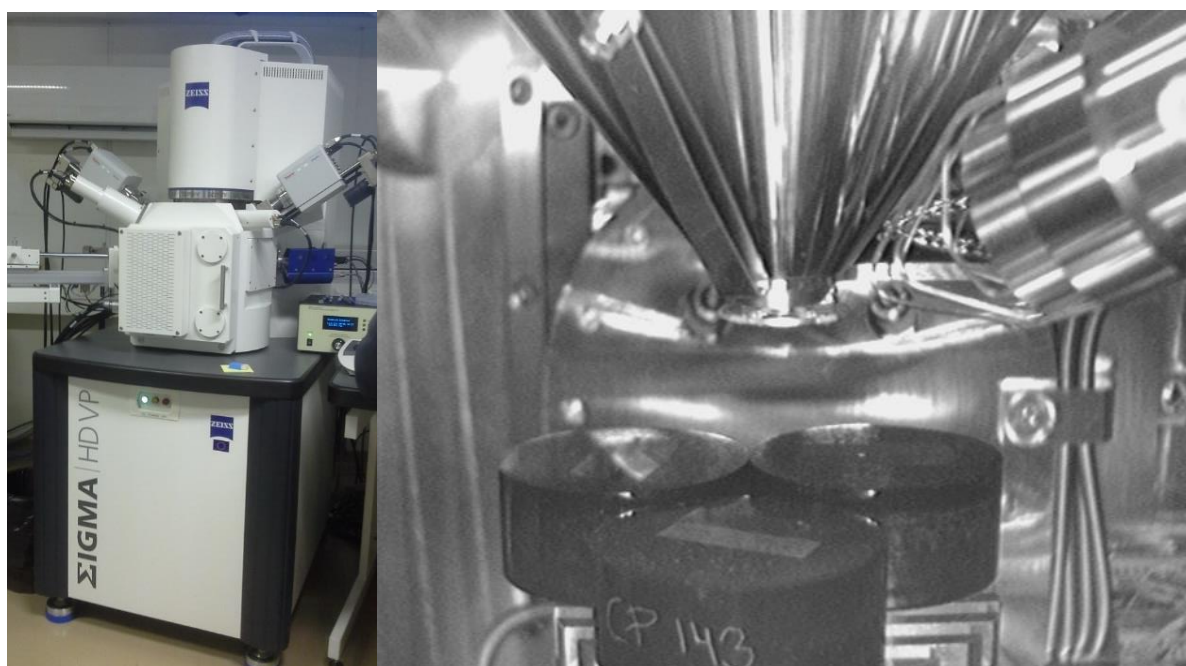
KUVA 31 Vautid 100 -panssarilevyn hie (Viitala, 2016)

6.3 Pyyhkäisyelektronimikroskopitutkimukset (SEM)

Hieitä tutkittiin myös kuvassa alla näkyvällä Zeiss SigmaHD|VP FEG-SEM -pyyhkäisyelektronimikroskopilla (kuva 32). Laitteella koekappaleille tehtiin EDS-analyysi, minkä avulla saatiin selville kovahitsin sisältämät alkuaineet ja niiden pitoisuudet tutkitulla alueella. Saatuja arvoja vertailtiin maa-hantuojien tai valmistajien antamiin arvoihin. Mikrorakenteista otettiin myös pyyhkäisyelektronimikroskooppikuvia. Tutkimus tehtiin yhteistyössä Itä-Suomen yliopiston tutkijan Jari Leskisen kanssa.

Tässä kvantitatiivisessa eli määrällisessä alkuaineanalyysissä hiilen määrä on jätetty mittaustekni-
sistä syitä pois, jotta saataisiin parempi luotettavuus metallien pitoisuuksille kovahitsissä. Mittauksen
määritystarkkuus on 0,1 paino- %.

On muistettava, että kovahitsit voivat sisältää kaikkia valmistajien ilmoittamia alkuaineita, vaikka niitä ei löydetty tutkituilta alueilta. Aineiden pitoisuudet saattoivat olla niin pieniä, ettei niitä erotettu tällä laitteistolla tai ne olivat voineet myös jakautua hitsien alueelle epätasaisesti, minkä vuoksi niitä ei välttämättä löydetty joka puolelta hitsiä. Tämän lisäksi joitakin alkuaineita, kuten esimerkiksi booria, saattaa olla tutkimuksen tehneen Jari Leskisen mukaan vaikea huomata laitteella. Boori muodostaa borideja eli sekoittuu muiden itseään elektronegatiivisempien aineiden kanssa. Laite ei välttämättä pysty silloin erottamaan niitä muista alkuaineista. Myös niobiumkarbideja oli vaikea havaita tuotteista, sillä niitä löytyi vain Coroplate 143 -panssarilevyn kovahitsistä. Jos kaikkia ilmoitettuja alkuaineita havaittiin tutkitulta alueelta, voidaan kovahitsiä pitää onnistuneena ja tasalaatuisena. Kaikki valmistajat eivät ilmoittaneet kaikkien alkuaineiden pitoisuuksia tuotteidensa kovahitseissä. Jotkin koekappaleet sisältävät myös alkuaineita, joita valmistaja ei ole ilmoittanut niissä olevan.



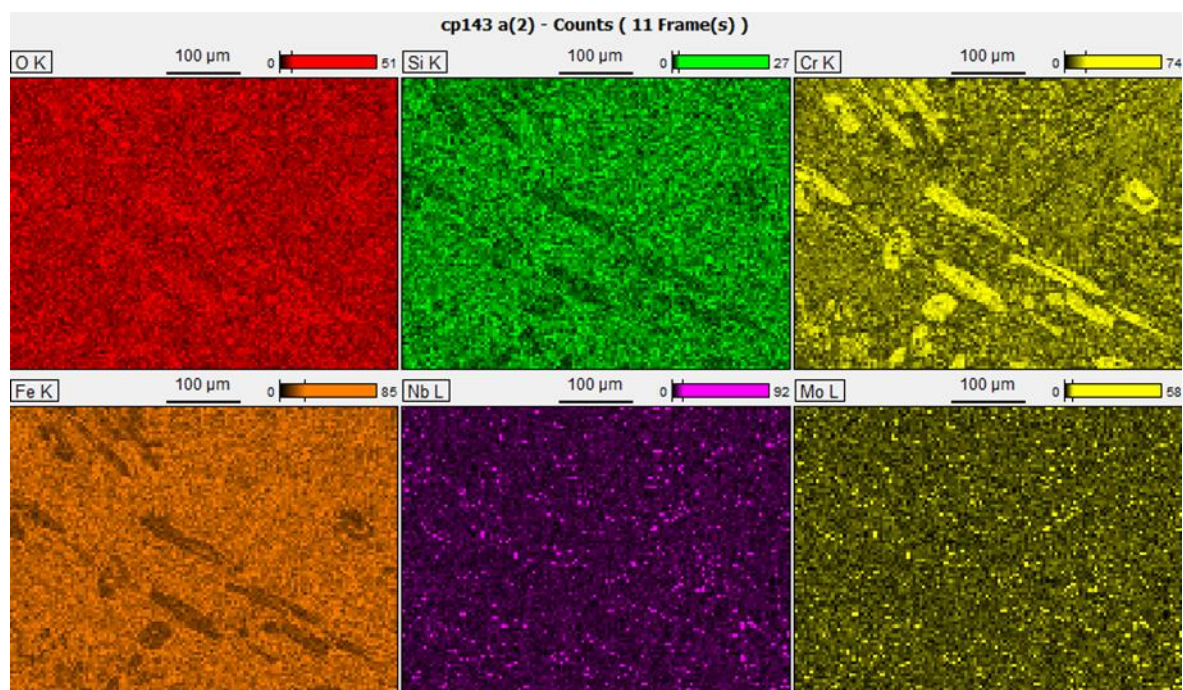
KUVA 32 Itä-Suomen yliopiston Zeiss SigmaHD|VP FEG-SEM pyyhkäisyelektronimikroskooppi ulkoa ja sisältä kuvattuna (SEM) (Viitala, 2016)

Maahantuojaan tietojen mukaan Coroplate 143 -panssarilevyn kovahitsin tulisi sisältää raudan ja hiilen lisäksi kromi-, boori- ja niobiumkarbideja sekä piitä ja mangaania (Somotec Oy, 2016b). Tutkimuksessa ei kuitenkaan havaittu mangaania eikä booria. Koekappaleen kovahitsistä havaittiin piitä 1,6 %, kromia 24,2 %, niobiumia 1,0 %, rautaa 67,6 %, alumiinia 0,1 % ja molybdeeniä 0,1 % (Leskinen, 2016). Tuotteesta havaittiin myös alle 0,1 % vanadiinia. Taulukosta alla nähdään Somotec Oy:n ilmoittamat kovahitsipinnoitteessa vaikuttavat alkuaineet sekä EDS-analyysissä löytyneet alkuaineet pitoisuuksineen (taulukko 3).

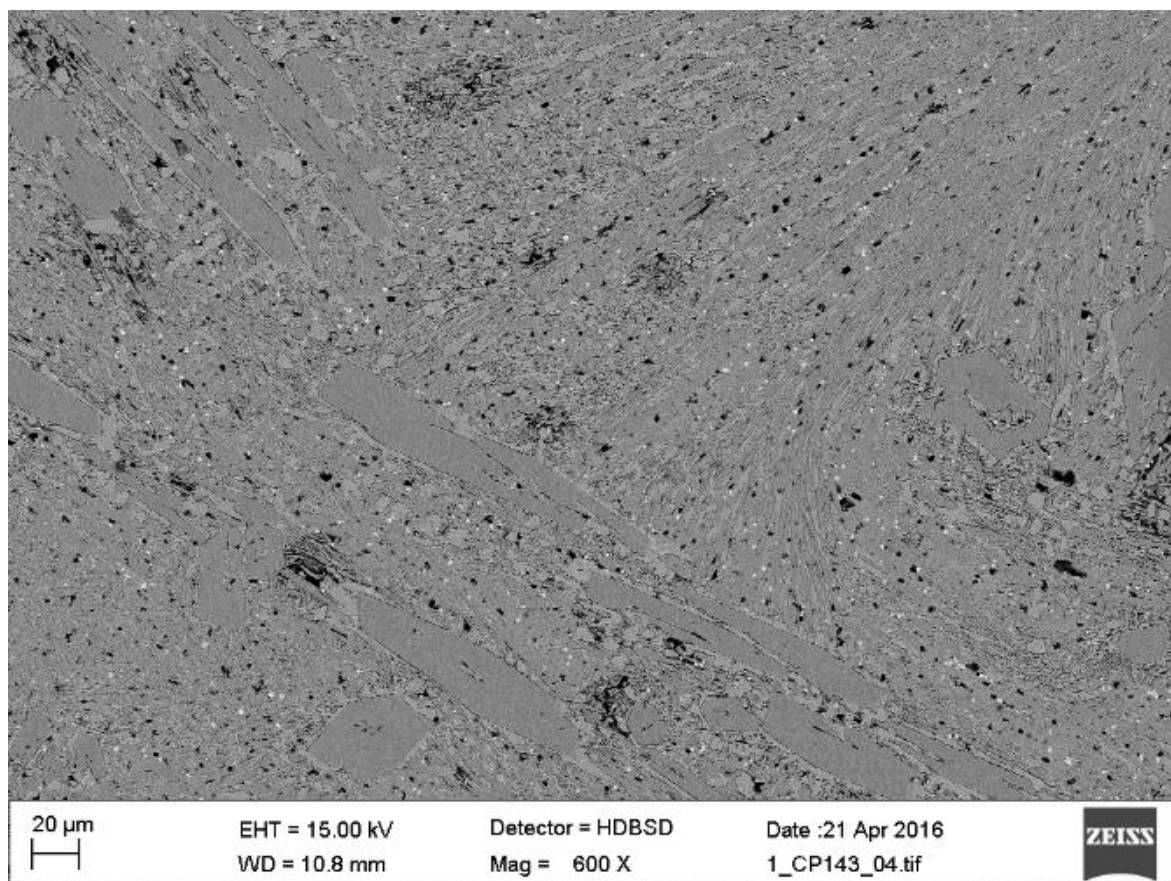
Kuvassa alla nähdään eri alkuaineiden sijoittuminen tutkitulla alueella (kuva 33). Hieestä otetussa pyyhkäisyelektronimikroskooppikuvassa seuraavalla sivulla on nähtävissä niobiumkarbidit valkoisina pisteinä (kuva 34). Myös panssarilevyille tärkeät kromikarbidit näkyvät selkeästi heksagonisine kiderakenteineen.

TAULUKKO 3 Coroplate 143 -panssarilevyn alkuaineanalyysivertailu (Viitala, 2016)

COROPLATE 143		
Alkuaine	Valmistaja	EDS
Si	1,5	1,6
Mn	0,2	0,0
Cr	30,0	24,2
Nb	1,1	1,0
B	0,6	0,0
Fe	60,0	67,6
Mo	ei	0,1
Al	ei	0,1



KUVA 33 Coroplate 143 -panssarilevyn tärkeimpien alkuaineiden sijoittuminen tutkitulla kovahitsin alueella (Leskinen, 2016)



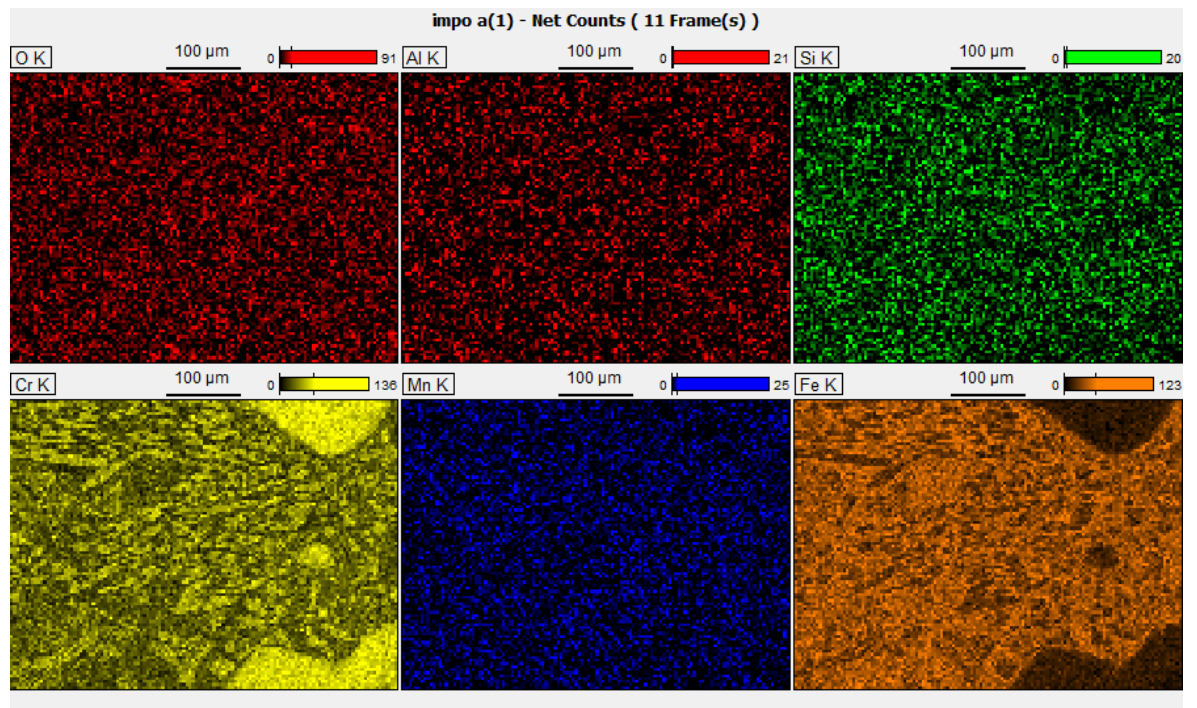
KUVA 34 Coroplate 143 -panssarilevyn pyyhkäisyelektronimikroskooppikuva (Leskinen, 2016)

Maahantuojaan tietojen mukaan Impoweld-W 100 -panssarilevyn kovahitsi sisältää raudan ja hiilen lisäksi lähinnä kromikarbideja (Impoinvest Oy, 2016b). Kromia havaittiinkin enemmän, kun oli odotettavissa eli 37,3 %. Lisäksi havaittiin piitä 0,3 %, mangaania 2,4 % ja rautaa 57,4 % (Leskinen, 2016). Taulukosta alla nähdään Impoinvest Oy:n ilmoittamat kovahitsipinnoitteessa vaikuttavat alkuaineet, sekä EDS-analysissä löytyneet alkuaineet pitoisuuksineen (taulukko 4). Tutkituista tuotteista sen kromipitoisuus oli korkein.

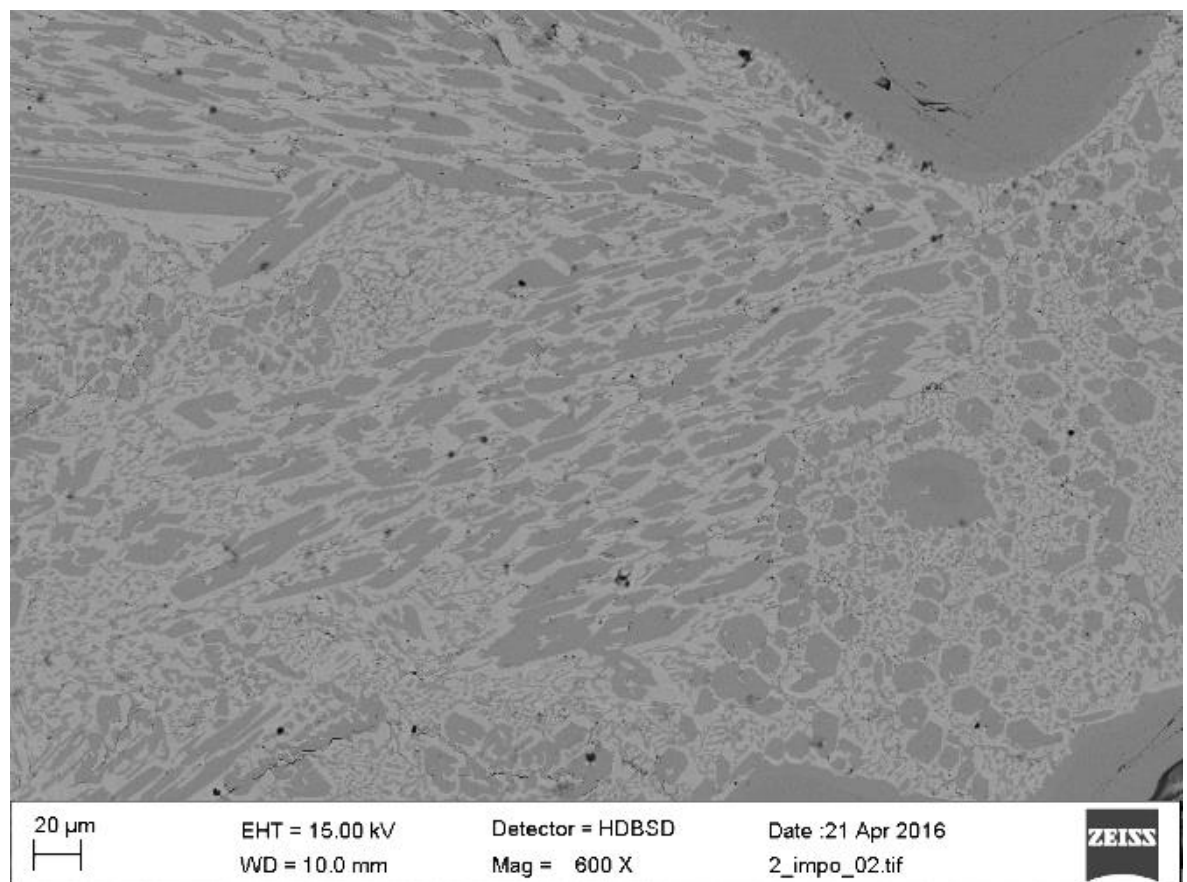
Seuraavan sivun ylemmässä kuvassa näkyvät eri alkuaineiden jakautuminen saman sivun alemmassa kuvassa 600-kertaisesti suurennettuna näkyvällä alueella Impoweld-W 100 -panssarilevyssä (kuva 35 ja kuva 36). Abrasiivisen kulumisen kannalta tärkeimmät eli kromikarbidit erottuvat molemmista kuvista varsin selkeästi. Kuvien oikeassa ylä- ja alareunassa on todella isoja kromikarbideja.

TAULUKKO 4 Impoweld-W 100 -panssarilevyn alkuaineanalyysivertailu (Viitala, 2016)

IMPOWELD-W 100		
Alkuaine	Valmistaja	EDS
Si	ei	0,3
Mn	ei	2,4
Cr	30,0	37,3
Fe	60,0	57,4



KUVA 35 Impoweld-W 100 -panssarilevyn tärkeimpien alkuaineiden sijoittuminen tutkitulla kovahittausalueella (Leskinen, 2016)



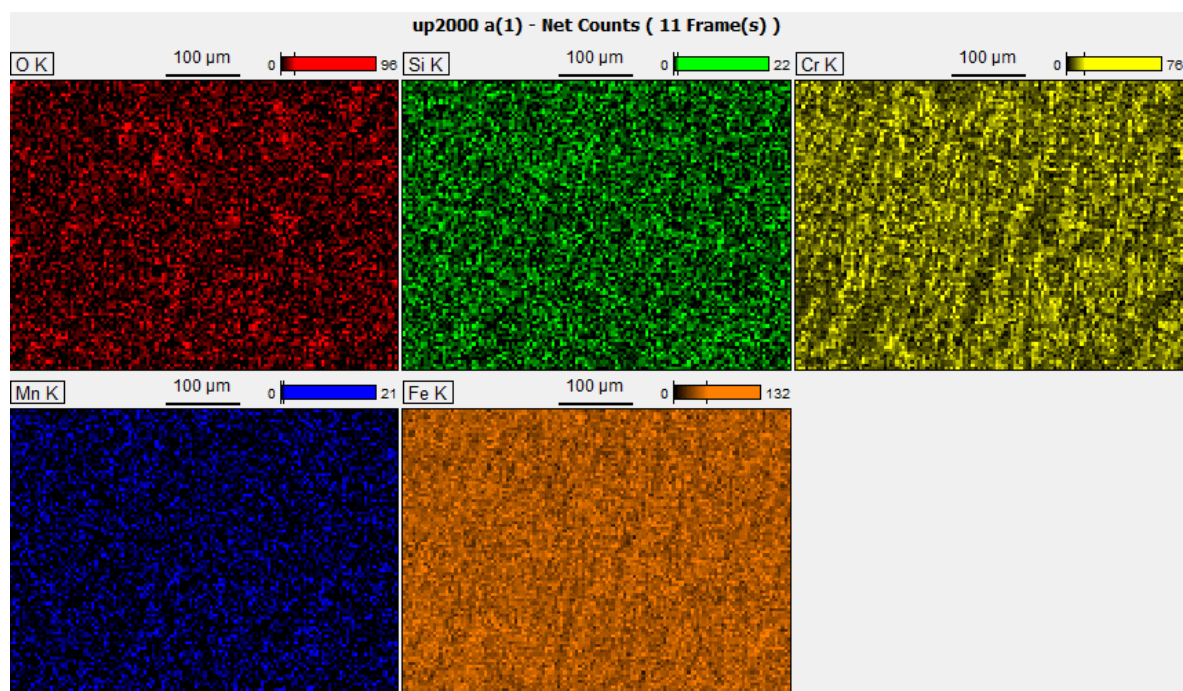
KUVA 36 Impoweld-W 100 -panssarilevyn pyyhkäisyelektronimikroskooppikuva (Leskinen, 2016)

Maahantuojaan tietojen mukaan Ultraplate 2000 -panssarilevyn kovahitsi sisältää hiilen ja raudan lisäksi niobium- ja kromikarbideja (SKM Service Oy, 2015). Niobiumia ei kuitenkaan kovahitsistä havaittu tältä tutkitulta alueelta, mutta siinä havaittiin piitä 1,2 %, mangaania 1,8 %, kromia 15,9 % ja rautaa 76,9 %. Taulukosta alla nähdään SKM Service Oy:n ilmoittamat ja EDS-analyysissä mitatut alkuaineiden pitoisuudet koekappaleessa (taulukko 5).

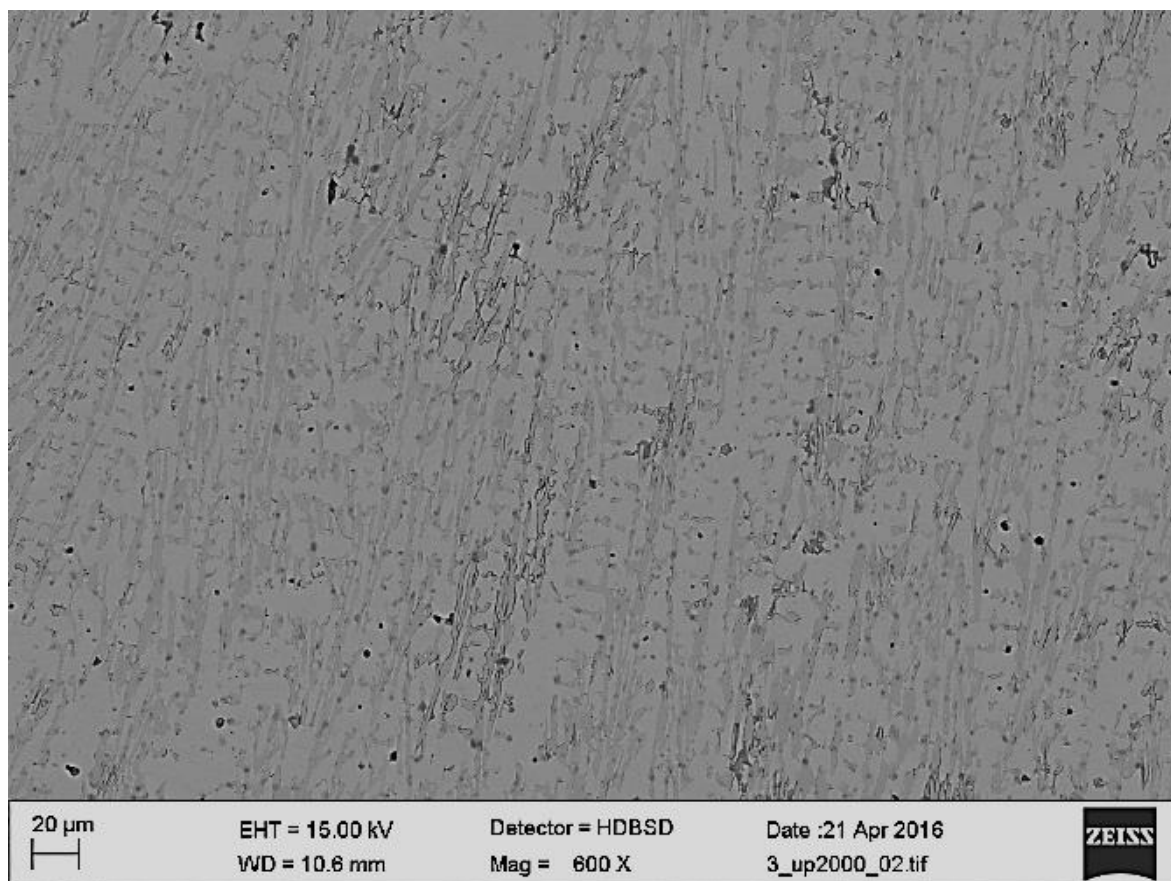
Kuvassa alla näkyvät Ultraplate 2000 -panssarilevyn kovahitsissä esiintyvien tärkeimpien alkuaineiden jakautuminen tutkitulle alueelle (kuva 37). Seuraavan sivun kuvassa nähdään saman tutkitun alueen mikrorakenne tarkemmin (kuva 38).

TAULUKKO 5 Ultraplate 2000 -panssarilevyn alkuaineanalyysivertailu (Viitala, 2016)

ULTRAPLATE 2000		
Alkuaine	Valmistaja	EDS
Si	ei	1,2
Mn	ei	1,8
Cr	20-40	15,9
Nb	on	0,0
Fe	on	76,9



KUVA 37 Ultraplate 2000 -panssarilevyn tärkeimpien alkuaineiden sijoittuminen tutkitulla kovahitsin alueella (Leskinen, 2016)



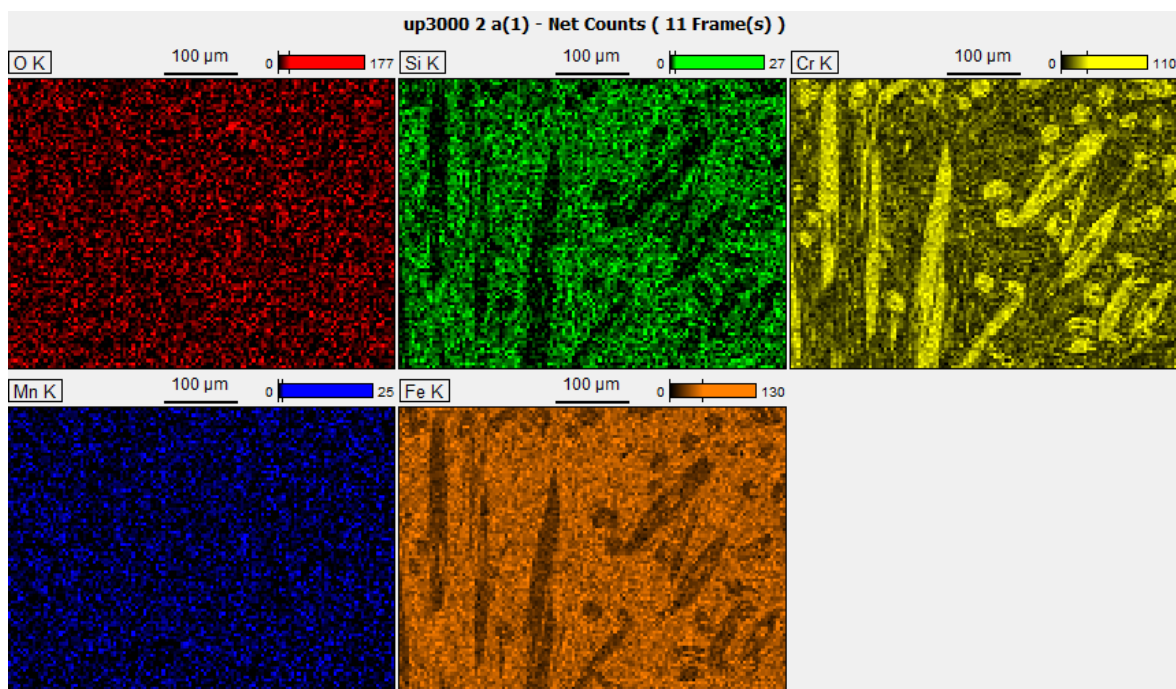
KUVA 38 Ultralate 2000 -panssarilevyn pyyhkäisyelektronimikroskooppikuva (Leskinen, 2016)

Maahantuojaan tietojen mukaan Ultralate 3000 -panssarilevyjen kovahitsit sisältävät hiilen ja raudan lisäksi kromi- ja boorikarbideja sekä mangaania (SKM Service Oy, 2015). Kummankaan tutkittavana olleen Ultralate 3000 -panssarilevyn kovahitsistä ei tutkittavalta alueelta kuitenkaan booria löytynyt. Kuten taulukosta alla huomataan, kovahitsin alkuaineiden jakautuminen eroaa hieman alkuainepitoisuuksiltaan eri paksuisten Ultralate 3000 -panssarilevyjen välillä (taulukko 6). Ohuemman (6/4) levyn kovahitsissä havaittiin tässä tutkimuksessa piitä 1,7 %, mangaania 2,6 %, kromia 26,9 % ja rautaa 67,9 %. Paksumman (8/5) levyn kovahitsissä piitä oli 1,3 %, mangaania 2,3 %, kromia 18,1 % ja rautaa 74,1 %. Syytä kromipitoisuuksien suurelle erolle ei löytynyt tässä tutkimuksessa.

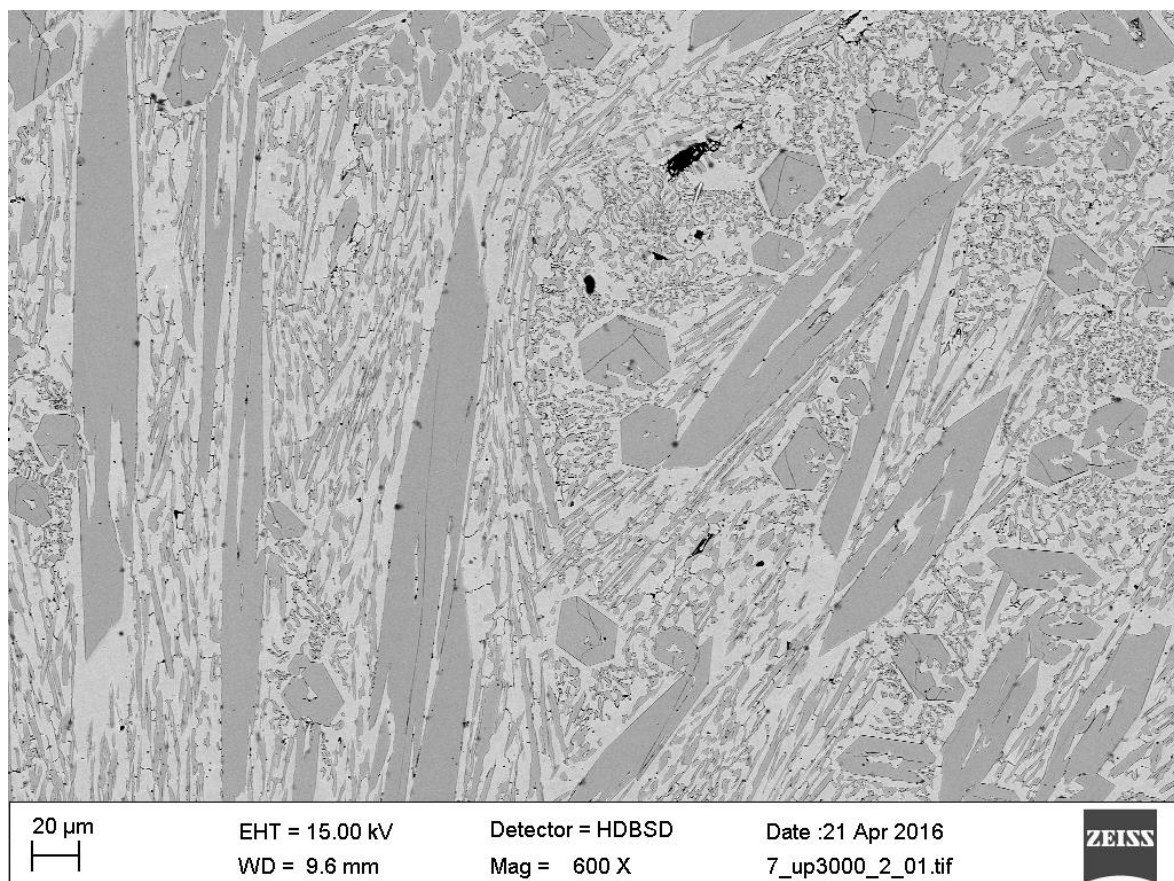
TAULUKKO 6 Ultralate 3000 -panssarilevyn alkuaineanalyysivertailut (Viitala, 2016)

ULTRAPLATE 3000 (8/5)			ULTRAPLATE 3000 (6/4)		
Alkuaine	Valmistaja	EDS	Alkuaine	Valmistaja	EDS
Si	ei	1,3	Si	ei	1,7
Mn	on	2,3	Mn	on	2,6
Cr	22-26	18,1	Cr	22-26	26,9
B	on	0,0	B	on	0,0
Fe	on	74,1	Fe	on	67,9

Kuvassa alla näkyvät Ultraplate 3000 (6/4) -panssarilevyn tärkeimmät alkuaineet tutkitulla alueella (kuva 39). Toisessa sivun kuvassa nähdään hitsin mikrorakenne selkeämmin ja siitä voi hyvin erottaa kromikarbidien jakautumisen (kuva 40).

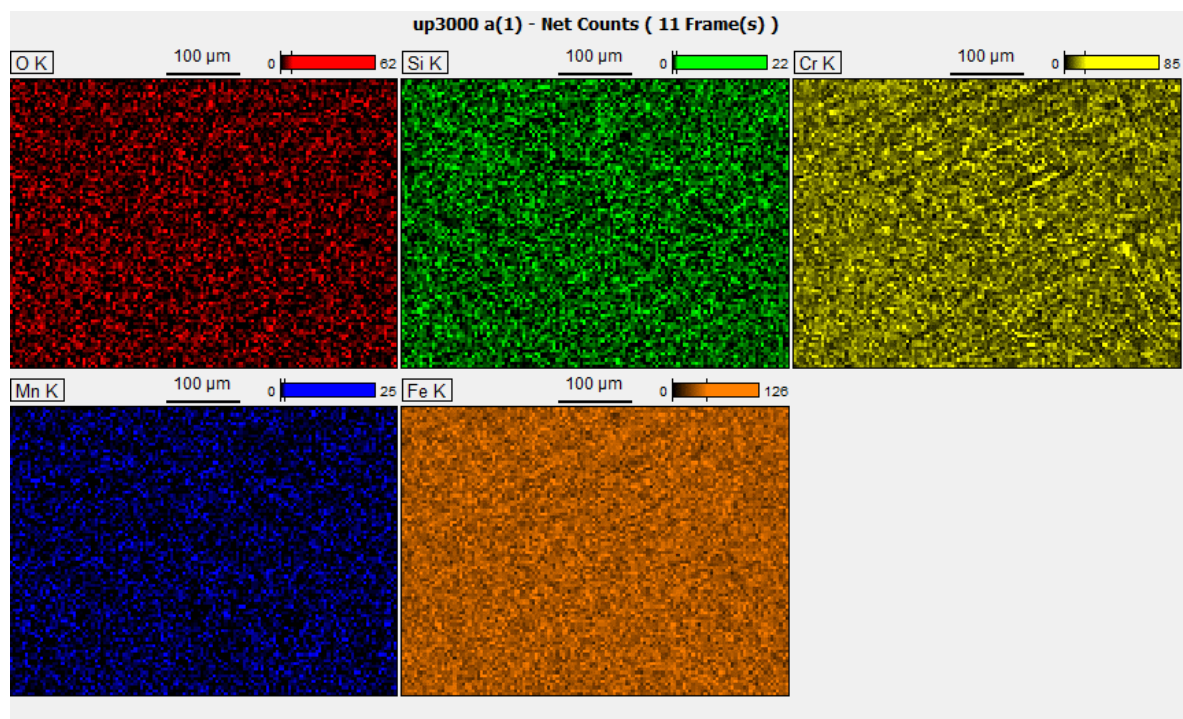


KUVA 39 Ultraplate 3000 (6/4) -panssarilevyn tärkeimpien alkuaineiden sijoittuminen tutkitulla kova-hitsin alueella (Leskinen, 2016)

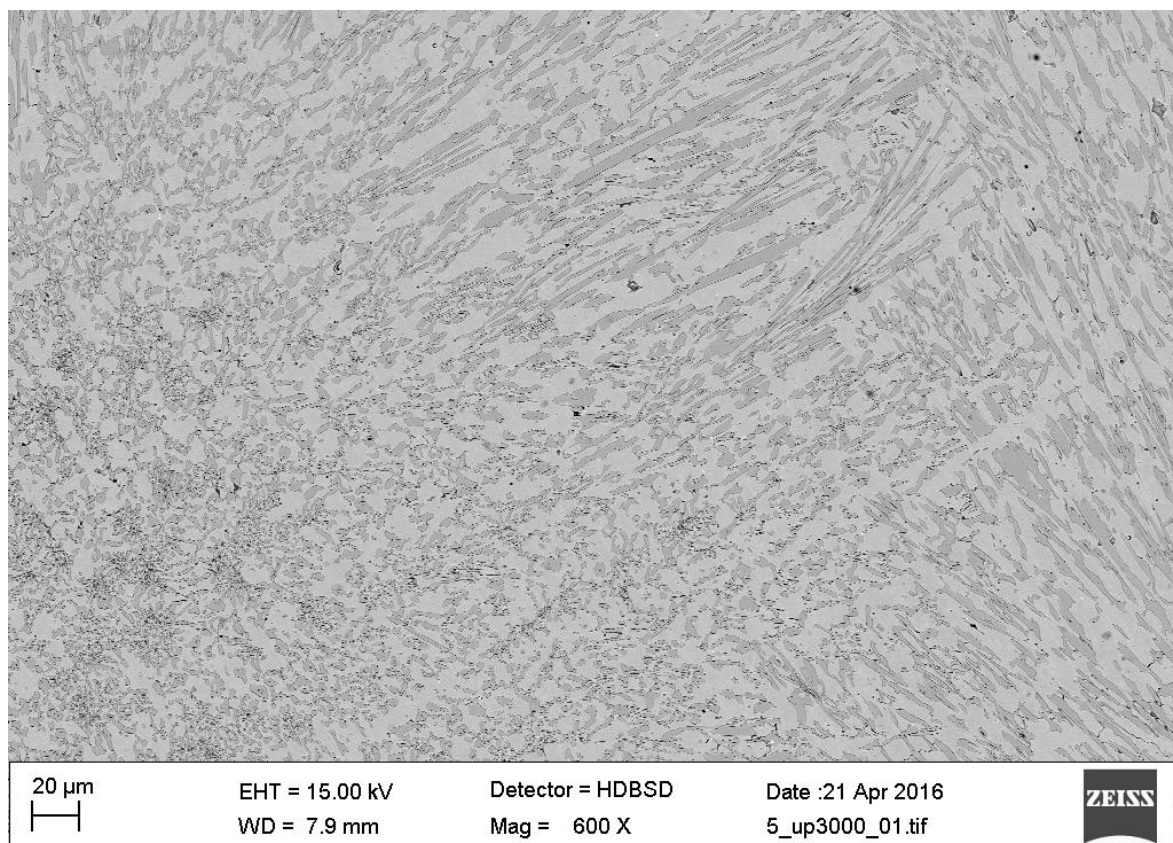


KUVA 40 Ultraplate 3000 (6/4) -panssarilevyn pyyhkäiselektronimikroskooppikuva (Leskinen, 2016)

Tämän sivun ylemmässä kuvassa nähdään paksumman Ultraplate 3000 (8/5) -panssarilevyn tärkeimpien alkuaineiden jakautuminen tutkitulle alueelle (kuva 41). Alemmassa kuvassa nähdään saman levyn mikrorakenne 600-kertaisesti suurennettuna pyyhkäisyelektronimikroskooppikuvana (kuva 42).



KUVA 41 Ultraplate 3000 (8/5) -panssarilevyn tärkeimpien alkuaineiden sijoittuminen tutkitulla kova-hitsin alueella (Leskinen, 2016)



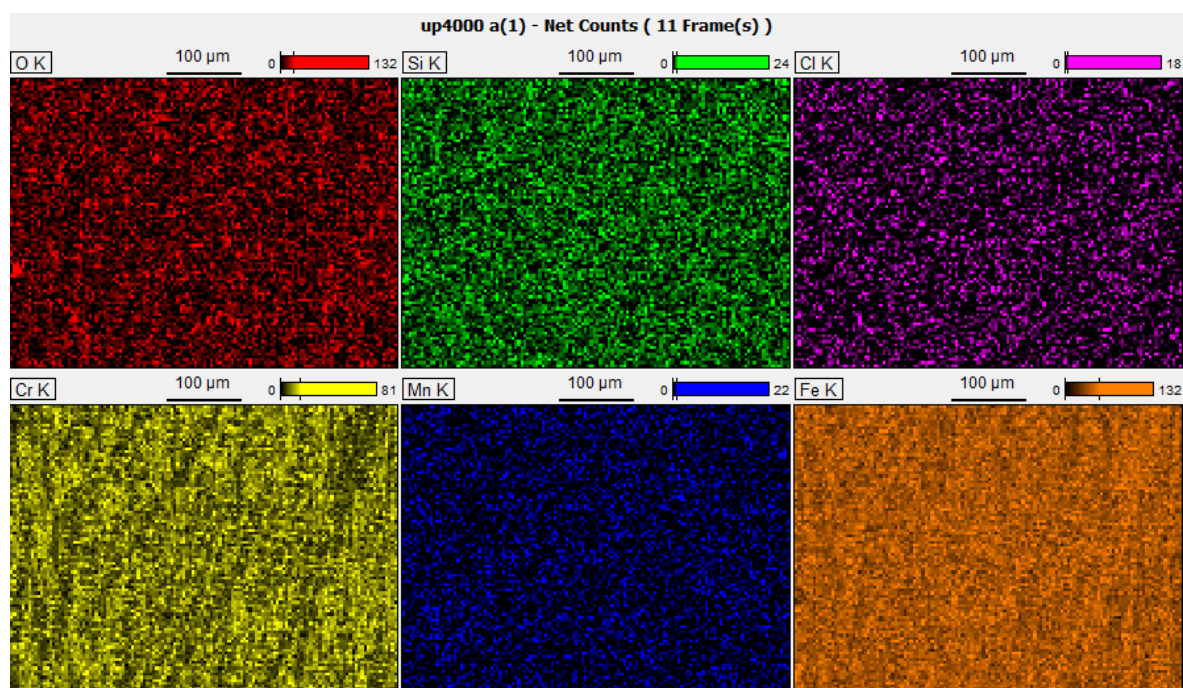
KUVA 42 Ultraplate 3000 (8/5) -panssarilevyn pyyhkäisyelektronimikroskooppikuva (Leskinen, 2016)

Maahantuojaan tietojen mukaan Ultraplate 4000 -panssarilevyn kovahitsi sisältää raudan ja hiilen lisäksi kromi- ja niobiumkarbideja sekä molybdeenia ja booria (SKM Service Oy, 2015). Ensimmäisessä mittauksessa ei löytynyt niobiumia, booria, eikä molybdeeniä, joten näyte otettiin myös toisesta kohdasta, mutta se ei muuttanut tulosta. Näytteet sisälsivät myös erikoisia aineita kuten klooria ja bariumia, tosin pitoisuudet olivat pieniä. Tämän tutkimuksen puitteissa kaikkien noiden kerrotujen eroavuuksien syitä ei pystytty selvittämään. Ensimmäinen näyte sisälsi mangaania 1,9 %, kromia 18,2 % rautaa 73,9 % sekä klooria 0,1 %. Toinen näytekohta sisälsi piitä 0,8 %, mangaania 1,5 %, kromia 15,7 %, rautaa 77,1 % sekä bariumia 0,1 %. Arvot näkyvät alla olevassa taulukossa (taulukko 7). Kaikista tutkituista tuotteista tämän levyn näyte 2 sisälsi kaikkein vähiten kromia.

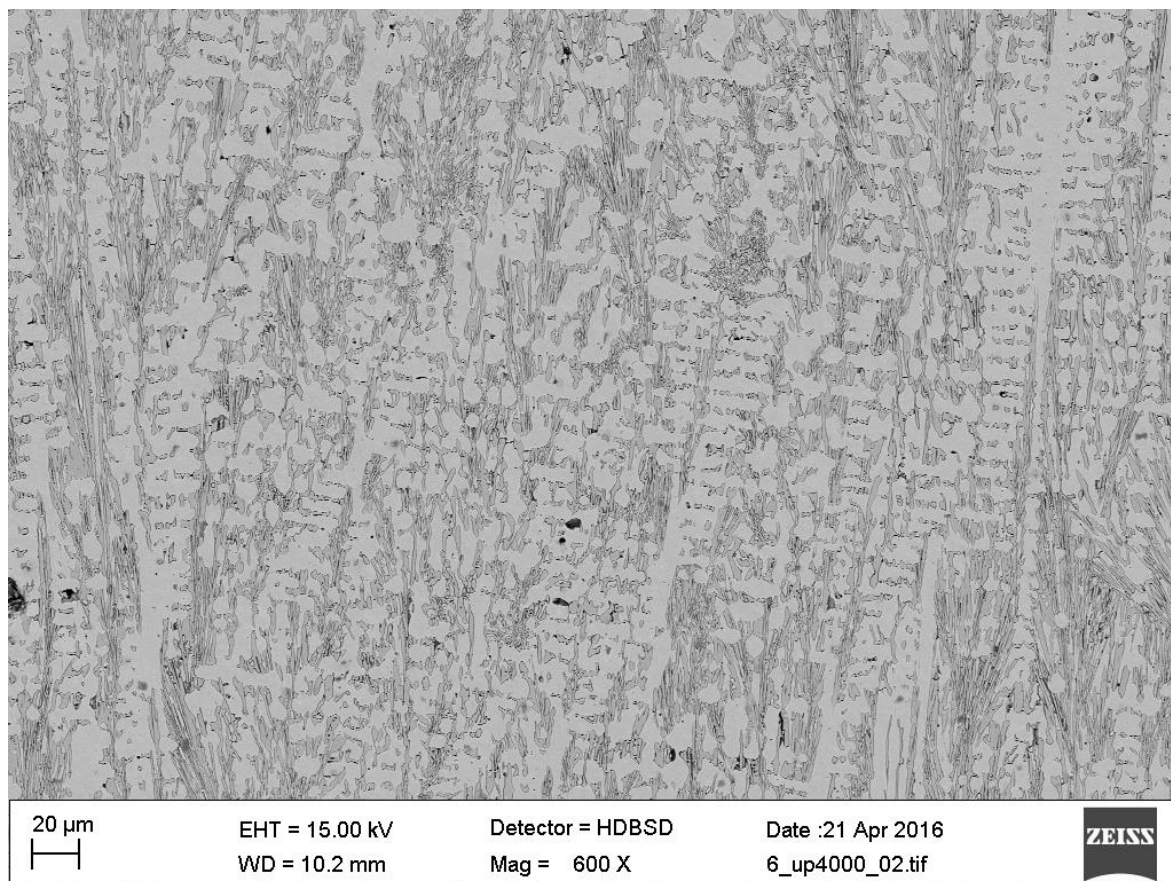
Kuvassa alla nähdään kuuden hallitsevimman alkuaineen jakautuminen tutkitulle alueelle ensimmäisen näytteen osalta (kuva 43). Seuraavan sivun ylimmässä kuvassa on ensimmäisen näytteen tutkimusalueen mikrorakenne nähtävissä selvemmin (kuva 44). Seuraavat kuvat näyttävät samat tiedot toisesta näytteestä (kuva 45 ja kuva 46).

TAULUKKO 7 Ultraplate 4000 -panssarilevyn alkuaineanalyysivertailut (Viitala, 2016)

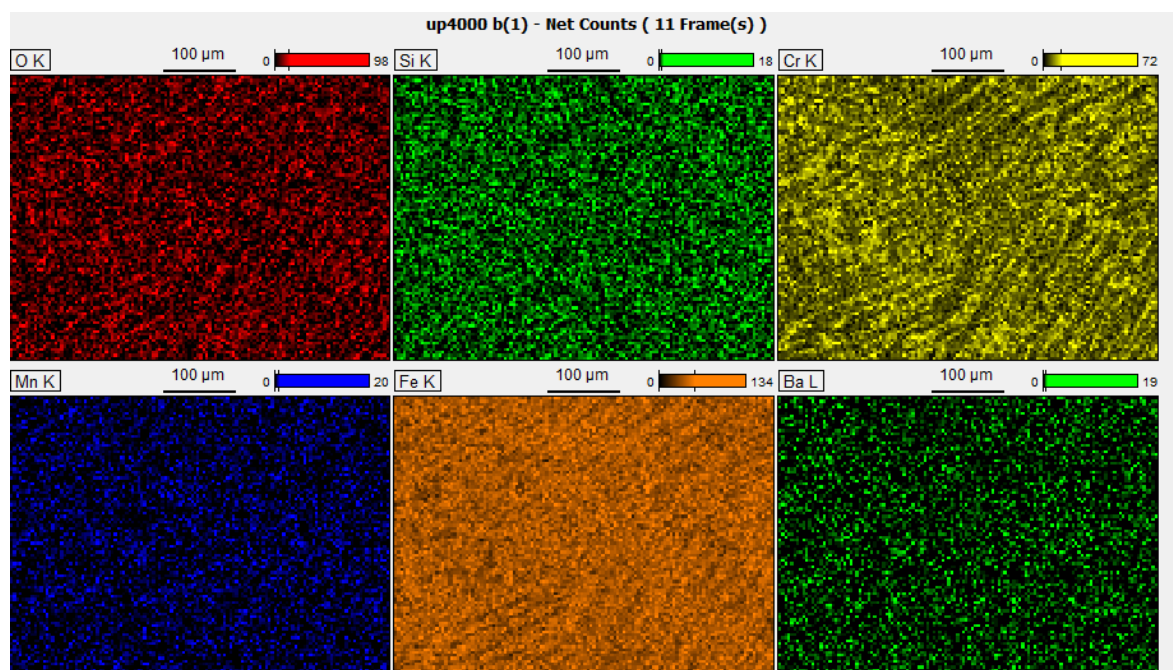
ULTRAPLATE 4000			ULTRAPLATE 4000 (näyte 2)		
Alkuaine	Valmistaja	EDS	Alkuaine	Valmistaja	EDS
			Si	ei	0,8
Mn	ei	1,9	Mn	ei	1,5
Cr	22-26	18,2	Cr	22-26	15,7
Nb	on	0,0	Nb	on	0,0
B	on	0,0	B	on	0,0
Fe	on	73,9	Fe	on	77,1
Mo	on	0,0	Mo	on	0,0
Cl	ei	0,1	Ba	ei	0,1



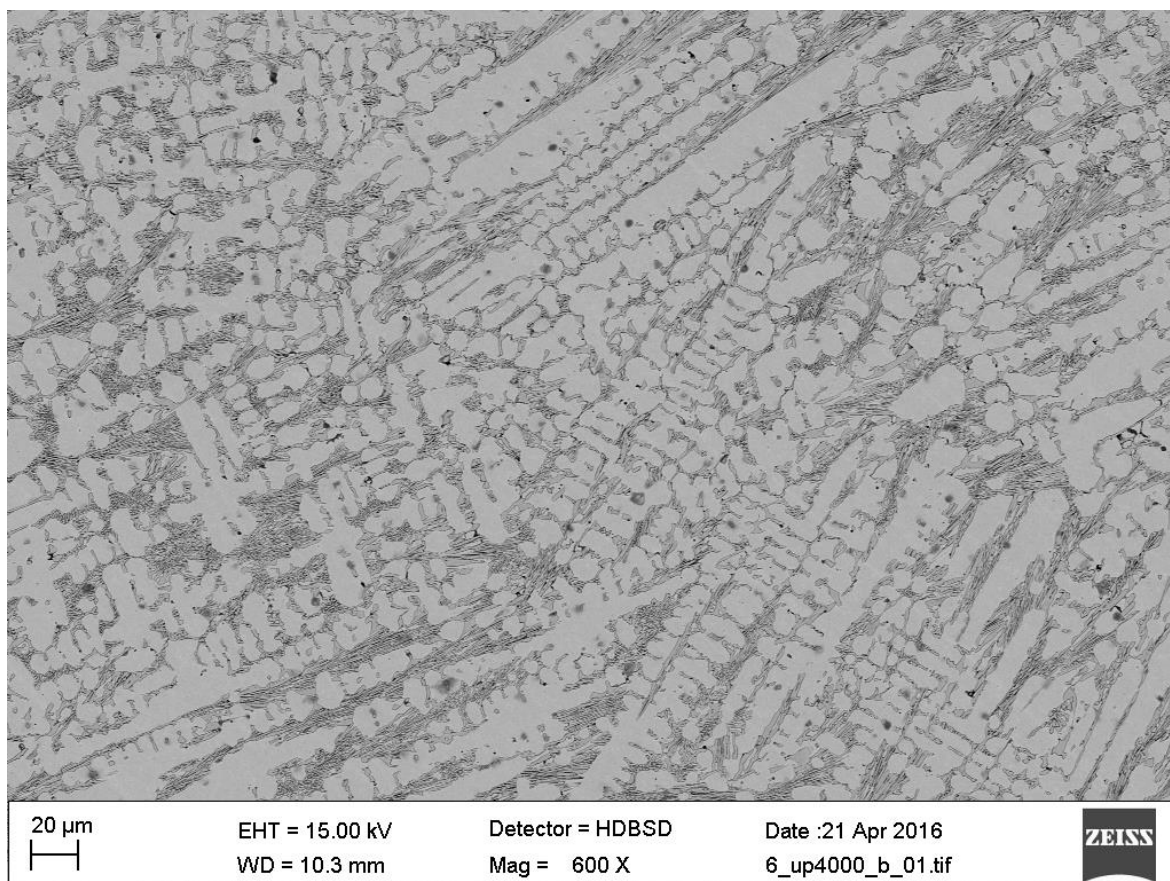
KUVA 43 Ultraplate 4000 -panssarilevyn tärkeimpien alkuaineiden sijoittuminen tutkitulla kovahitsin alueella, näyte 1 (Leskinen, 2016)



KUVA 44 Ultraplate 4000 -panssarilevyn pyyhkäisy-elektronimikroskooppikuva, näyte 1 (Leskinen, 2016)



KUVA 45 Ultraplate 4000 -panssarilevyn tärkeimpien alkuaineiden sijoittuminen tutkitulla kovahitsin alueella, näyte 2 (Leskinen, 2016)



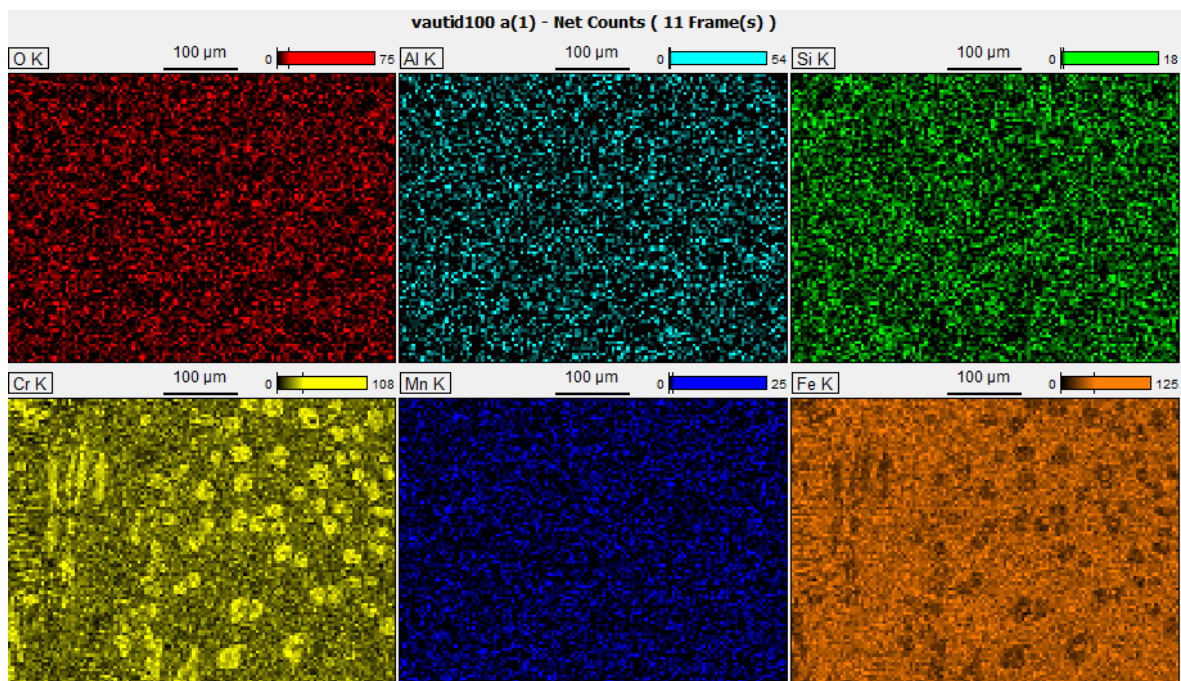
KUVA 46 Ultraplate 4000 -panssarilevyn pyyhkäisyelektronimikroskooppikuva, näyte 2 (Leskinen, 2016)

Maahantuojaan tietojen mukaan Vautid 100 -panssarilevyn kovahitsi sisältää hiilen ja raudan lisäksi kromikarbideja ja mangaania (Impomet Oy, 2016a). Kaikkia ilmoitettuja aineita löytyikin: kromia 26,3 %, mangaania 2,8 % ja rautaa 69 %. Näiden lisäksi koekappaleen kovahitsi sisälsi myös piitä 0,8 % ja alumiinia 0,1 %. Erot maahantuojan ilmoittamien ja tutkimuksessa mitattujen alkuainepitoisuuksien välillä selviävät alla olevasta taulukosta (taulukko 8).

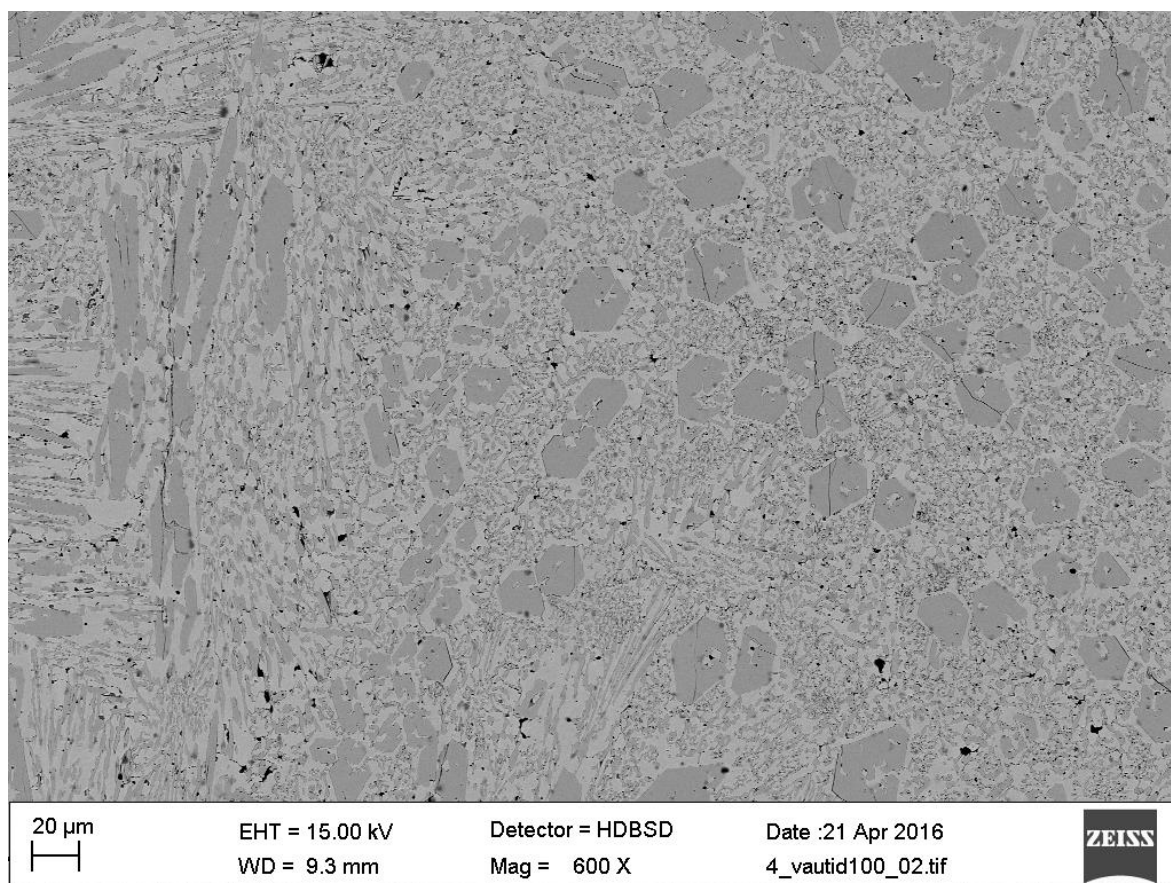
Seuraavan sivun kuvista ylemmässä nähdään kuuden hallitsevimman alkuaineen jakautumisen tutkimusalueella (kuva 47). Alemmassa kuvassa on selvästi nähtävissä kromikarbidien jakautuminen tutkimusalueelle (kuva 48).

TAULUKKO 8 Vautid 100 -panssarilevyn alkuaineanalyysivertailu (Viitala, 2016)

VAUTID 100		
Alkuaine	Valmistaja	EDS
Si	ei	0,8
Mn	1,0	2,8
Cr	28,0	26,3
Fe	on	69,0
Al	ei	0,1



KUVA 47 Vautid 100 -panssarilevyn tärkeimpien alkuaineiden sijoittuminen tutkitulla kovahitsin alueella (Leskinen, 2016)



KUVA 48 Vautid 100 -panssarilevyn pyyhkäisyelektronimikroskooppikuva (Leskinen, 2016)

6.4 Mikroskooppitutkimukset

Mikrohietutkimus tehtiin kuvassa alla näkyvällä tietokoneeseen liitetyllä kameralla varustetulla valo-optisella mikroskoopilla, millä tutkittiin hitsin mikrorakennetta ja karbidien jakautumista pinnoitteessa (kuva 49). Ennen tutkimuksia hieet syövytettiin ruostumattomalle teräkselle syövytteeksi tarkoitettulla Kalling's 20° nro 2 -liuoksella, mikä sisältää 5 g kuparikloridia, 100 ml suolahappoa ja 100 ml etanolia. Mikroskoopin kameralla otettiin myös kuvia kovahitsin pinnasta, keskiosasta sekä hitsin ja perusaineen rajavyöhykkeeltä eli ns. muutosvyöhykkeeltä.

Yli 4 % hiiltä ja yli 20 % kromia sisältävät kovahitsit ovat mikrorakenteeltaan ylieutektoidisia. Tällaiset mikrorakenteet suosivat heksagonalisia kiderakenteita. Vähemmän hiiltä ja/tai kromia sisältävät mikrorakenteet ovat taas alieutektoidisia. Suurimmassa osassa kuvista on nähtävissä selvästi kromi-karbidien jakautuminen ja kokoluokka isoina keltaisina heksagonalisina muotoina. Kromi, kuten muutkin karbidit, pyrkivät kiteytymään jäähtymissuuntansa mukaisesti, joten kuvista voi päätellä hitsin jäähtymisen suunnan ja myös jäähtymisnopeuden, koska se vaikuttaa myös karbidien kiteytymiseen olennaisesti. (ASM International, 1993)

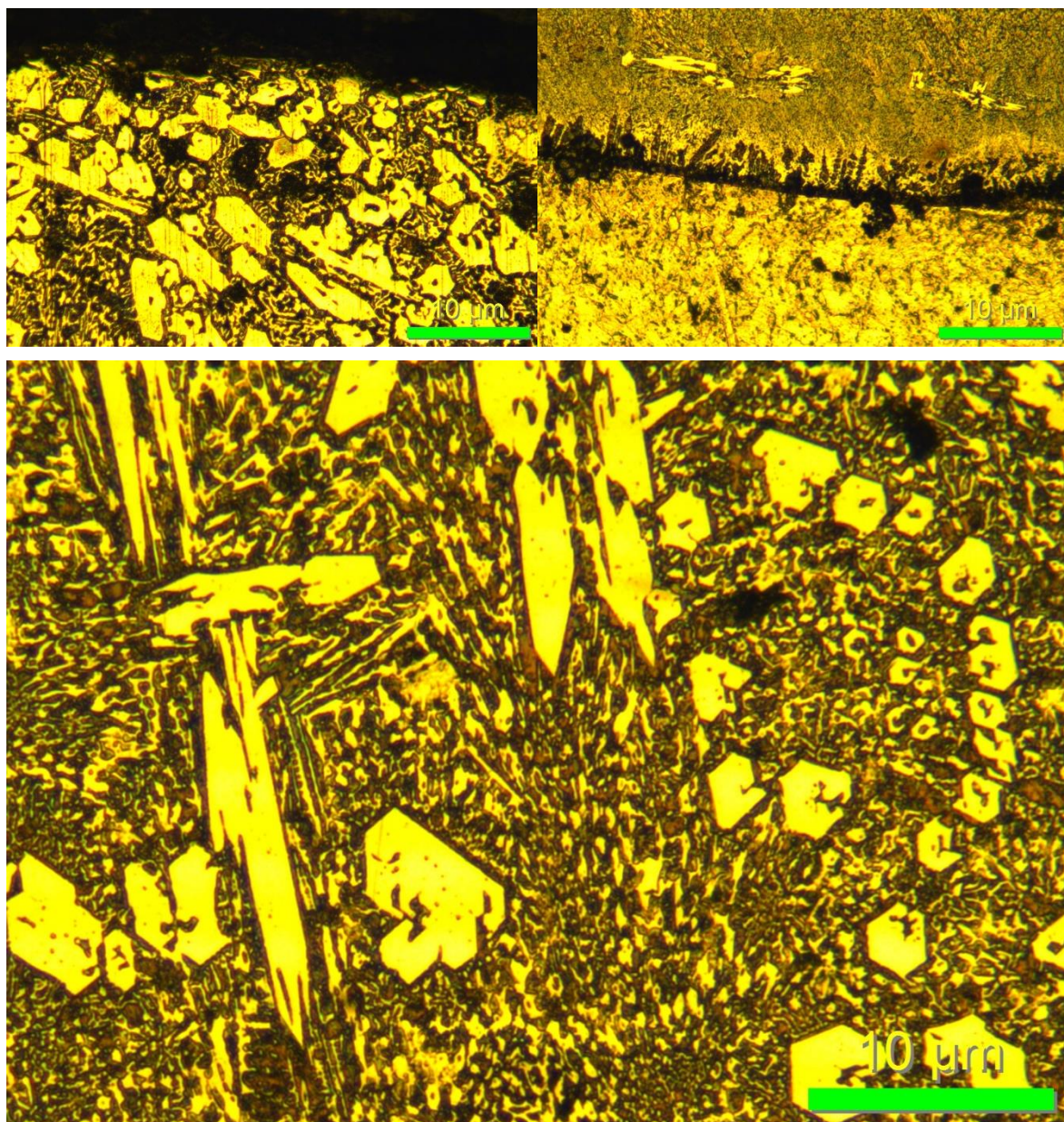
Myös hitsaustapa vaikuttaa syntyvän kovahitsin mikrorakenteeseen. Tämä johtuu siitä, että esimerkiksi jauhekaarihitsauksessa hitsillä on taipumus kiinteytyä hitaammin, kuin perinteisillä kaarihitsausmenetelmillä hitsattuna. Kuvista voi siis päätellä myös mitä hitsaustapaa missäkin tässä tutkimuksessa mukana olleessa tuotteessa on käytetty. (ASM International, 1993)



KUVA 49 Tietokoneeseen liitetty kameralla varustettu mikroskooppi (Viitala, 2016)

Coroplate 143 -panssarilevyn ylieutektoidinen eutektisiä M_7C_3 - ja primäärikarbideita sisältävä mikrorakenne on hyvin tyypillinen täytelangalla kovahitsatuille paljon kromia ja hiiltä sisältäville tuotteille (ASM International, 1993). Karbidien rakenne, koko ja suuntautuneisuus erottuvat hyvin. Kuvassa alla nähdään tämän koekappaleen kovahitsin mikrorakenne (kuva 50). Keltaiset heksagonaliset kuviot kuvassa ovat kromikarbideja.

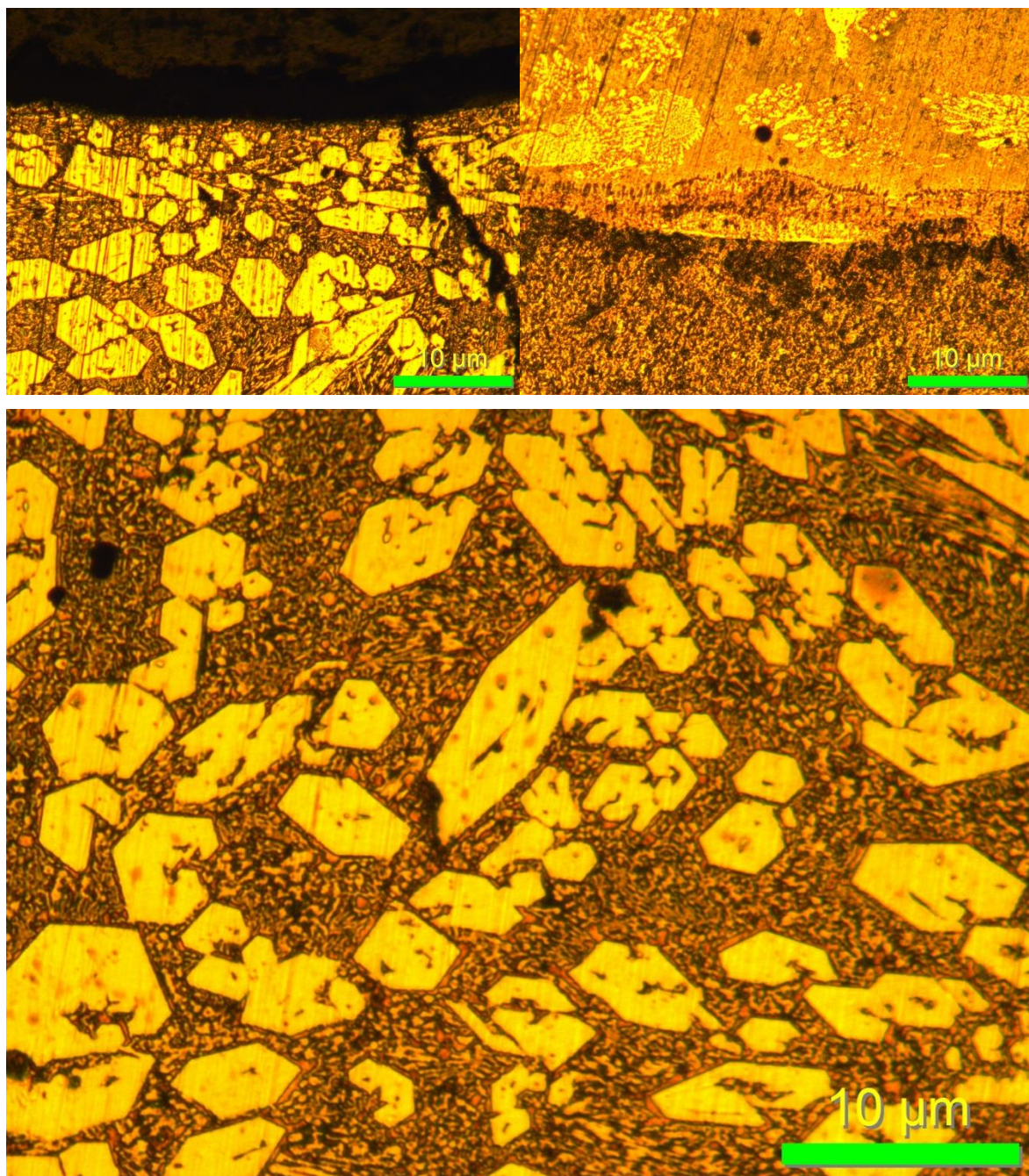
Tuotteen mikrorakennetta tarkemmin tarkastellessa kävi selväksi, että kromikarbidit ovat jakautuneet tasaisesti koko kovahitsin alueelle ja niiden koko vaihteli runsaasti. Ainoastaan muutosvyöhykkeellä lähellä perusmateriaalin rajaa oli vähemmän kromikarbideja. Kovahitsin sisällä kromikarbidit olivat suuntautuneet lähes joka suuntaan, mikä kertoo tasaisesta hitsin jäähtymisestä. Tämä tekee hitsistä kovan ja hyvin kulutusta kestävänsuunnasta riippumatta. Pinnassa kromikarbidit olivat suuntautuneet selkeästi pinnan suuntaisesti.



KUVA 50 Coroplate 143 -panssarilevyn mikrorakenne (Viitala, 2016)

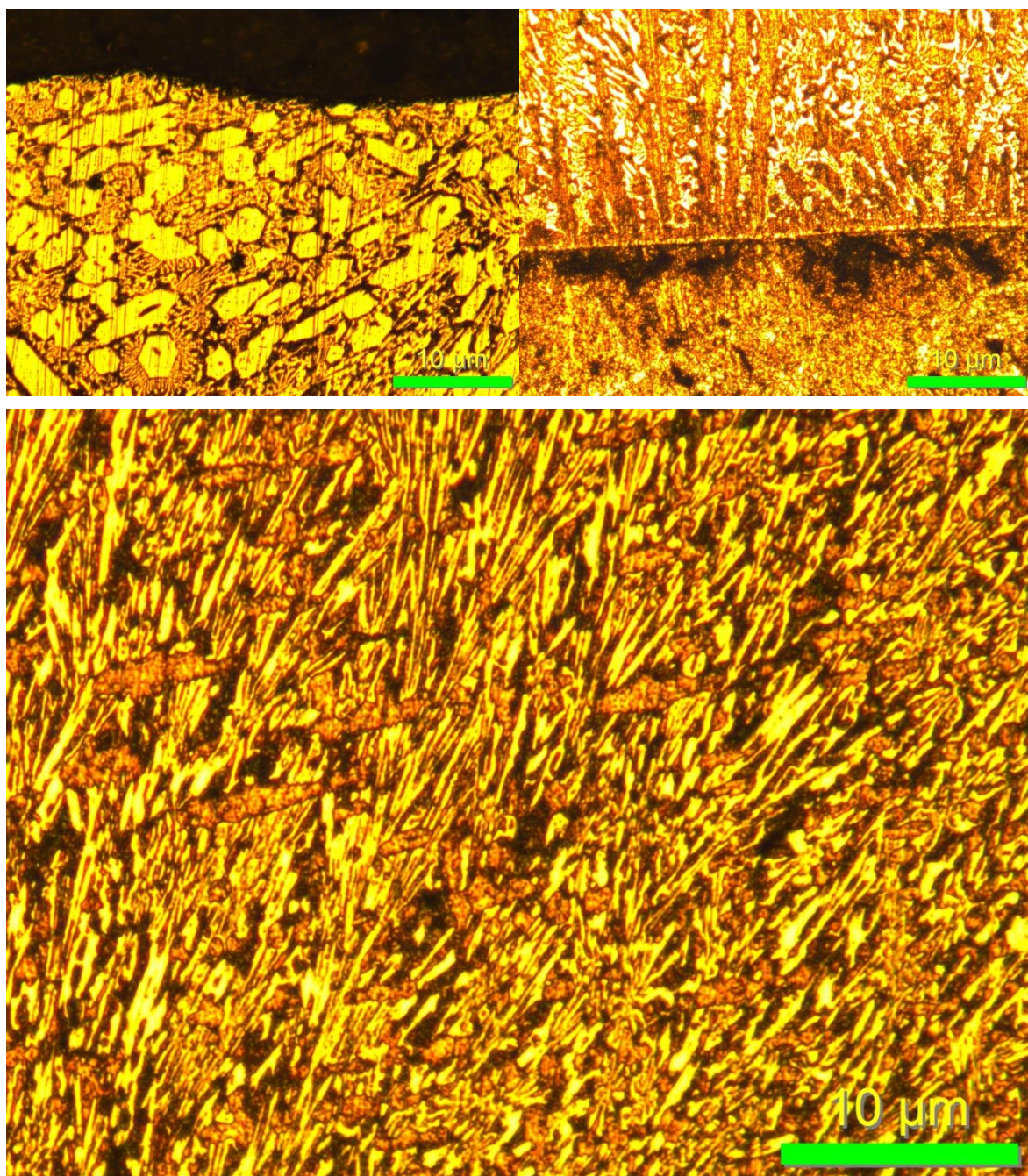
Impoweld-W 100 -panssarilevyn mikrorakenne oli myös hyvin tyypillinen paljon kromia ja hiiltä sisältävälle kovahitsille. Kuvassa alla nähdään tuotteen koekappaleen mikrorakenne, jossa kromikarbidit ovat selvästi näkyvissä (kuva 51).

Kovahitsiä tarkemmin tutkittaessa huomattiin pääosan kromikarbideista suuntautuneen hitsin suuntaisesti. Tämä kertoo siitä, että hitsi on jäähtynyt hieman epähomogeenisesti ja silloin kovahitsin kovuus on kulutuksen suunnasta riippuvainen (Meskanen & Toivonen, 2009). Karbidit olivat kuitenkin melko isokokoisia koko kovahitsin alueella ja niitä oli paljon.



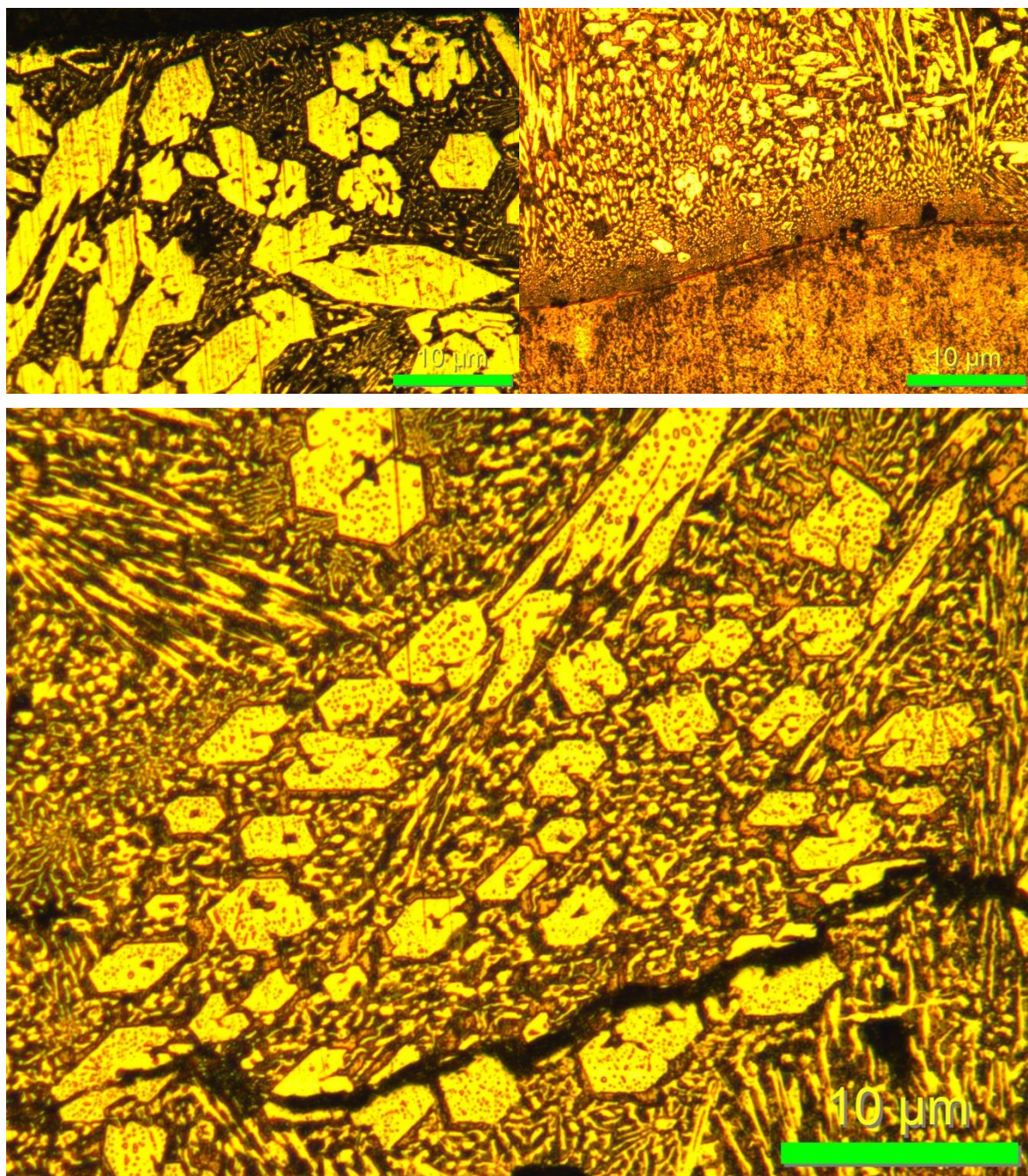
KUVA 51 Impoweld-W 100 -panssarilevyn mikrorakenne (Viitala, 2016)

Ultraplate 2000 -panssarilevyn koekappaleen mikrorakenne oli varsin kaksijakoinen, kuten kuvastakin alla nähdään (kuva 52). Mikrorakenne on kuitenkin hyvin tyypillinen puikkohitsausmenetelmällä hitsatulle kovahitsille, joka sisältää alle 17 % kromia. Pinnassa on selkeästi kuvassakin erotettavissa kromikarbideit ja niiden suuntautuneisuus hitsin suuntaisesti. Keskenmällä hitsiä primäärikarbideja ei ollut näkyvässä vaan kromi oli jakautunut matriisiin pienempinä annoksina. Tämän tyyppisen mikrorakenteen omaava kovahitsi on hyvin iskunkestävää muokkauslujittumiskykynsä ansiosta (Kubes Alloy Products Inc., 2014).



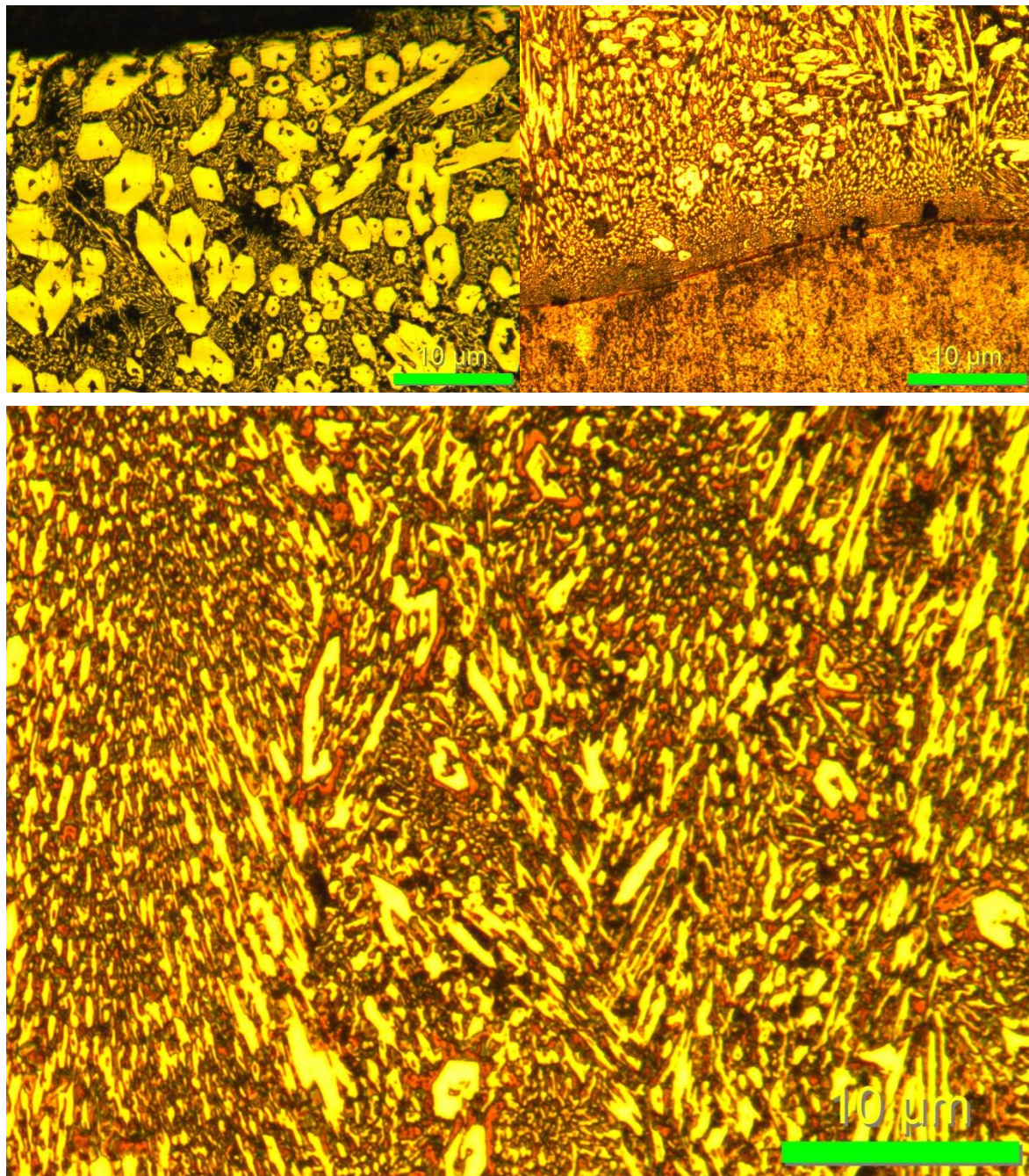
KUVA 52 Ultraplate 2000 -panssarilevyn mikrorakenne (Viitala, 2016)

Kuvista alla ja seuraavalla sivulla nähdään, että Ultraplate 3000 (6/4) -panssarilevy on mikrorakenteeltaan varsin mielenkiintoinen Ultraplate 3000 (8/5) -panssarilevyyn verrattuna (kuva 53 ja kuva 54). Sen primäärikarbidit näyttivät ulottuvan koko sen kovahitsin alueelle ja jopa hyvin lähelle perusmateriaalia. Sen selittää ohuemman panssarilevyn suurempi kromipitoisuus verrattuna paksumpaan panssarilevyyn. Mikrorakenteen ja kromipitoisuuksien eroavaisuudet selittävät myös muiden tutkimustulosten eroavaisuuden näiden kahden saman, mutta eripaksuisen tuotteen välillä.



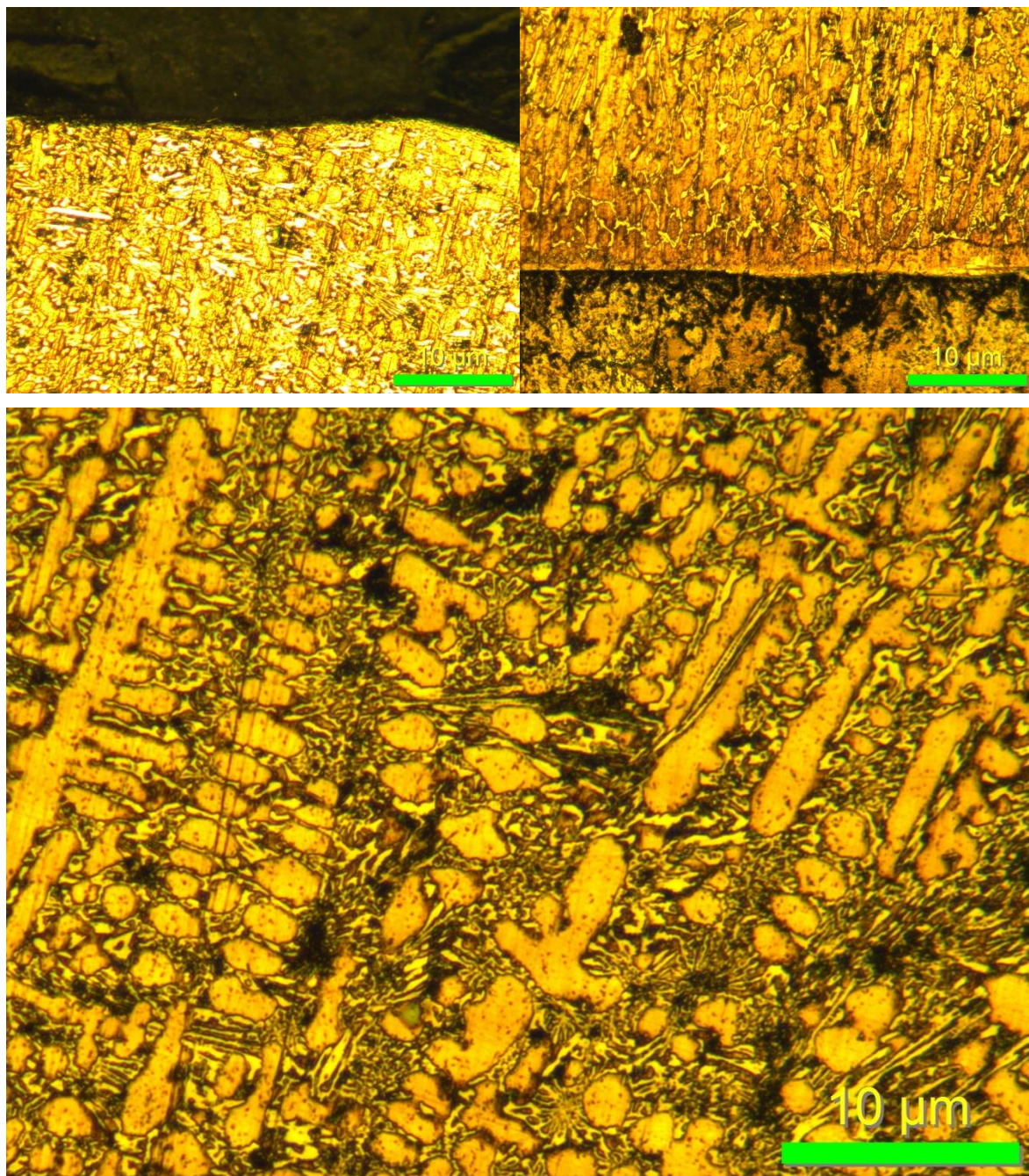
KUVA 53 Ultraplate 3000 (6/4) -panssarilevyn mikrorakenne (Viitala, 2016)

Ultraplate 3000 (8/5) -panssarilevyn mikrorakenne oli hyvin erikoinen. Tuotteen pinnassa oli selvästi nähtävissä primääriset kromikarbidiitit, mutta hitsin keskiosassa kromikarbidiitit olivat matriisissa pienempiä ja ihan perusaineen rajalla oli myös nähtävissä pieniä kromikarbideja. Kuten kuvasta alla nähdään, kromi oli kuitenkin jakautunut varsin tasaisesti koko kovahitsin alueelle (kuva 54).



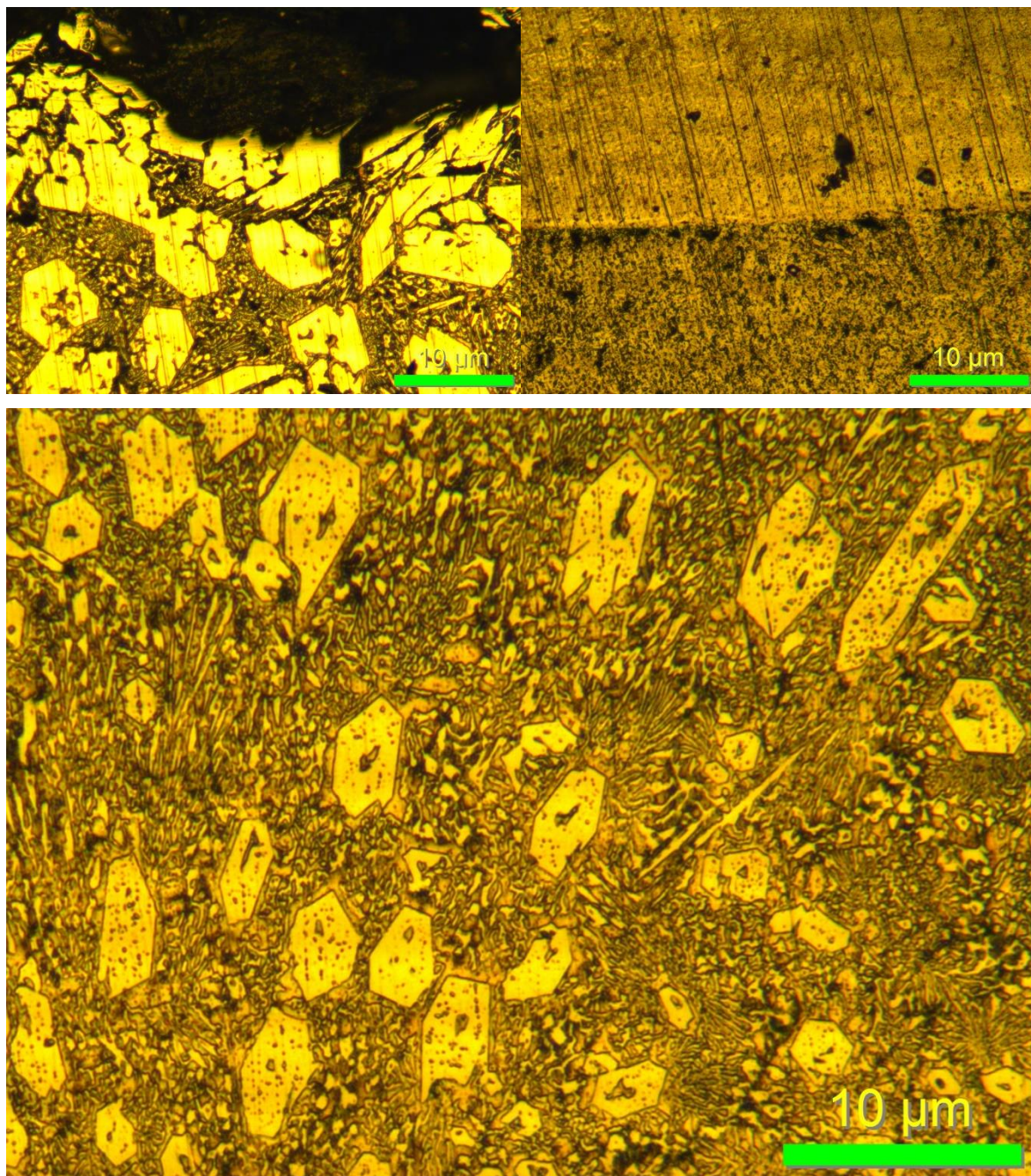
KUVA 54 Ultraplate 3000 (8/5) -panssarilevyn mikrorakenne (Viitala, 2016)

Ultraplate 4000 -panssarilevyn mikrorakenteen selittää tuotteen erittäin alhainen kromipitoisuus. Tuotteen mikrorakenteessa ei ollu edes pinnassa näkyvissä primäärikarbideja vaan kromi oli pienempinä annoksina matriisissa. Kuvassa alla nähdään tämän tuotteen kalanruotomainen mikrorakenne, joka kertoo hyvästä iskukestävyydestä (kuva 55). Tällaisen mikrorakenteen sisältävä panssarilevy ei kestä niin hyvin kulutusta kuin muut tutkitut panssarilevyt.



KUVA 55 Ultraplate 4000 -panssarilevyn mikrorakenne (Viitala, 2016)

Vautid 100 -panssarilevyn mikrorakenne oli varsin tyypillinen noin 26 % kromia sisältävälle kovahitsille. Karbidit ovat jakautuneet varsin tasaisesti ja mutta ne olivat varsinkin tuotteen pinnassa erittäin suuria. Kuvasta alla nähdään, että karbidit ovat lisäksi suuntautuneet pitkälti hitsin mukaisesti, joten tuotteen kuluminen on tällöin kuluminen suunnasta riippuvainen (kuva 56). Lähellä perusmateriaalia muutosvyöhykkeellä karbideja ei ollut ollenkaan.



KUVA 56 Vautid 100 -panssarilevyn mikrorakenne (Viitala, 2016)

6.5 Kumipyöräabraasiokoe

Kumipyöräabraasiokoe ja siihen käytettävä laitteisto on kuvailtu standardissa ASTM G65. Tässä tutkimuksessa käytetty, seuraavalla sivulla kuvassa näkyvä laite on rakennettu Savonia-ammattikorkeakoululla kyseistä standardia mukaillen ja laitteella tehty tutkimus sovelsi aiemmin mainitussa standardissa kuvailtua kulutuskoetta (kuva 57). Tutkimus kuitenkin siis erosi hieman standardisoidusta tutkimuksesta. Tässä tapauksessa kysymyksessä on kuitenkin vertaileva tutkimus, jossa tutkimustulokset ovat verrattavissa vain keskenään, joten niitä ei siis tule verrata suoraan jonkun muun tahon tekemiin tutkimuksiin, koska tutkija ei voi taata laitteiden tai testiolosuhteiden samankaltaisuutta tähän tutkimukseen verrattuna. Vertaillessa tuloksia toisiinsa tulee ottaa huomioon myös, että koepalojen pinnanlaatu ja muoto vaihtelivat hiukan eri valmistajien tuotteissa sekä myös saman tuotteen koepalojen kesken ja se saattoi vaikuttaa saatuihin tuloksiin. Tehdyllä tutkimuksella saatiin kuitenkin suuntaa antavat tulokset panssarilevyjen kulutuskestävyydestä.

Tuotteiden tarkkaa tilavuutta oli vaikea selvittää, koska koekappaleet olivat epäsymmetrisiä pinoillaan. Tutkimuksesta tehdessä oletettiin kuitenkin, että kaikkien tuotteiden tiheys on suunnilleen sama, joten niiden tilavuus on suoraan verrannollinen niiden painoon. Tämän vuoksi tässä tutkimuksessa mitattiin koekappaleiden painohäviötä kulutusajan funktiona. Jos oletetaan, että kaikkien tutkittujen tuotteiden tiheys ja ulkoiset mitat paksuutta lukuun ottamatta ovat samat (20 mm x 50 mm x tuotteen paksuus (mm)), pystyimme laskemalla selvittämään alku- ja lopputilavuuden tuotteille ja laskemaan niiden erotuksesta, kuinka paljon koekappaleen pinnasta suunnilleen oli kulunut pois tutkimuksen aikana. Tosin kappaleiden muissakin mitoissa esiintyi pieniä eroja, joten tuo laskutulokset on suuntaa antava, eikä kovin luotettava.

Kaikista toimitetuista panssarilevyistä kulutettiin eri tutkimuskierrosten aikana yhteensä kaksi koekappaletta. Vertailukappaleiksi saaduista Hardox 400 -kulutusteräksestä, SKM Ceramic 1 -keraamista ja s235-teräksestä kulutettiin vain yksi koekappale. Näinkin jo voitiin päätellä näiden tuotteiden eroavaisuudet panssarilevyihin verrattuna.

Tutkimus suoritettiin Savonia-ammattikorkeakoulun tutkimusohjetta mukaillen seuraavalla tavalla:

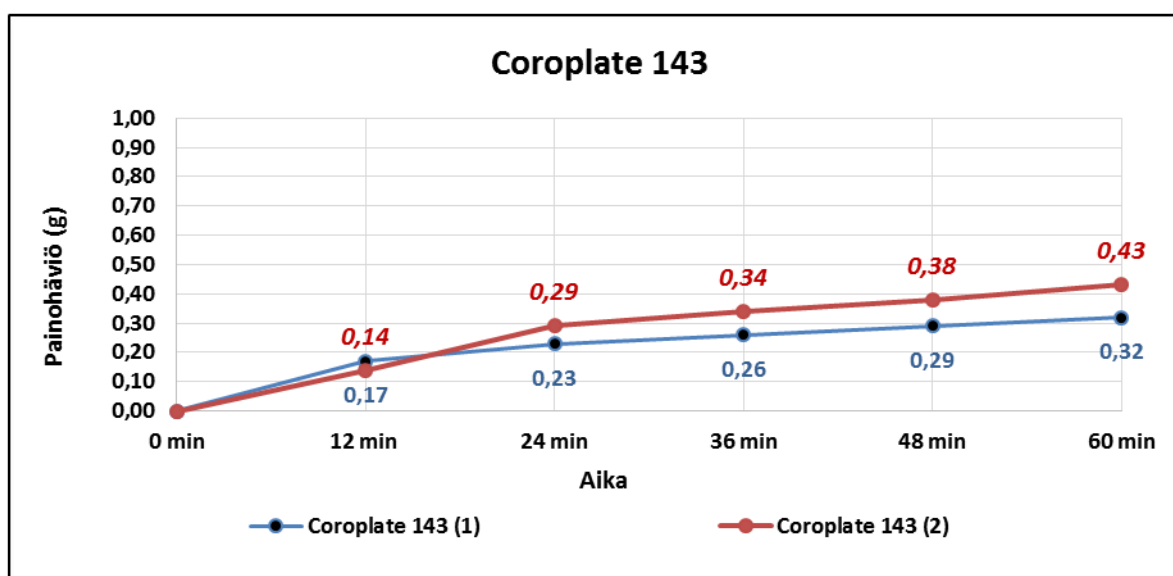
1. Merkittiin tutkittavat kappaleet siten, että ne voitiin erottaa toisistaan selvästi testin aikana ja sen jälkeen.
2. Punnittiin kappaleet 0,01 gramman tarkkuudella vaa'alla, jonka mittaustarkkuus on 0,001 g. Nämä tulokset kirjattiin mittauspöytäkirjaan.
3. Tarkastettiin kulutuslaitteen toimivuus ja valmisteltiin se käyttökuuntoon.
4. Täytettiin laitteen hiekkasäiliöt. Jokaisessa laitteen säiliössä tuli olla samanlaista hiekkaa vähintään 1,5 kg. Hiekkana oli kvartsihiekkä, jonka raekoko oli 0,6 - 1,0 mm.
5. Asetettiin hiekan virtausnopeus siten, että hiekka valui jokaisen koepaikan kohdalla tasaisesti keskimäärin n. 20 g/min. Tämä tuotti ongelmia, sillä joillakin koepaikoilla hiekkaa saatiin valumaan 15 g/min ja toisissa sitä valui jopa 30 g/min. Katsottiin, että tämä ei vaikuta lopullisiin koetuloksiin, koska kaikki koekappaleet käyvät jokaisella koepaikalla, joten niille on kaikille koeken aikana samat olosuhteet.

6. Nostettiin laitteen pyörimisnopeus käynnistämisen jälkeen hyvin lähelle maksimia. Pyörimisnopeudeksi päätettiin noin 80 kier/min. Nopeutta tarkkailtiin laitteeseen asennetulla mittarilla, mikä asetettiin lukuun 50. Kumipyörän ympyrän kehän pituus on noin 1,34 m, joten kulutusmatka oli noin 107 m/min. Kokonaiskulutusmatka testijakson aikana oli siis noin 6 430 metriä.
7. Asetettiin laitteeseen 2,5 kg painot paikoilleen jokaiselle koepaikalle.
8. Asetettiin koekappaleet laitteeseen eli laitteessa oli aina viisi koekappaletta yhtä aikaa.
9. Aloitettiin testi, joka tehtiin aina viidessä 12 minuutin jaksossa. Kokonaiskulutusaika jokaisen koepalan osalta oli siis 60 minuuttia.
10. Jokaisen jakson jälkeen koekappaleet punnittiin ja tulokset merkittiin mittauspöytäkirjaan. Koekappaleiden paikkoja vaihdettiin siten, että jokainen koekappale oli yhden jakson ajan eri pidikkeessä käyden lopulta kaikki paikat läpi.
11. Testin loputtua punnittiin kappaleiden loppupaino ja laskettiin niiden painohäviö jokaisen jakson jälkeen.
12. Laadittiin raportti, johon tuli taulukko, mistä käy ilmi kappaleiden kuluminen testin aikana kappaleiden painon häviönä. Taulukon mukaan piirrettiin kappaleiden kulumisesta käyrät kulutusajan funktiona. (Savonia-ammattikorkeakoulu, 2010)



KUVA 57 Kumipyöräabraasiokokeessa käytetty laite (Viitala, 2016)

Coroplate 143 suoriutui kumipyöräabraasiokokeessa tässä tutkimuksessa tutkituista panssarilevyistä parhaiten. Molempien koepalojen kuluminen oli vähäisintä jo testijakson alusta alkaen verrattuna muihin tutkittuihin panssarilevyihin. Kuviosta alla nähdään, että sisäänajokulumisessa eli ensimmäisessä 12 minuutin jaksossa koekappale 1 menetti painoa 0,18 g ja toinen koekappale 0,14 g (kuvio 17). Koekappale 1:n kuluminen tasoittui ensimmäisen jakson jälkeen vakioksi. Koekappale 2:n sisäänajokuluminen jatkui vielä toisessa jaksossakin, mutta sen jälkeen kuluminen tasaantui vakioksi. Koekappale 1 menetti painostaan koko testin aikana 0,32 g, mikä on vähiten kaikista tutkituista koekappaleista. Koekappale 2 menetti painostaan 0,43 g ja se on toiseksi paras tulos tutkimuksessa. Eroa koepalojen kulumisen välillä oli siis 0,11 g. Tuotteen keskiarvokulumiseksi tässä tutkimuksessa saatiin 0,37 g. Tässä tutkimuksessa tuotteen paksuudesta kului pois noin 0,05 mm. Kuvassa alla nähdään tämän tuotteen kulutetut koekappaleet (kuva 58).

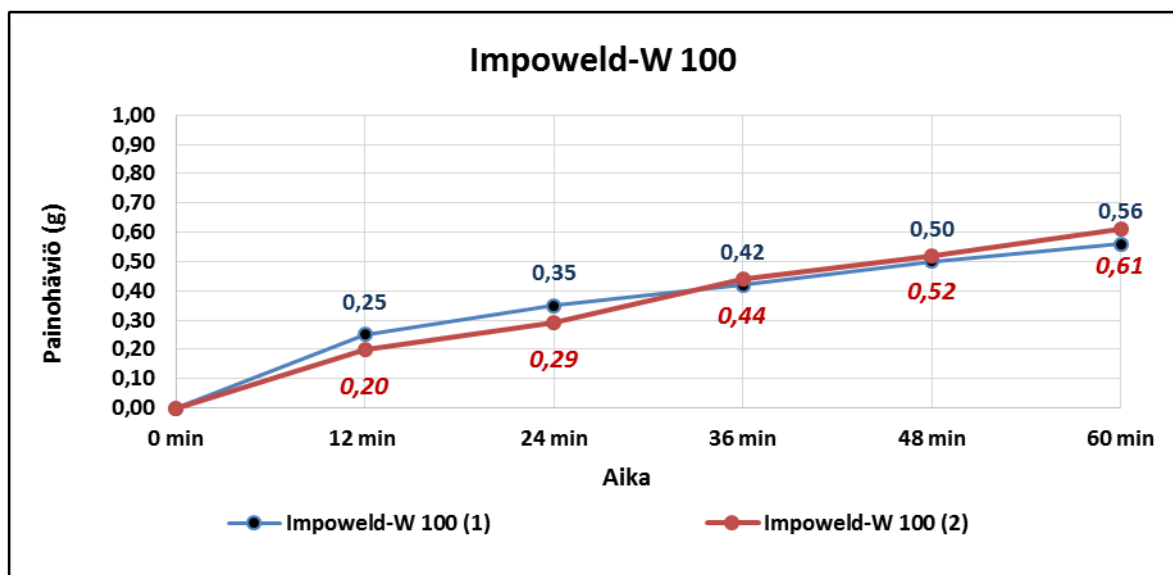


KUVIO 17 Coroplate 143 -panssarilevyn painohäviö (g) kulutuskokeessa kulutusajan (min) funktiona (Viitala, 2016)



KUVA 58 Kulutetut Coroplate 143 -panssarilevyn koekappaleet (Viitala, 2016)

Impoweld-W 100 -panssarilevy osoittautui keskivetoa paremmaksi kulumisenkestävyydeltään sen sijoittuen vertailussa kolmanneksi. Kulutustestitulokset tuotteen eri koepalojen välillä eivät eronneet toisistaan kuin 0,05 g. Molempien koekappaleiden sisäänajokuluminen kesti ensimmäisen jakson ajan, minkä jälkeen kuluminen vakiintui tasaiseksi. Koekappale 1 menetti painoaan testin aikana 0,56 g ja koekappale 2 menetti 0,61 g. Keskiarvoksi saatiin täten 0,59 g. Tässä tutkimuksessa tämän tuotteen pinta kului testin aikana paksuudestaan noin 0,08 mm. Kuvio alla esittää tuotteen kulumisesta johtuneet painohäviöt kulumisajan funktiona ja kuvassa nähdään kulutetut Impoweld-W 100 -panssarilevyn koekappaleet ja (kuvio 18 ja kuva 59).

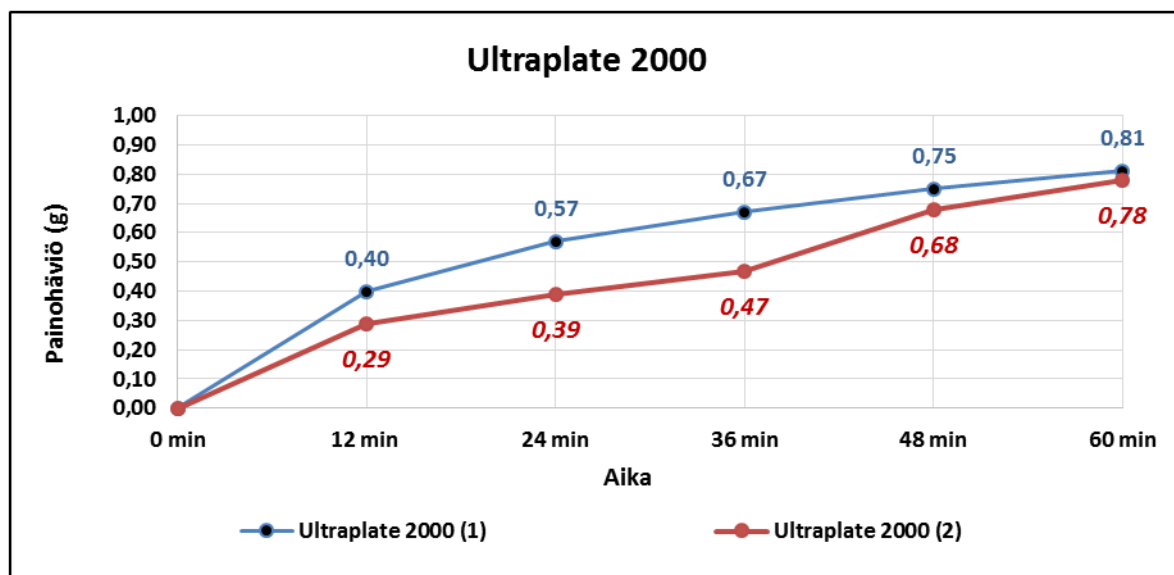


KUVIO 18 Impoweld-W 100 -panssarilevyn painohäviö (g) kulutuskokeessa kulutusajan (min) funktiona (Viitala, 2016)



KUVA 59 Kulutetut Impoweld-W 100 -panssarilevyn koekappaleet (Viitala, 2016)

Ultraplate 2000 -levyn koekappaleet kuluivat toisiinsa nähden tasaisimmin kaikki tutkitut panssarilevyt huomioon ottaen, koska koekappaleiden painohäviön ero oli vain 0,03 g. Kulumiskoevertailussa levy sijoittui viidenneksi. Koekappaleiden sisäänajokuluminen kesti ensimmäisen 12 minuutin jakson, minkä jälkeen koekappaleiden kuluminen vakiintui tasaiseksi. Toisen koekappaleen kohdalla 12 minuutin ja 36 minuutin välillä kuluminen oli vähäisempää, kunnes 48 minuutin jälkeen se kasvoi nopeasti. Koekappaleet menettivät kokeen aikana painoistaan noin 0,79 g ja niistä kului pois paksuudesta noin 0,10 mm. Kuviosta alla nähdään koekappaleiden kulumisesta johtuneet painohäviöt kokeen aikana ja alla olevasta kuvasta kulutetut koekappaleet (kuvio 19 ja kuva 60).

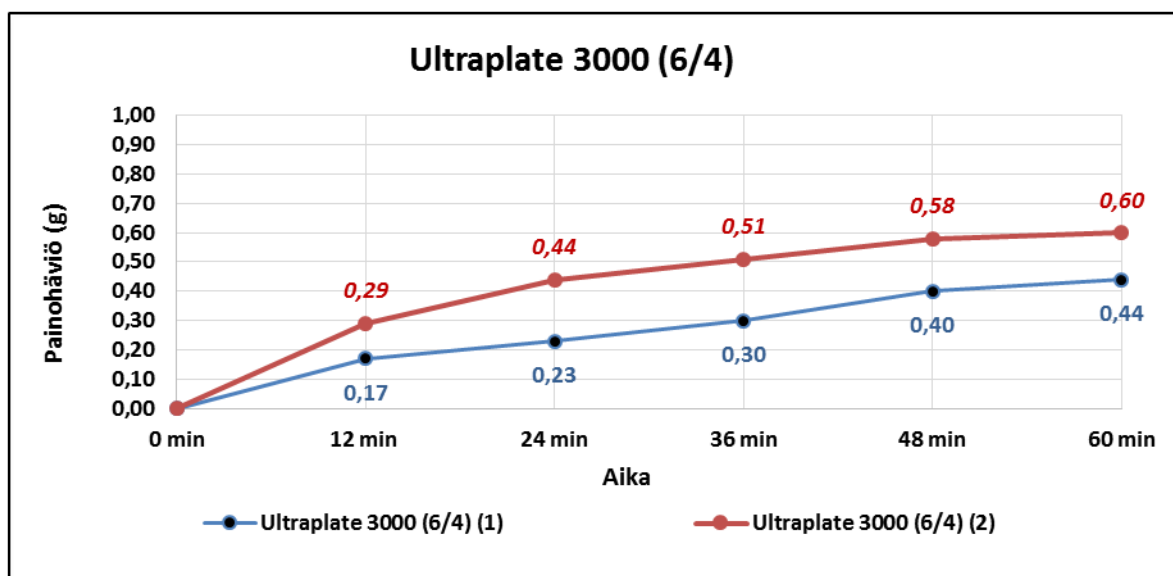


KUVIO 19 Ultraplate 2000 -panssarilevyn painohäviö (g) kulutuskokeessa kulutusajan (min) funktiona (Viitala, 2016)



KUVA 60 Kulutetut Ultraplate 2000 -panssarilevyn koekappaleet (Viitala, 2016)

Ultraplate 3000 (6/4) -panssarilevy sijoittui tässä tutkimuksessa panssarilevyjen vertailussa toiseksi keskiarvoiselta kulumiseltaan. Sisäänajokuluminen kesti useimpien tutkittujen panssarilevyjen tavoin molemmilla koekappaleilla ensimmäisen 12 minuutin testijakson ajan. Koekappale 1 menetti testin aikana painostaan 0,44 g ja toinen koekappale 0,60 g. Koekappaleiden mittausrvojen erotus oli siis 0,16 g ja keskiarvoksi saatiin 0,52 g. Tuotteen paksuudesta kului pois testin aikana noin 0,07 mm. Kuviosta alla nähdään koekappaleiden kulumisesta johtuneet painohäviöt kokeen aikana ja alla olevasta kuvasta kulutetut koekappaleet (kuvio 19 ja kuva 61).

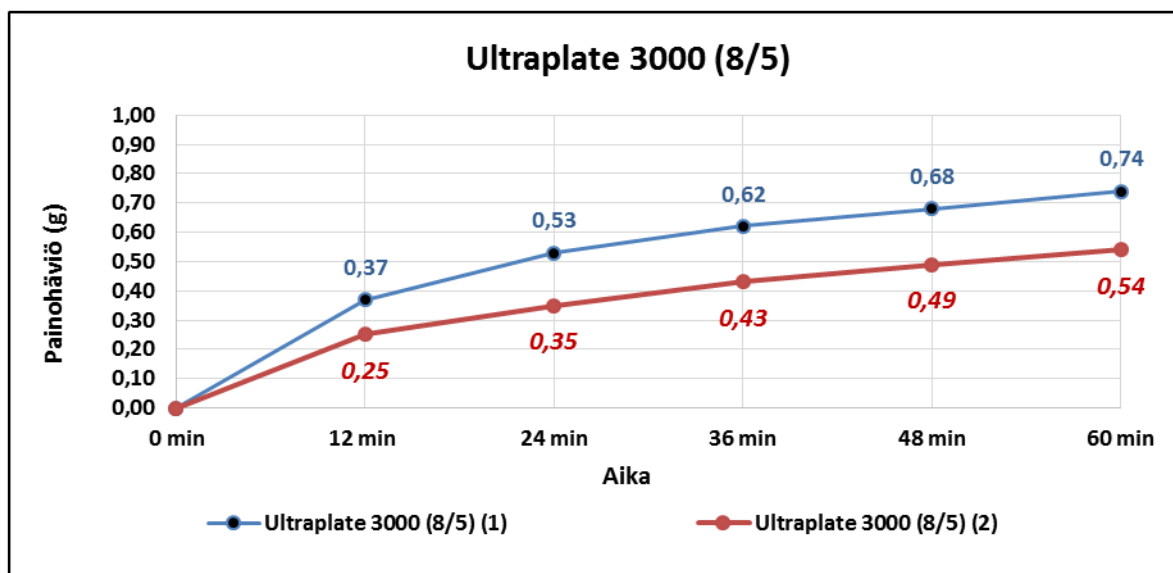


KUVIO 20 Ultraplate 3000 (6/4) -panssarilevyn painohäviö (g) kulutuskokeessa kulutusajan (min) funktiona (Viitala, 2016)



KUVA 61 Kulutetut Ultraplate 3000 (6/4) -panssarilevyn koekappaleet (Viitala, 2016)

Ultraplate 3000 (8/5) -panssarilevy sijoittui vertailussa neljänneksi. Koekappale 1 menetti kokeessa painostaan 0,74 g ja toinen koekappale 0,54 g. Mittausheittoa koekappaleiden välillä oli siis 0,20 g ja keskiarvoksi saatiin 0,64 g. Kulumiskäyrät ovat muodoltaan varsin tavanomaiset. Tuotteen paksuudesta kului pois kulutustestin aikana keskimäärin noin 0,08 mm. Kuviosta alla nähdään koekappaleiden kulumisesta johtuneet painohäviöt kokeen aikana ja alla olevasta kuvasta kulutetut koekappaleet (kuvio 21 ja kuva 62).

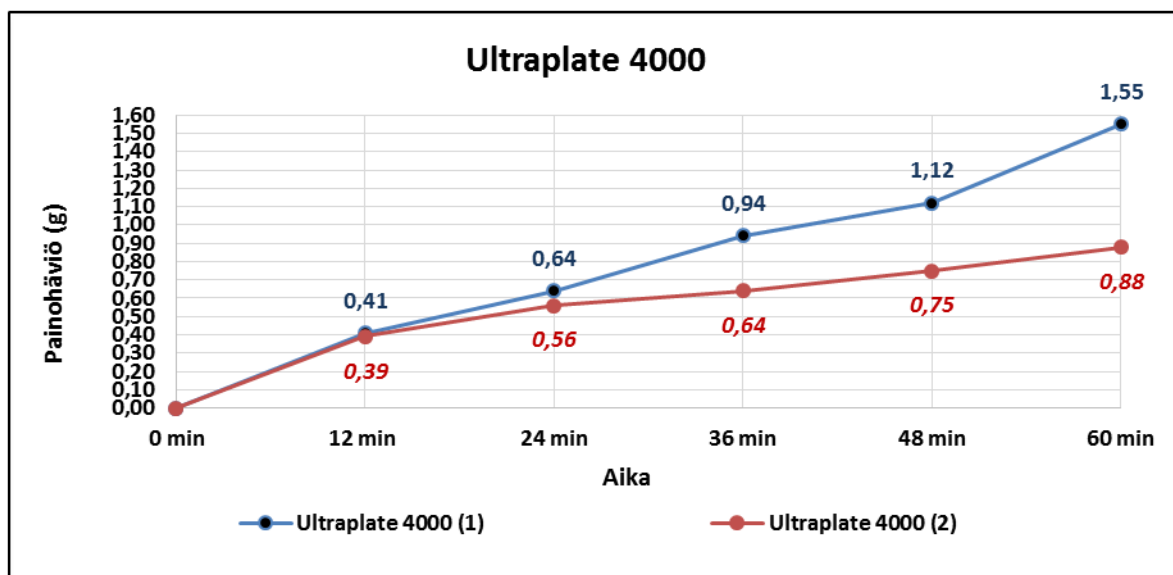


KUVIO 21 Ultraplate 3000 (8/5) -panssarilevyn painohäviö (g) kulutuskokeessa kulutusajan (min) funktiona (Viitala, 2016)



KUVA 62 Kulutetut Ultraplate 3000 (8/5) -panssarilevyn koekappaleet (Viitala, 2016)

Ultraplate 4000 oli kulutustestissä selvästi huonoin panssarilevy. Varsinkin koekappale 1 kului testin aikana tasaisesti alusta loppuun melko paljon jokaisen 12 minuutin jakson aikana, ja testin päättyttyä se oli menettänyt painostaan jopa 1,55 g. Koekappale 2 menetti sekkin melko paljon painostaan, 0,88 g, mutta kuluminen väheni kuitenkin sisäänajokulumisvaiheen jälkeen. Koekappaleiden painohäviöiden erotus oli siis 0,67 g ja painohäviöiden keskiarvoksi saatiin 1,22 g. Tuotteen paksuudesta kului pois kokeen aikana keskimäärin 0,16 mm. Kuviosta alla nähdään koekappaleiden kulumisesta johtuneet painohäviöt kokeen aikana ja alla olevasta kuvasta kulutetut koekappaleet (kuvio 22 ja kuva 63).

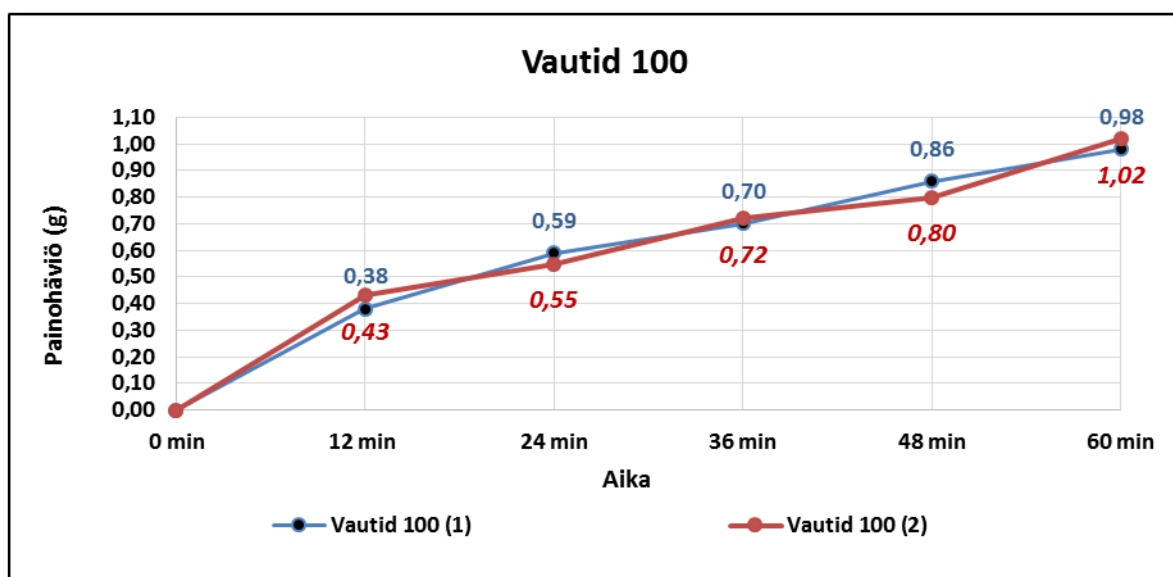


KUVIO 22 Ultraplate 4000 -panssarilevyn painohäviö (g) kulutuskokeessa kulutusajan (min) funktiona (Viitala, 2016)



KUVA 63 Kulutetut Ultraplate 4000 -panssarilevyn koekappaleet (Viitala, 2016)

Vautid 100 -panssarilevy oli tutkituista panssarilevyistä toiseksi huonoin tuote tässä kulutustestissä. Koekappale 2 kului ensimmäisen 12 minuutin aikana yhtä paljon, kun Coroplate 143 koko testin aikana yhteensä. Korkean sisäänajokulumisen syy on varmaankin hitsausroiskeiden suuri määrä kulumattomalla pinnalla, koska kuluessaan nuo roiskeet irtoavat pinnasta helposti. Tosin tuote kului sisäänajokulumisenkin jälkeen vielä 0,6 g, joten yksin tuo edellä mainittu ei riitä syyksi korkealle kulumiselle. Koekappaleiden välillä ero kulumisella oli vain 0,04 g, kun koekappale 1 menetti kokeen aikana painostaan yhteensä 0,98 g ja toinen koekappale 1,02 g. Pinnan paksuudesta tuotteesta kului pois keskimäärin 0,13 mm. Kuviosta alla nähdään koekappaleiden kulumisesta johtuneet painohäviöt kokeen aikana ja alla olevasta kuvasta kulutetut koekappaleet (kuvio 23 ja kuva 64).

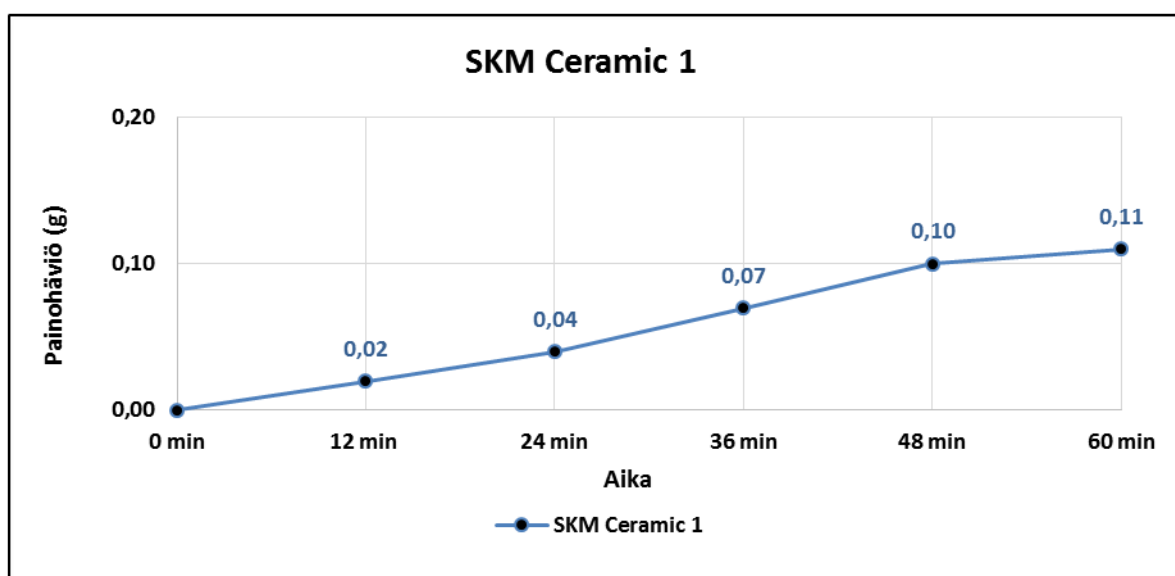


KUVIO 23 Vautid 100 -panssarilevyn painohäviö (g) kulutuskokeessa kulutusajan (min) funktiona (Viitala, 2016)



KUVA 64 Kulutetut Vautid 100 -panssarilevyn koekappaleet (Viitala, 2016)

SKM Ceramic 1 osoittautui kulumisen kannalta erittäin kestäväksi, mutta se ei kestä kovinkaan hyvin iskuja. Koekappale jouduttiin valmistamaan isommasta levyn palasta, jotta se olisi ollut suunnilleen samankokoinen kuin panssarilevyjen koekappaleetkin. Tutkijalla ei ollut käytettävissä sellaisia työkaluja, että levystä olisi saatu siististi leikattu pala, joten koekappale jouduttiin murtamaan isommasta levystä iskemällä siihen vasaralla. Tämä yksi sopivan kokoinen, joskin epämääräisen muotoinen koekappale antoi kuitenkin selvän kuvan tuotteen kulumiskestävydestä, mikä oli noin kolme-neljä kertaa parempi, kuin parhaalla tutkittavana olleella panssarilevyllä ja jopa kymmenen kertaa parempi, kuin huonoimmalla tutkittavana olleella panssarilevyllä. Tuote menetti painoaan vain noin 0,11 g, ja sen paksuudesta kului noin 0,01 mm kokeen aikana. Varsinaista sisäänajokulumista ei ollut havaittavissa. Kuvioista alla nähdään koekappaleen kulumisesta johtunut painohäviö kokeen aikana ja alla olevasta kuvasta kulutettu koekappale (kuvio 24 ja kuva 65).

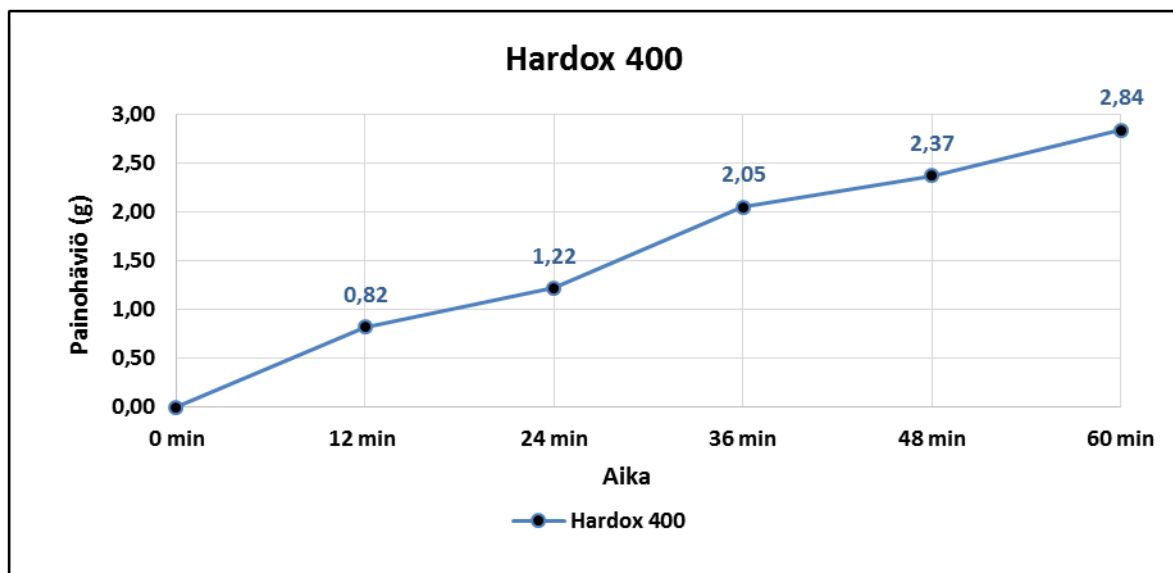


KUVIO 24 SKM Ceramic 1 -keraamin painohäviö (g) kulutuskokeessa kulutusajan (min) funktiona (Viitala, 2016)



KUVA 65 Kulutettu SKM Ceramic 1 -keraamin koekappale (Viitala, 2016)

Hardox 400 kului testissä varsin tasaisesti, sillä varsinaista sisäänajokulumista ei ollut havaittavissa. Koekappaleen paksuudesta lähti testin aikana 0,36 mm ja se menetti painostaan 2,84 g. Se pärjäsi kuitenkin vertailussa vielä melko selvästi s235-perusteräkselle, muttei päässyt vielä lähellekään panssarilevyjen kulumiskestävyyttä. Kuviosta alla nähdään koekappaleen kulumisesta johtunut painohäviö kokeen aikana ja alla olevasta kuvasta kulutettu koekappale (kuvio 26 ja kuva 66).

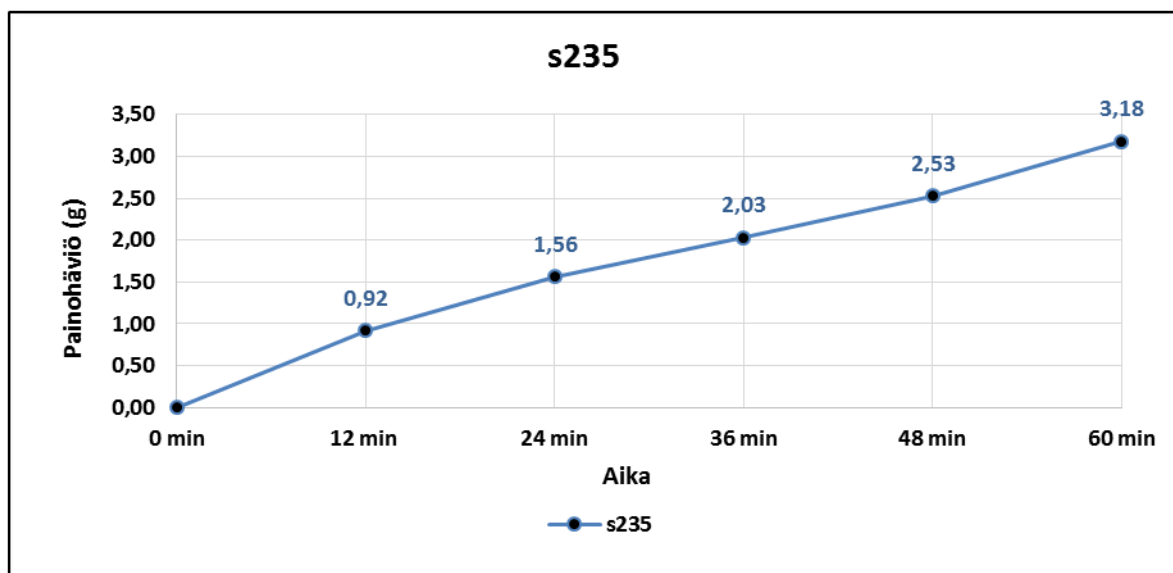


KUVIO 25 Hardox 400 -kulutusteräksen painohäviö (g) kulutuskokeessa kulutusajan (min) funktiona (Viitala, 2016)



KUVA 66 Kulutettu Hardox 400 -koekappale (Viitala, 2016)

Perusteräs s235 kului odotetusti eniten kaikista tutkituista tuotteista. Muihin tutkittavana olleisiin tuotteisiin verrattuna se kestää kulutusta erittäin huonosti. Koekappale menetti painostaan testin aikana jopa 3,18 g ja paksuudestaan se kului keskimäärin 0,41 mm. Tuote kului varsin tasaisesti koko testin ajan, vaikkakin suurin kuluminen tapahtui ensimmäisen 12 minuutin jakson aikana. Kuvion alla nähdään koekappaleen kulumisesta johtunut painohäviö kokeen aikana ja kuvion alla olevasta kuvasta kulutettu koekappale (kuvio 26 ja kuva 67).



KUVIO 26 S235-perusteräs, painohäviö (g) kulutustestissä kulutusajan (min) funktiona (Viitala, 2016)



KUVA 67 Kulutettu S235-koekappale (Viitala, 2016)

Yhteenvedona kumipyöräabraasiokokeesta voidaan todeta, että paras panssarilevy tämän tutkimuksen mukaan kulutuskestävyydeltään tutkituista tuotteista on Coroplate 143 ja heikoin Ultraplate 4000. Koekappaleista tasalaatuisimmat testin mukaan ovat Ultraplate 2000 -panssarilevyllä, jonka koekappaleiden painohäviön erotus oli testin lopussa vain 0,03 g. Suurin erotus saman tuotteen koekappaleiden painohäviöiden välillä oli Ultraplate 4000 -levyllä.

Kaikkien panssarilevyjen kuluminen alkoi voimakkaasti ensimmäisen 12 minuutin jakson aikana ja tasoittui sitten vakioksi testin loppua kohden. Tuotteiden sisäänajokuluminen oli tämän tutkimuksen mukaan keskimäärin noin 40 % koko tuotteen kulumisesta testin aikana. Voimakkain ns. sisäänajokuluminen oli Vautid 100 -panssarilevyn koekappaleella ja pienin Coroplate 143 -panssarilevyn koekappaleella. Tuotteet menettivät painostaan keskimäärin 0,73 g ja pinnan paksuudestaan noin 0,09 mm.

Taulukosta alla nähdään kulutettujen koekappaleiden painohäviö kokeen aikana (taulukko 9). Taulukosta on nähtävissä myös jokaisen tuotteen koekappaleiden keskiarvokuluminen ja mittaustulosten erot eri koekappaleiden välillä.

TAULUKKO 9 Tuotteiden vertailu kumipyöräabraasiokokeessa (Viitala, 2016)

Tuote (koekappaleen järjestysnumero suluissa)	Kuluminen (painohäviö) (g)						Keskiarvo (g)	Mittausheitto koepalojen välillä (g)
	0 min	12 min	24 min	36 min	48 min	60 min		
Coroplate 143 (1)	0,00	0,17	0,23	0,26	0,29	0,32	0,37	0,11
Coroplate 143 (2)	0,00	0,14	0,29	0,34	0,38	0,43		
Impoweld-W 100 (1)	0,00	0,25	0,35	0,42	0,50	0,56	0,59	0,05
Impoweld-W 100 (2)	0,00	0,20	0,29	0,44	0,52	0,61		
Ultraplate 2000 (1)	0,00	0,40	0,57	0,67	0,75	0,81	0,79	0,03
Ultraplate 2000 (2)	0,00	0,29	0,39	0,47	0,68	0,78		
Ultraplate 3000 (6/4) (1)	0,00	0,17	0,23	0,30	0,40	0,44	0,52	0,16
Ultraplate 3000 (6/4) (2)	0,00	0,29	0,44	0,51	0,58	0,60		
Ultraplate 3000 (8/5) (1)	0,00	0,37	0,53	0,62	0,68	0,74	0,64	0,20
Ultraplate 3000 (8/5) (2)	0,00	0,25	0,35	0,43	0,49	0,54		
Ultraplate 4000 (1)	0,00	0,41	0,64	0,94	1,12	1,55	1,22	0,67
Ultraplate 4000 (2)	0,00	0,39	0,56	0,64	0,75	0,88		
Vautid 100 (1)	0,00	0,38	0,59	0,70	0,86	0,98	1,00	0,04
Vautid 100 (2)	0,00	0,43	0,55	0,72	0,80	1,02		
SKM Ceramic 1	0,00	0,02	0,04	0,07	0,10	0,11	0,11	0,00
Hardox 400	0,00	0,82	1,22	2,05	2,37	2,84	2,84	0,00
s235	0,00	0,92	1,56	2,03	2,53	3,18	3,18	0,00
KESKIARVOT (panssarilevyt)		0,30					0,73	0,18

6.6 Tutkimustulosten ja tuotteiden vertailu

Abrasiivisen kulumisen kannalta parhaat panssarilevyt näissä tutkimuksissa ovat selvästi Coroplate 143 ja Impoweld-W 100. Ne ovat tasaisen hyviä kaikissa tehdyissä tutkimuksissa. Vautid 100 taas jää heikoimpien joukkoon sekä kovuusmittauksissa, että kulutustestissä. On oletettavaa, että Vautid 100 kuitenkin kestää iskuja melko hyvin suuren mangaanipitoisuutensa vuoksi, koska mangaani muokkauslujittuu helposti.

Kun verrataan kovuuskokeiden tuloksia kulutuskokeen tuloksiin, huomataan, että parhaiten kulutuskokeessa kestävät panssarilevyt, joiden kovahitsin Vickers-kovuus oli korkeampi kuin muilla. Kuten tutkimustuloksista ja alla olevasta yhteenvetotaulukosta nähdään, Vickers-kovuustestissä kovimmaksi tuotteeksi mitattu Impoweld-W 100 -panssarilevy ei kuitenkaan ollut kaikkein paras kulutuskestävyydeltään, koska sen mikrorakenteessa karbidien suuntautuneisuus on niin selvä, että kulutuksen suunnalla on merkitystä kappaleen kulumisnopeuteen (taulukko 10). Näin on varsinkin silloin, jos karbideja ei ole tasaisesti koko kovahitsin alueella tiheästi.

Kromin määrä kovahitsissä ei ole ainoa selitys panssarilevyjen kulumisenkestävyydelle, koska vaikka Vautid 100 -panssarilevyssä on tämän tutkimuksen mukaan kromia 26,3 %, se ei pärjää tehdyssä kulutuskoevertailussa edes vain 15,9 % kromia sisältävälle Ultraplate 2000 -panssarilevyille. Parhaiten kulutustestissä sijoittuneilla panssarilevyillä on korkean kromipitoisuuden lisäksi myös melko korkea hiilipitoisuus ja pieni rautapitoisuus. Myös muualla maailmalla tehdyt kumipyöräabraasiokokeiden tulokset tukevat teoriaa, että hyväksyttävä tulos abrasiivisen kulumisen kannalta saavutetaan, kun pinnoite sisältää vähintään 20 % kromia ja 4 % hiiltä (Superior Consumables Inc., 2016).

Ultraplate 4000 -panssarilevyyn koekappaleen koetulokset eivät vastanneet maahantuoja ilmoittamia arvoja ainakaan Vickers-kovuudeltaan. Myös sen alkuaineet pitoisuuksineen poikkesivat maahantuoja tiedoista. Oikeastaan kaikissa Ultraplate-levyissä varsinkin kromin määrä poikkesi ilmoitusta ja niiden Vickers-kovuudet eivät vastanneet odotuksia. Ainut poikkeus näissä levyissä oli Ultraplate 3000 (6/4).

TAULUKKO 10 Tutkimustulos- ja tuotevertailu

Tutkimus	Tuote ->	Coroplate 143		Impoweld-W 100		Ultraplate 2000		Ultraplate 3000 (6/4)		Ultraplate 3000 (8/5)		Ultraplate 4000		Vautid 100		KESKIARVO	
Kovuudet (valm. ilm./mitattu)	Rockwell C (HRC)	61,0	60,3	60,1	61,0	58-60	60,5	57-60	58,9	57-60	59,7	60-62	60,1	60,0	59,1	59,7	59,9
	Rockwell C (HRC) hiottu	61,0	62,3	60,1	60,7	58-60	60,8	57-60	58,4	57-60	59,9	60-62	61,5	60,0	59,1	59,7	60,4
	Vickers (HV ₁₀)	720	702	700	733	655-675	517	635-700	672	635-700	545	700-750	415	700	555	691	591
Kulutustesti	Painohäviö (g)	0,37		0,59		0,79		0,52		0,64		1,22		1,00		0,73	
Alkuaineanalyysi (%) (val. ilm./mitattu)	C	5,2	ei mit.	5,0	ei mit.	4,0-5,0	ei mit.	4,0-5,0	ei mit.	4,0-5,0	ei mit.	4,0-5,0	ei mit.	4,6	ei mit.	4,7	ei mit.
	Fe	62,0	67,6	60,0	57,4	ei ilm.	76,9	ei ilm.	67,9	ei ilm.	74,1	ei ilm.	75,5	ei ilm.	69,0	ei ilm.	69,8
	Cr	30,0	24,2	30,0	37,3	20-40	15,9	22-26	26,9	22-26	18,1	22-26	17,0	28,0	26,3	27,1	23,7
	Mn	0,2	0,0	Ei	2,4	Ei	1,8	ON	2,6	ON	2,3	Ei	1,7	1,0	2,8	ei ilm.	1,9
	Si	1,5	1,6	Ei	0,3	Ei	1,2	Ei	1,7	Ei	1,3	0,9	0,9	Ei	0,8	ei ilm.	1,1
	Mo	Ei	0,1	Ei	0,0	Ei	0,0	Ei	0,0	Ei	0,0	ON	0,0	Ei	0,0	ei ilm.	0,0
	Nb	1,1	1,0	Ei	0,0	ON	0,0	Ei	0,0	Ei	0,0	ON	0,0	Ei	0,0	ei ilm.	0,1
	Al	Ei	0,1	Ei	0,1	Ei	0,0	Ei	0,0	Ei	0,0	Ei	0,0	Ei	0,1	ei ilm.	0,0
	O	Ei	5,4	Ei	2,4	Ei	4,2	Ei	0,9	Ei	4,1	Ei	4,8	Ei	1,1	ei ilm.	3,3
	Cl	Ei	0,0	Ei	0,0	Ei	0,0	Ei	0,0	Ei	0,0	Ei	0,1	Ei	0,0	ei ilm.	0,0
	Ba	Ei	0,0	Ei	0,0	Ei	0,0	Ei	0,0	Ei	0,0	Ei	0,1	Ei	0,0	ei ilm.	0,0
	B	Ei	0,0	Ei	0,0	Ei	0,0	ON	0,0	ON	0,0	ON	0,0	Ei	0,0	ei ilm.	0,0
	V	Ei	0,1	Ei	0,0	Ei	0,0	Ei	0,0	Ei	0,0	Ei	0,0	Ei	0,0	ei ilm.	0,0

7 LOPPUPÄÄTELMÄT

Kaikki tässä raportissa mainitut tutkimukset on tehty kaikille mukana olleille tuotteille samoilla laitteilla ja samoissa olosuhteissa ja tutkimusten tuloksia voidaan verrata vain tämän tutkimuksen sisällä toisiinsa. Tutkimuksen tulokset eivät siis ole vertailtavissa muilla laitteilla muissa olosuhteissa tehtyihin tai tehtäviin tutkimuksiin. Tutkimus antaa karkean käsityksen tutkittavana olleiden tuotteiden kovuudesta, mikrorakenteesta ja abrasiivisen kulumisen kestosta.

Panssarilevyjä toisiinsa vertailtaessa on muistettava, että jokainen tuote suunnitellaan pitkälti erilaisiin tarkoituksiin ja olosuhteisiin. Toiset tuotteet kestävät paremmin lämpöä, toiset iskuja, kun taas jotkin on tarkoitettu nimenomaan abrasiivisesti kuluttaviin olosuhteisiin. Eri lisäaineilla ja niiden pitoisuuksilla saadaan levyihin erilainen mikrorakenne, lujuus ja kulumisenkestävyys.

Hitsausmenetelmällä on suuri vaikutus hitsin mikrorakenteeseen. Eri hitsausmenetelmillä syntyy erilaista mikrorakennetta sekä lisäaineen ja perusmateriaalin sekoittumista. Näissä tutkituissa tuotteista oli käytetty sekä puikko-, jauhekaari-, että täytelankahitsausmenetelmiä. Tyypillisesti sekoittumisaste puikkohitsatuilla tuotteilla on 10–25 % luokkaa ja täytelanka- ja jauhekaarihitsatuilla 30–50 %. Jotta kovahitsin ja perusaineen sekoittumista olisi voitu tutkia tarkemmin tässä tutkimuksessa, olisi pitänyt olla tarkempaa tietoa myös koekappaleissa käytetyistä perusmateriaaleista ja enemmän aikaa tutkimusten suorittamiseksi.

Tuotteiden suunnittelussa kannattaisi siis tämän tutkimuksen perusteella panostaa erityisesti tuotteen pinnan tasaisuuteen ja kovahitsin tasaiseen jäähtymiseen koko hitsin matkalla. Tuotteiden suurin kuluminen tapahtuu sisäänajovaiheessa, ja siihen vaikuttaa olennaisesti tuotteen pinnanlaatu ja pinnankovuus. Karbidien määrä, koko ja suuntautuneisuus kovahitsissä ovat tärkeitä abrasiivisen kulumisen kannalta ja tuotteen hitsaustapa, lämmöntuonti ja jäähtyminen vaikuttavat karbidien kiteytymiseen olennaisesti. Useampi kovahitsauskerros levyissä vähentäisi selvästi perusmateriaalin ja hitsauslisäaineen sekoittumista.

Tuotteita oli tarkoitus tutkia myös nanintendaatiolla eli nanomekaanisella aineenkoestuksella, mutta tutkimus jäi toteutumatta tämän opinnäytetyön aikataululla, koska Savonia-ammattikorkeakoulun laite oli epäkunnossa, eikä sitä saatu korjattua ajoissa, että tutkimustulokset olisivat ehtineet tähän raporttiin. Käytössä olleet tutkimuslaitteet soveltuvat hyvin tämän kaltaiseen vertailevaan tutkimukseen ja niistä on suurta hyötyä MatTKI-hankkeessa mukana oleville yrityksille heidän tutkimus- ja tuotekehitystöissään. Tästä tutkimuksesta tullaan julkaisemaan tulevaisuudessa myös artikkeli alan lehdessä.

LÄHTEET

- Adudra. (2016). *Abrasive wear*. Vlaardingen. Haettu 22. 3. 2016 osoitteesta
<http://www.aludra.nl/img/paginas/28.jpg>
- ASM International. (1993). *ASM Handbook: Volume 6 - Welding, brazing and soldering*. ASM International.
- Corodur Verschleiss-Schutz GmbH. (2015). *Corodur Katalog English.pdf*. Haettu 27. 4. 2016 osoitteesta Corodur Verschleiss-Schutz GmbH: http://corodur-thale.de/fileadmin/Umsetzung/pdf/Corodur_Katalog_English_0715.pdf
- DIN 50320. (1979). Standardi. *DIN 50320: Verschleiss - Begriffe, Analyse von Verschleissvorgängen, Gleiderung des Verschleissgebietes*. Berlin: Beuth Verlag. Haettu 20. 3. 2016
- Doka Industry Ltd. (2016a). *Doka Industry Ltd*. Haettu 1. 4. 2016 osoitteesta Doka Industry Ltd.:
<http://www.dokaendustri.com.tr/urunler.php?sayfa=vautidplaka&expandable=1&lang=en>
- Doka Industry Ltd. (2016b). *2.jpg (200×224)*. Haettu 24. 3. 2016 osoitteesta Doka Industry Ltd.:
<http://www.dokaendustri.com.tr/resimler/plaka/2.jpg>
- Esab Oy. (2015). *Korjaus- ja kunnossapitohitsaus*. Haettu 17. 4. 2016 osoitteesta Esab Oy:
http://www.esab.fi/fi/fi/support/documentation/educational/upload/korjaus_ja_kunnossapitohitsaus.pdf
- Impoinvest Oy. (2016a). *Impoinvest Oy :: Yritysinfo*. Haettu 19. 3. 2016 osoitteesta Impoinvest:
<http://www.impomet.com/impoinvest/yritys/yritysinfo.html>
- Impoinvest Oy. (2016b). *Impoinvest Oy :: Panssarilevyt*. Haettu 1. 4. 2016 osoitteesta Impomet Oy:
<http://www.impomet.com/impoinvest/tuotteet/panssarilevyt.html?panel=3>
- Impomet Oy. (2007). *Impomet Oy – Laatuosaaja hitsausalalla*. Haettu 16. Maaliskuu 2016 osoitteesta Impomet Oy: <http://www.impomet.com>
- Impomet Oy. (2016a). *Impomet Oy :: Panssarilevyt*. Haettu 17. 3. 2016 osoitteesta Impomet Oy:
<http://www.impomet.com/impomet/tuotteet/panssarilevyt/index.html?panel=1>
- Impomet Oy. (2016b). *Impomet Oy :: Vautid-panssarilevyt*. Haettu 31. 3. 2016 osoitteesta Impomet Oy:
<http://www.impomet.com/impomet/tuotteet/panssarilevyt/vautid-panssarilevyt.html?panel=1>
- Kalenborn Abresist. (2016). *Chromium Carbide Manufacturing and Repair at Kaltech*. Haettu 23. 3. 2016 osoitteesta Kalenborn Abresist: <http://www.abresist.com/kaltechTN/index.html>
- Kalenborn International. (2016). *Metallich*. Haettu 31. 3. 2016 osoitteesta Kalenborn International:
<http://www.kalenborn.com/materials/metallisch#c1029>
- Keltamäki, K. (2013). Opinnäytetyö. *Kulumisalttiiden kohteiden eri pinnoitusmenetelmiä*. Kemi: Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu. Haettu 17. 3. 2016 osoitteesta
<https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/56015/keltamaki%20B%202%202013.pdf?sequence=1>
- Kivioja, S.; Kivivuori, S.; & Salonen, P. (1997). *Tribologia - kitka, kuluminen ja voitelu* (6. p.). Helsinki: Otatieta Oy.
- Kivistö, T. (1998). Materiaalitieteellisen yhdistyksen XXVI kesäseminaarin luentomateriaalit. *Kuluminen ja kulumisilmiöt*. Tampere: Materiaalitieteellinen Yhdistys.
- Kubes Alloy Products Inc. (2014). *Triten™ Guide to the Evaluation & Selection of HARD FACED PLATE | Kubes Alloys Wear Plates - Chromium Carbide Weld Overlay and Chromium Carbide Overlay Plate, Custom Chromium (Chrome) Carbide Liners, Bulk-Welded, Hardfaced Plates and Pipe, Authorized Distr*. Haettu 28. 4. 2016 osoitteesta Kubes Alloy: http://www.kubesalloys.com/?page_id=282
- Kähkönen, Saku; SKM Service Oy. (7. 4. 2016). Sähköposti. Pattijoki.
- Leskinen, J. (2016). *EDS-analyysiraportti: MaTKI-hankkeen "Panssarilevyt"*. Kuopio: Itä-Suomen Yliopisto.

- Maakasi Oy. (2014). *Panssarilevyt / Maakasi Oy*. Haettu 31. 3. 2016 osoitteesta Maakasi Oy:
<http://maakasi.fi/palvelut/panssarilevyt>
- Meskanen, S.;& Toivonen, P. (2009). *vtp_sulatus_metallurgia.pdf*. Haettu 28. 4. 2016 osoitteesta ValuAtlas:
http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/vtp_sulatus_metallurgia.pdf
- Ovako Oy. (2012). *Ovakon terästen hitsaus*. Haettu 16. 3. 2016 osoitteesta Ovako Oy:
http://www.ovako.com/PageFiles/320/Ovakon_terasten_hitsaus_15724.pdf
- Parikka, R.;& Lehtonen, J. (2000). *Kulumismekanismit ja niiden vaikutus vierintälaakereiden eliniälle*. Espoo: VTT.
 Haettu 22. 3. 2016 osoitteesta Kulumismekanismit ja niiden merkitys vierintälaakereiden eliniälle:
<http://virtual.vtt.fi/virtual/proj3/prognos/prognos/pdf/kulumismekf.pdf>
- Pohjois-Savon Liitto. (4. 12. 2015). *liite-2-matki_ikonsepti.pdf*. Haettu 16. 3. 2016 osoitteesta Pohjois-Savon Liitto:
http://www.pohjois-savo.fi/media/liitetiedostot/paatoksenteko/myr/2016/1_kirjallinen-menettely_tammik/liite-2-matki_ikonsepti.pdf
- Savonia-ammattikorkeakoulu. (2010). Tekniikka, koneosasto, laboratoriotyöt. *Työohje: Abrasiivisen kulumisen vertailukoe*. Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulu.
- SFS-EN ISO 15614-7. (26. 11 2007). Standardi. *Hitsausohjeet ja niiden hyväksyntä metalleille. Hyväksyntä menetelmäkokeella. Osa 7: päällehitsaus*. Suomen Standardisoimisliitto SFS. Haettu 3. 4. 2016 osoitteesta
<https://online-sfs-fi.ezproxy.savonia.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CENISO/ID2/1/100690.html.stx>
- SKM Service Oy. (2013). Haettu 16. Maaliskuu 2016 osoitteesta SKM Service Oy: www-sivut:
<http://www.skmservice.fi>
- SKM Service Oy. (2015). *Palvelut / SKM Service Oy*. Haettu 3. 4. 2016 osoitteesta SKM Service Oy:
<http://www.skmservice.fi/fi/kovapinnoitelevyt>
- Somotec Oy. (26. 4. 2010). *2008_MIG_kovahitsaustaytelangat.pdf*. Haettu 7. 4. 2016 osoitteesta Somotec Oy:
http://www.somotec.fi/Web_page_attachments/2000_MIG_MAG_langat/2008_MIG_kovahitsaustaytelangat.pdf
- Somotec Oy. (2016a). *Somotec Oy*. Haettu 27. 3. 2016 osoitteesta Somotec Oy: <http://www.somotec.fi>
- Somotec Oy. (2016b). *Panssarilevyt*. Haettu 27. 3. 2016 osoitteesta Somotec Oy:
http://www.somotec.fi/index_tiedostot/Page486.htm
- SSAB. (2016a). *Yhteystiedot - SSAB*. Haettu 13. 4. 2016 osoitteesta SSAB lujat erikoisteräkset - levy, kela, putki, profiili - SSAB: <http://www.ssab.fi/Yhteystiedot>
- SSAB. (2016b). *Hardox 400 – SSAB:n helposti muovattava kulutusteräs - SSAB*. Haettu 13. 4. 2016 osoitteesta SSAB lujat erikoisteräkset - levy, kela, putki, profiili - SSAB:
<http://www.ssab.fi/Tuotteet/Brandit/Hardox/Tuotteet/Hardox-400>
- Stolarski, T. A. (1990). *Tribology in Machine Design*. Oxford: Butterworth-Heineman.
- Suomen Asiakastieto Oy. (2015a). *SKM Service Oy - Asiakastieto*. Haettu 16. 3. 2016 osoitteesta Suomen Asiakastieto Oy: <https://www.asiakastieto.fi/yritykset/skm-service-oy/25443369/yleiskuva>
- Suomen Asiakastieto Oy. (2015b). *Oy Impomet Ab - Asiakastieto*. Haettu 12. 4. 2016 osoitteesta Suomen Asiakastieto Oy: <https://www.asiakastieto.fi/yritykset/oy-impomet-ab/01533124/yleiskuva>
- Suomen Asiakastieto Oy. (2015c). *Impoinvest Oy - Asiakastieto*. Haettu 12. 4. 2016 osoitteesta Suomen Asiakastieto Oy: <https://www.asiakastieto.fi/yritykset/impoinvest-oy/08382031/yleiskuva>
- Suomen Asiakastieto Oy. (2016). *Somotec Oy - Asiakastieto Oy*. Haettu 16. 3. 2016 osoitteesta Suomen Asiakastieto Oy: <https://www.asiakastieto.fi/yritykset/somotec-oy/01117438/yleiskuva>

- Suomen Hitsaustekniikan Yhdistys ry. (2014). *Hitsauksen materiaalioppi* (4. korjattu p.). Helsinki: Suomen Hitsaustekniikan Yhdistys ry. Haettu 31. 3. 2016
- Superior Consumables Inc. (2016). *Hardness vs Wear*. Haettu 6. 5. 2016 osoitteesta Superior Consumables Inc.: Mig Welding Supply USA & Canada - Mig Tips Liners Diffusers Nozzles Reamer Cutters: <http://www.superiorconsumables.com/chrome-carbide.asp>
- Tecknoweld Alloys. (1999). *Ultraplates , Hard Cr C PLATES, Hard chromium carbide plates, Hard Armor Plates ,ceramic hard armor plates,Ceramic hard armor,Hard Plate Manufacturers, Hard Plate Suppliers, Hard Plate Tecknoweld - Manufacturers of Engineered composite wear plates for bet.* Haettu 24. 3. 2016 osoitteesta Tecknoweld Alloys: <http://www.tecknoweld.com/en/manufacturing.html>
- Terästyö T. Salminen Oy. (2016). *Kulutuslevyt - Durostat ja Hardox levyt*. Haettu 13. 4. 2016 osoitteesta Kauhan korjaus, valmistus ja polttoleikkaus | Terästyö T. Salminen Oy: <http://www.terastyosalminen.fi/kulutuslevyt>
- Vautid-Shah. (2011). *Composite Wearplates containing chromium carbides, complex carbides, tungsten carbides, borides*. Haettu 1. 4. 2016 osoitteesta Vautid-Shah: <http://www.vautid-shah.com/4/solutions/products/composite-wearplates.aspx>
- Vuoristo, P. (1999). Hitsauspinnoitus. Teoksessa P. Tunturi;& P. Tunturi, *Metallien pinnoitteet ja pintakäsittelyt* (3. p.). Tampere: Metalliteollisuuden Keskusliitto. Haettu 30. 3. 2016

LIITE 1: ROCKWELLIN KOVUUSKOKEEN (HRC) MITTAUSPÖYTÄKIRJA

MITTAUSPÖYTÄKIRJA

Kovuus

Mittauspäivämäärä:	7.4.2016 - 20.04.2016
Mittauksen suorittaja:	Petri Viitala
Mittausmenetelmä:	Rockwell C (HRC)
Standardi:	ISO 6508-1
Mittauslaite:	Brevetti Afri Metal Tester

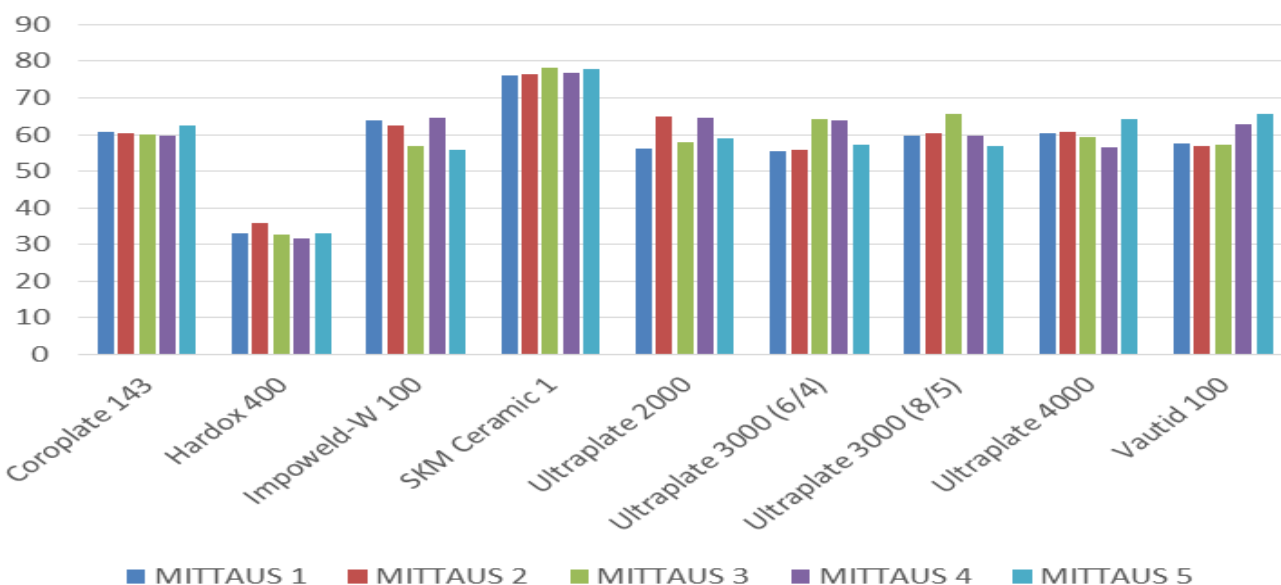
KÄSITTELEMÄTTÖMÄN PINNAN KOVUUS

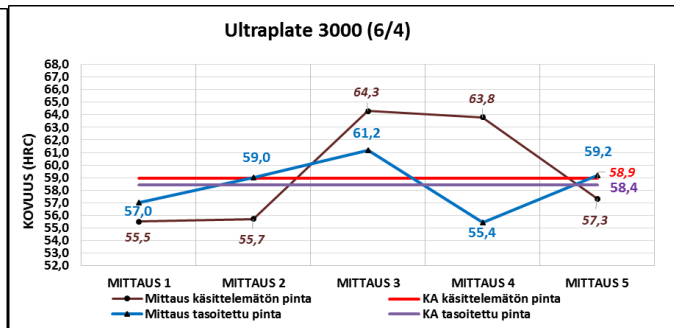
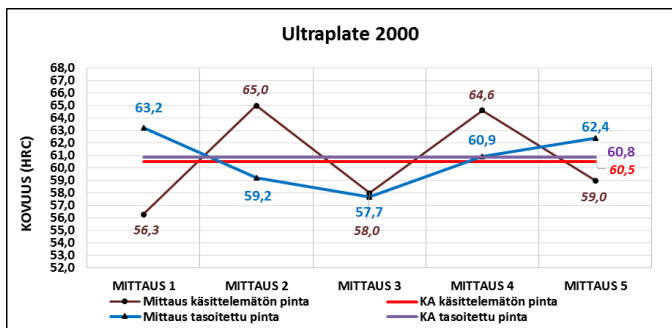
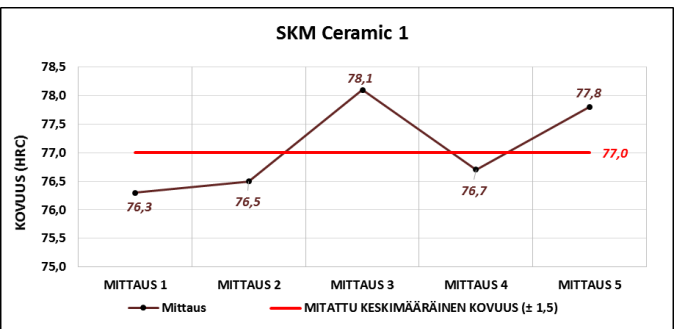
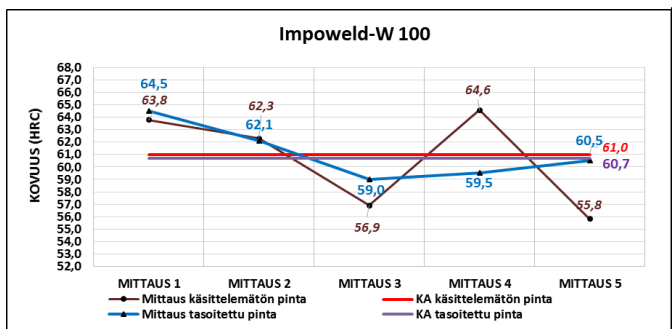
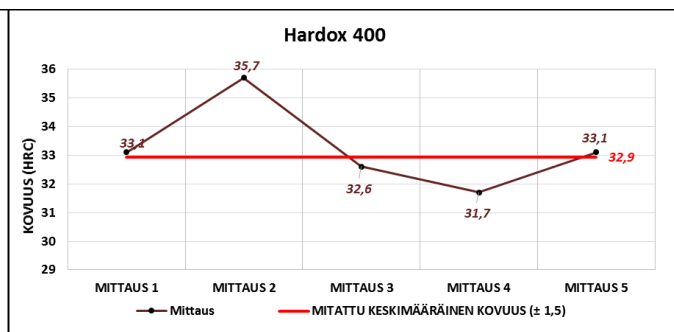
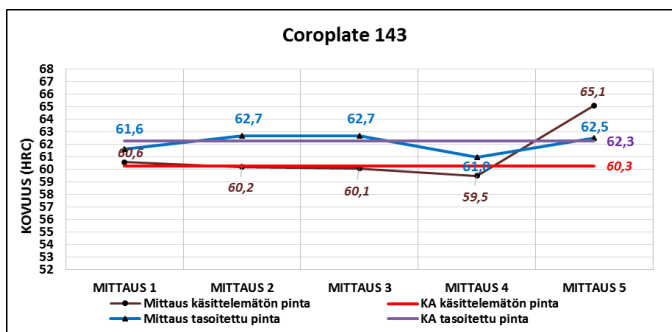
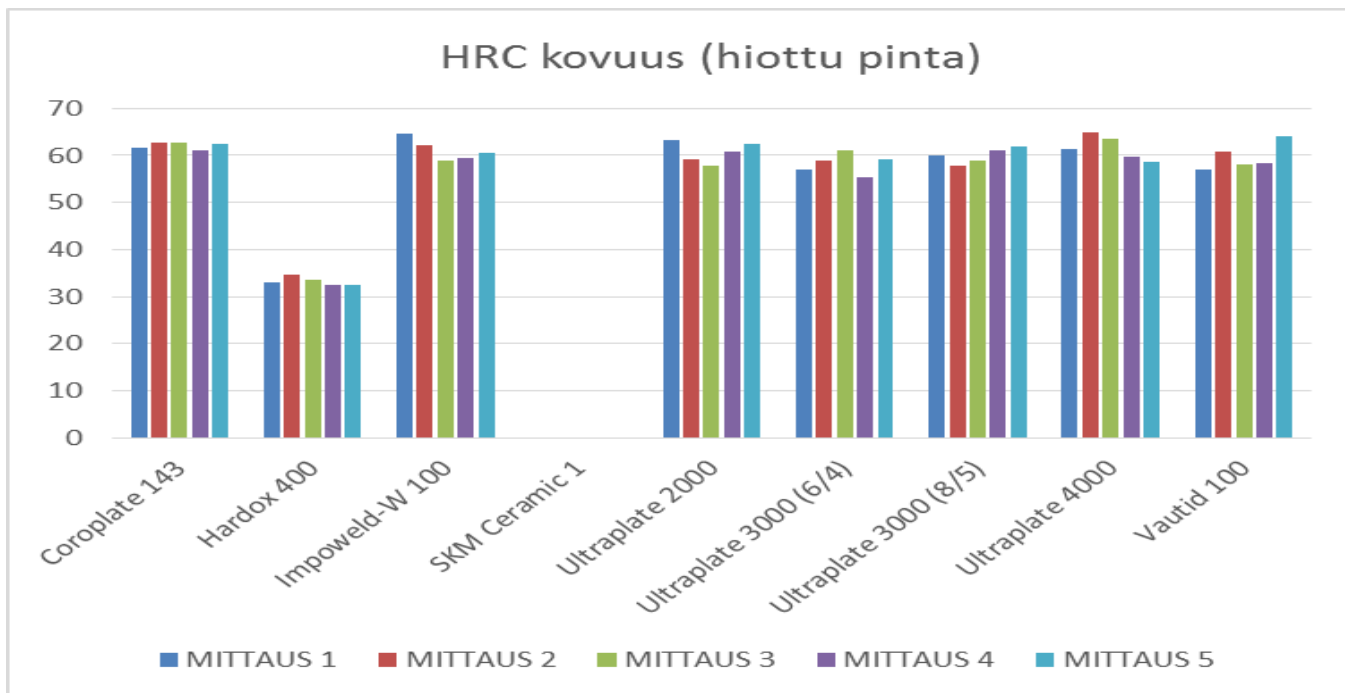
Tuote	MITTAUS 1	MITTAUS 2	MITTAUS 3	MITTAUS 4	MITTAUS 5	MITATTU KESKIMÄÄRÄINEN KOVUUS (± 1,5)	VALMISTAJAN ILMOITAMA KESKIMÄÄRÄINEN KOVUUS	PIENIMMÄN JA SUURIMMAN MITTAUSTULOKSEN ERO
Coroplate 143	60,6	60,2	60,1	59,5	62,5	60,3	60-62	3,0
Hardox 400	33,1	35,7	32,6	31,7	33,1	32,9	42	4,0
Impoweld-W 100	63,8	62,3	56,9	64,6	55,8	61,0	60	8,8
SKM Ceramic 1	76,3	76,5	78,1	76,7	77,8	77,0	ei tiedossa	1,8
Ultraplate 2000	56,3	65,0	58,0	64,6	59,0	60,5	58-60	8,7
Ultraplate 3000 (6/4)	55,5	55,7	64,3	63,8	57,3	58,9	57-60	8,8
Ultraplate 3000 (8/5)	59,5	60,2	65,7	59,5	56,9	59,7	57-60	8,8
Ultraplate 4000	60,2	60,7	59,4	56,5	64,2	60,1	60-62	7,7
Vautid 100	57,4	56,8	57,3	62,7	65,8	59,1	60	9,0
KESKIARVO (pans.levyt)						60,0		7,8

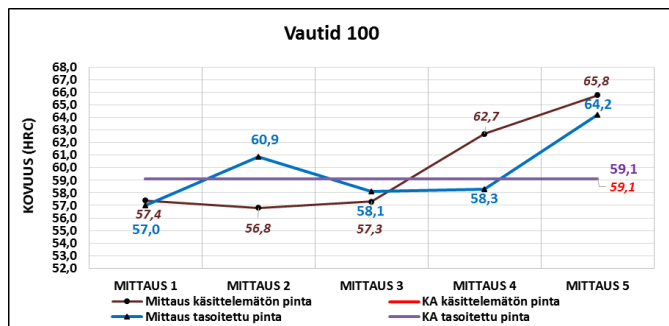
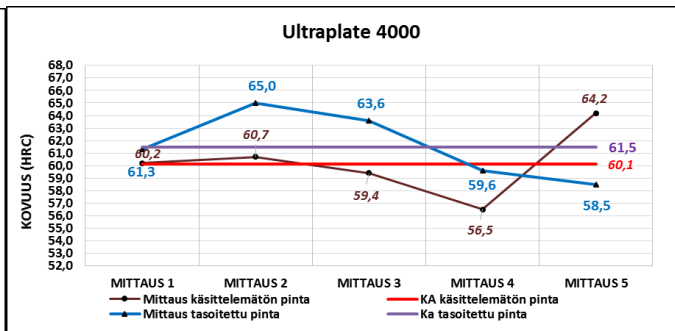
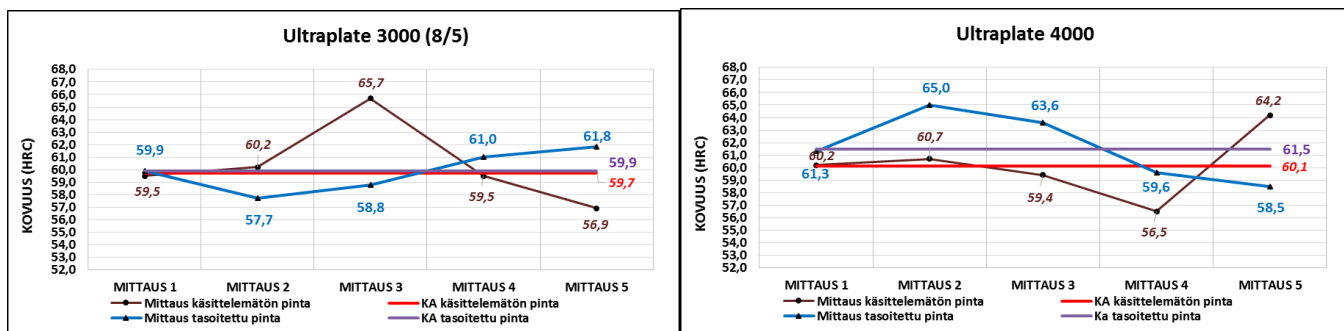
TASOITETUN PINNAN KOVUUS

Tuote	MITTAUS 1	MITTAUS 2	MITTAUS 3	MITTAUS 4	MITTAUS 5	MITATTU KESKIMÄÄRÄINEN KOVUUS (± 1,5)	VALMISTAJAN ILMOITAMA KESKIMÄÄRÄINEN KOVUUS	PIENIMMÄN JA SUURIMMAN MITTAUSTULOKSEN ERO
Coroplate 143	61,6	62,7	62,7	61	62,5	62,3	60-62	1,7
Hardox 400	33,1	34,8	33,5	32,4	32,4	33,0	42	2,4
Impoweld-W 100	64,5	62,1	59	59,5	60,5	60,7	60	5,5
SKM Ceramic 1	EI MITATTU					ei mitattu	ei ilmoitettu	ei mitattu
Ultraplate 2000	63,2	59,2	57,7	60,9	62,4	60,8	58-60	5,5
Ultraplate 3000 (6/4)	57	59	61,2	55,4	59,2	58,4	57-60	5,8
Ultraplate 3000 (8/5)	59,9	57,7	58,8	61	61,8	59,9	57-60	3,3
Ultraplate 4000	61,3	65	63,6	59,6	58,5	61,5	60-62	6,5
Vautid 100	57	60,9	58,1	58,3	64,2	59,1	60	7,2
KESKIARVO (pans.levyt)						60,4		5,1

HRC mittaus (käsittelemätön pinta)







LIITE 2: VICKERSIN KOVUUSKOKEEN MITTAUSPÖYTÄKIRJA

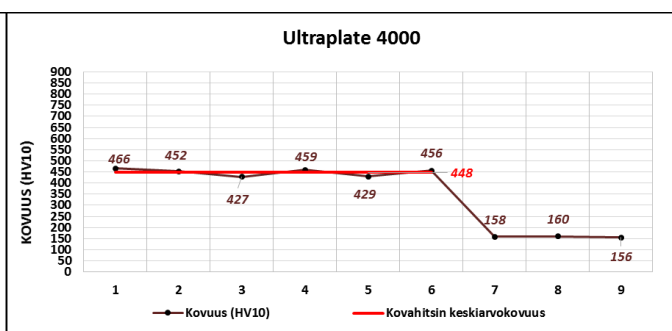
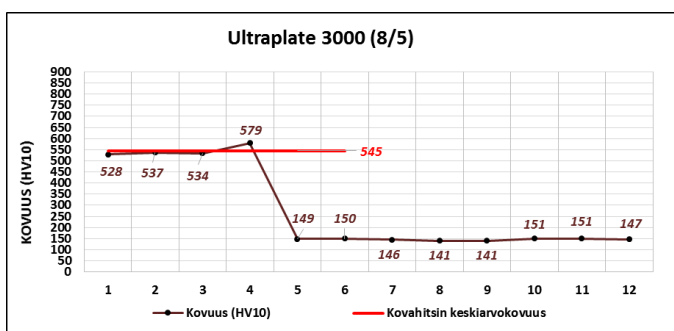
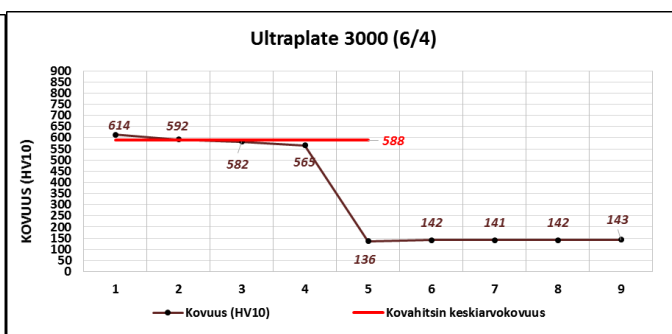
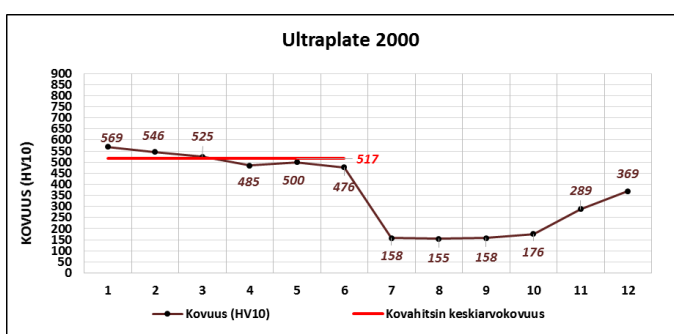
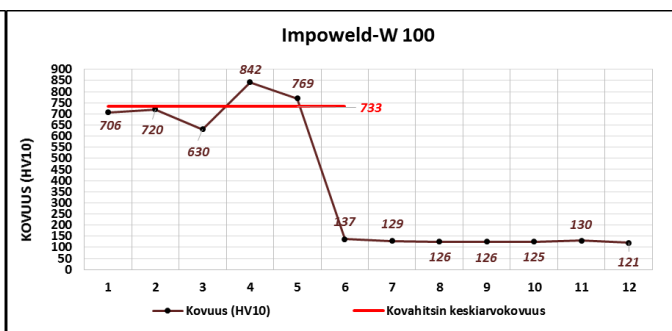
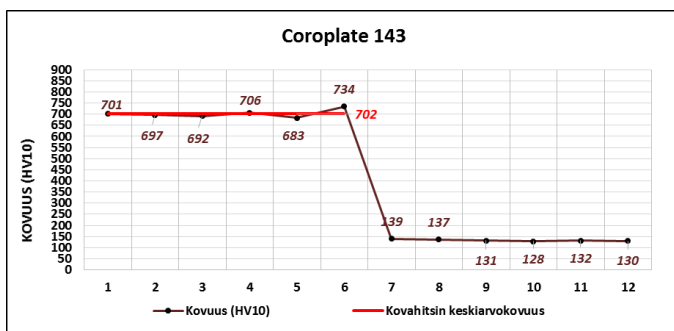
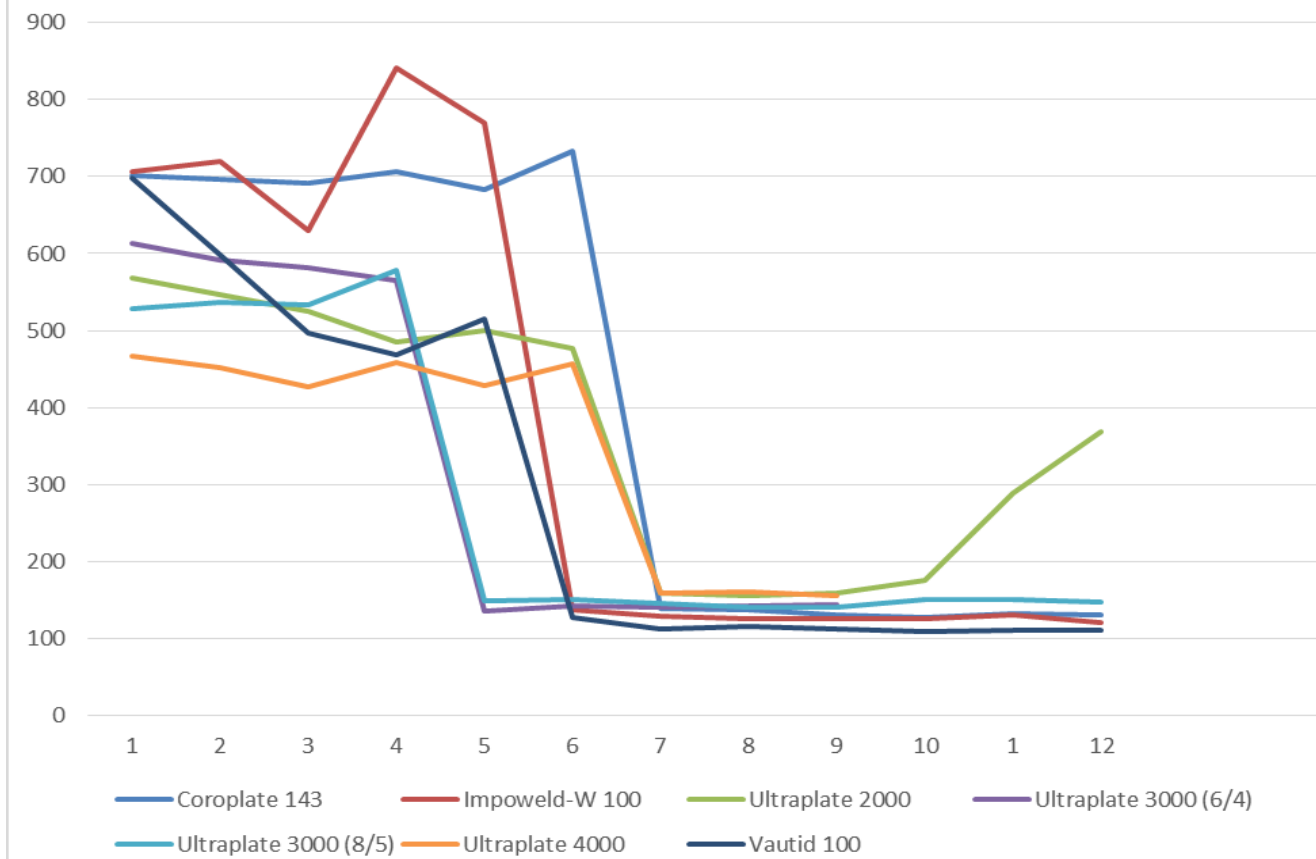
MITTAUSPÖYTÄKIRJA

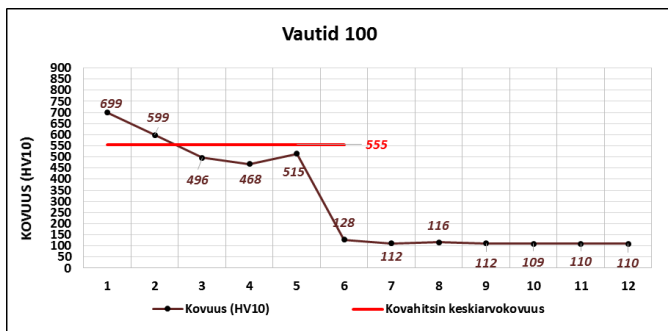
Kovuus

Mittauspäivämäärä:	8.4.2016
Mittauksen suorittaja:	Petri Viitala
Mittausmenetelmä:	Vickers HV10
Standardi:	ISO 6507-1
Mittauslaite:	DuraScan-20
Mittauslaitteen epävarmuus	Noin ± 7 HV10

Mittauspiste pinnasta (mm)	Coroplate 143	Impoweld- W 100	Ultraplate 2000	Ultraplate 3000 (6/4)	Ultraplate 3000 (8/5)	Ultraplate 4000	Vautid 100	
1	701	706	569	614	528	466	699	
2	697	720	546	592	537	452	599	
3	692	630	525	582	534	427	496	
4	706	842	485	565	579	459	468	
5	683	769	500	136	149	429	515	
6	734	137	476	142	150	456	128	
7	139	129	158	141	146	158	112	
8	137	126	155	142	141	160	116	
9	131	126	158	143	141	156	112	
10	128	125	176		151		109	
1	132	130	289		151		110	
12	130	121	369		147		110	
	Coroplate 143	Impoweld- W 100	Ultraplate 2000	Ultraplate 3000 (6/4)	Ultraplate 3000 (8/5)	Ultraplate 4000	Vautid 100	KA kaikki
Kovahitsin keskiarvokovuus	702	733	517	588	545	448	555	584
Perusmateriaalin keskiarvokovuus	133	128	218	141	147	158	114	148
Koko tuotteen keskiarvokovuus	418	380	367	340	280	351	298	348
Kovahitsin suurimman ja pienimmän arvon erotus	51	212	93	49	51	39	231	104
Perusmateriaalin suurimman ja pienimmän arvon erotus	11	16	214	7	10	4	19	40
Koko tuotteen suurimman ja pienimmän arvon erotus	606	721	414	478	438	310	590	508

Yhteenveto ja vertailu





LIITE 3: EDS-ANALYYSIRAPORTTI (SEM)

25. Huhtikuuta 2016


 SIBabs
SCIENCE - INNOVATION - BUSINESS

EDS-ANALYYSIRAPORTTI

MaTKI-hankkeen “Panssarilevyt”

Mittaukset 21.4.2016 ja
 analyysit:
 Jari Leskinen, FT
 Itä-Suomen Yliopisto

SIB Labs



Yliopistonranta 1E
 70211 Kuopio
 p. +358-50-308 99 45 Email:
jari.leskinen@uef.fi

YHTEENVETO

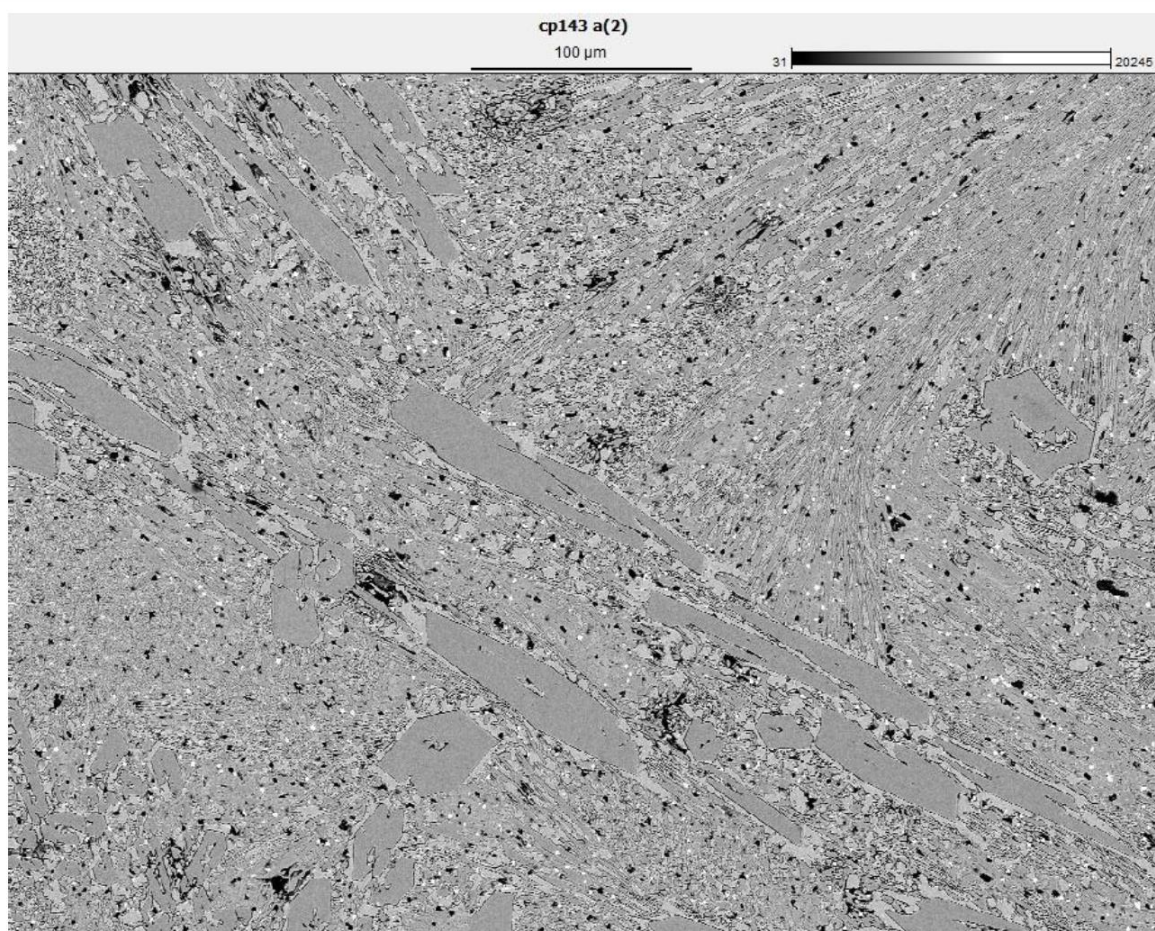
Raportissa on esitetty Zeiss SigmaHD|VP FEG-SEM pyyhkäisyelektronimikroskooppikuvia ja kvantitatiiviset alkuaineanalyysitulokset ammattikorkeakoulu Savonian hitsatuista panssarilevynäytteistä. Analysoitavia näytekappaleita oli 7. Näytteistä kuvattiin hitsi ja sen alkuainekartta sekä kvantitoitiin pitoisuudet. Asiakas (Petri Viitala) toi kappaleet valmiiksi esikäsiteltynä ja testaukset tehtiin Itä-Suomen Yliopiston SIB Labsissa Kuopiossa 21. huhtikuuta 2016. Läsä oli myös metallurgian asiantuntija materiaalitekniikan lehtori Mika Mäkinen.

Tuloksissa on esitetty kullekin näytteelle 1) mittausalue (suurennos 200x) 2) alkuainepitoisuudet ja 3) merkittäviempien alkuaineiden karttana. Yksi näyte (up3000) on tutkittu kahdesta kohtaa.

Huomattavaa on, että hiili (C) on jätetty tuloksista EDS-tekniikan kevyimpien alkuaineiden mittauseräpätarkkuuden takia. Tämän katsottiin parantavan metallien kvantitoinnin luotettavuutta. Vaikka tuloksissa on ilmoitettu pieniäkin pitoisuuksia, on kyseisen tekniikan määrittystarkkuus 0.1 paino-%, joten tuloksissa voi olla eksoottisia aineita. Tämän vuoksi kehoitetaan kriittisyyteen aivan pienimpiä pitoisuuksia tarkasteltaessa.

Kuopio 25.4.2016

Jari Leskinen, PhD



Mon Apr 25 17:05:09 2016

Filter Fit χ^2 value: 477.473 Errors: ± 1 Sigma

Correction Method: Proza (Phi-Rho-Z)

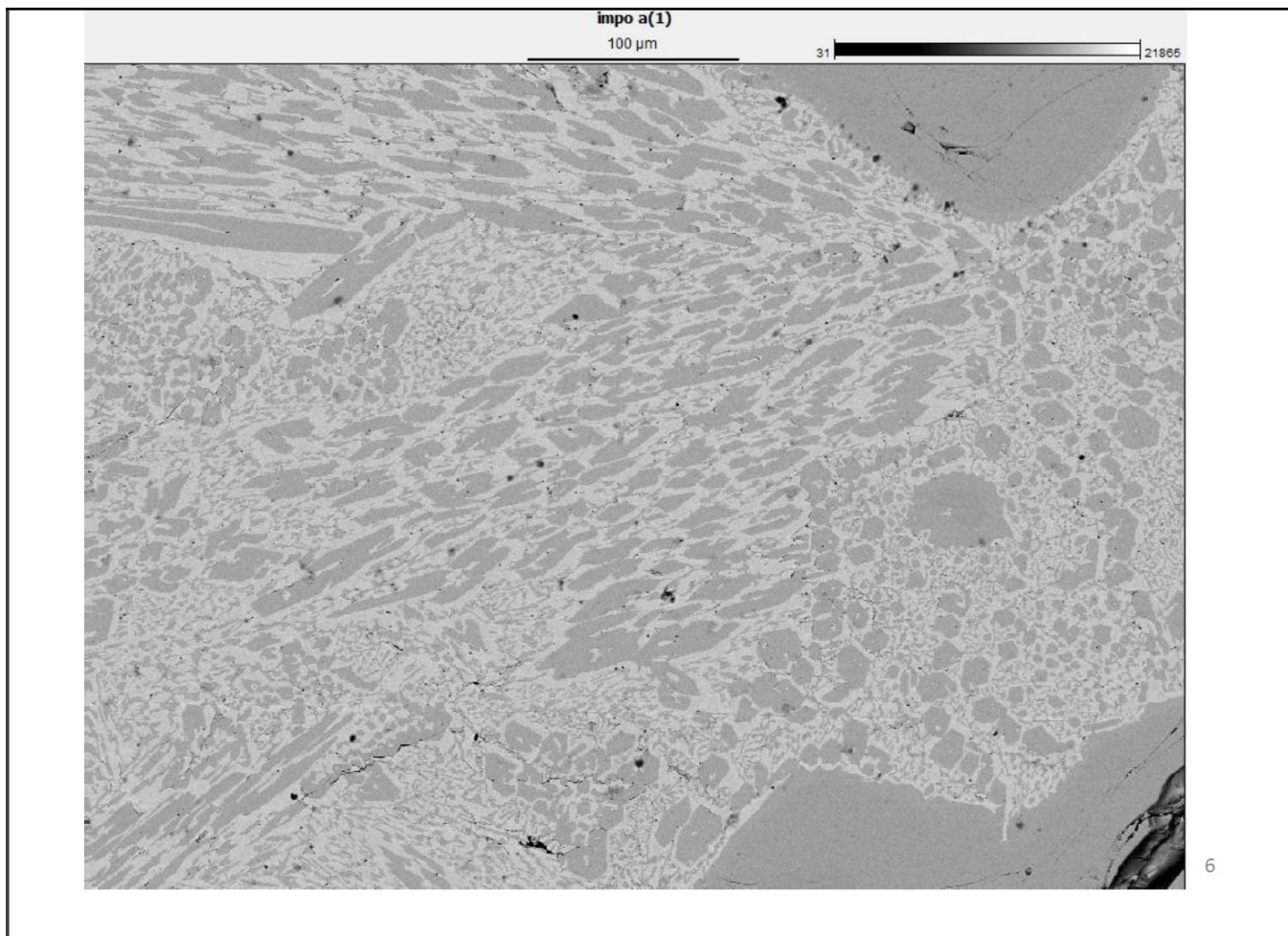
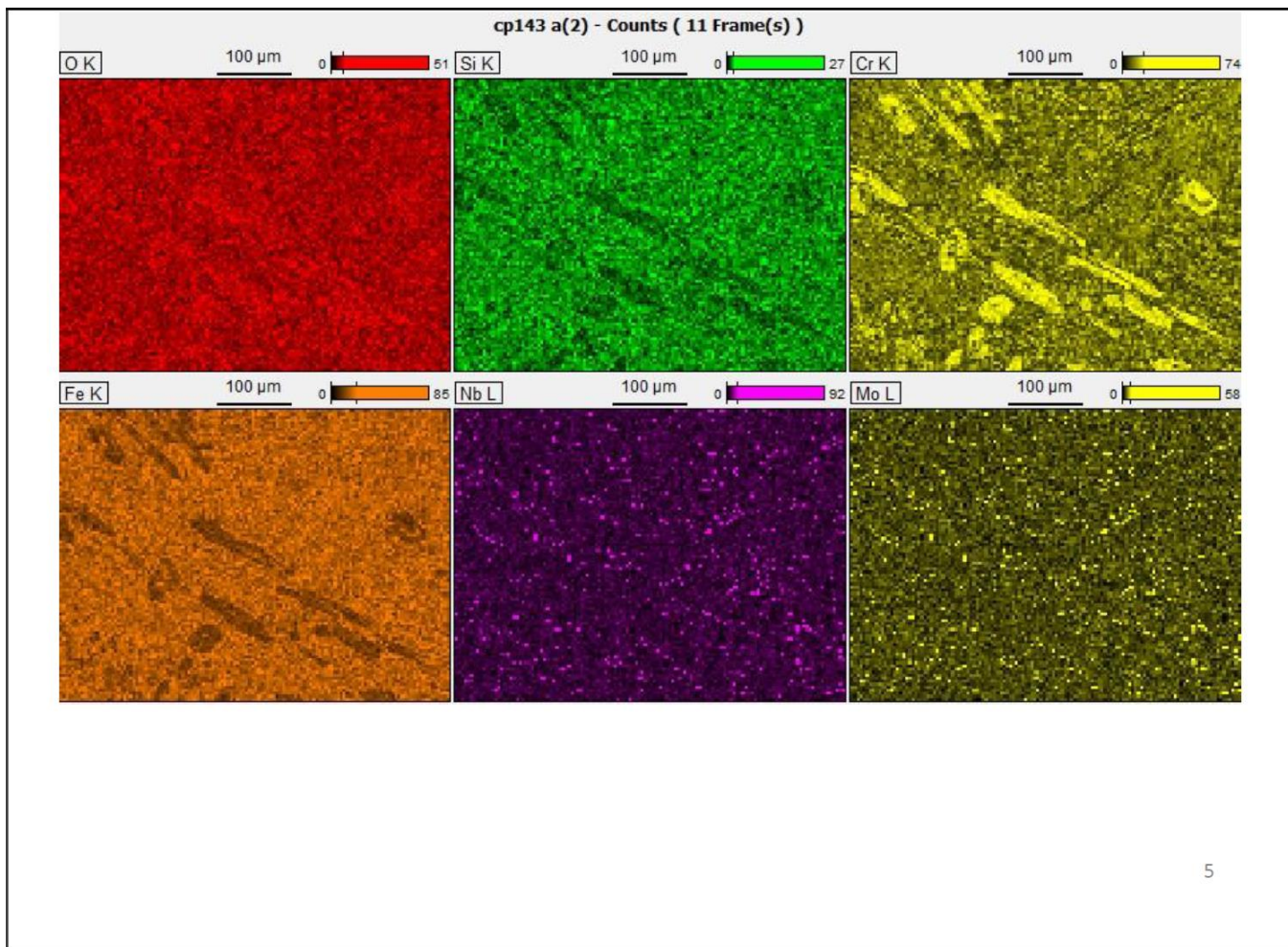
Acc.Voltage: 15.0 kV

Take Off Angle:

36.7°

Element	Net	Element	Wt.%
Line	Counts	Wt.%	Error
O K	149590	5.4	± 0.0
Al K	2084	0.1	± 0.0
Si K	59034	1.6	± 0.0
V K	638	0.0	± 0.0
Cr K	381042	24.2	± 0.1
Fe K	637619	67.6	± 0.2
Nb L	26862	1.0	± 0.0
Mo L	3629	0.1	± 0.0

Total		100.0	



Mon Apr 25 17:22:28 2016

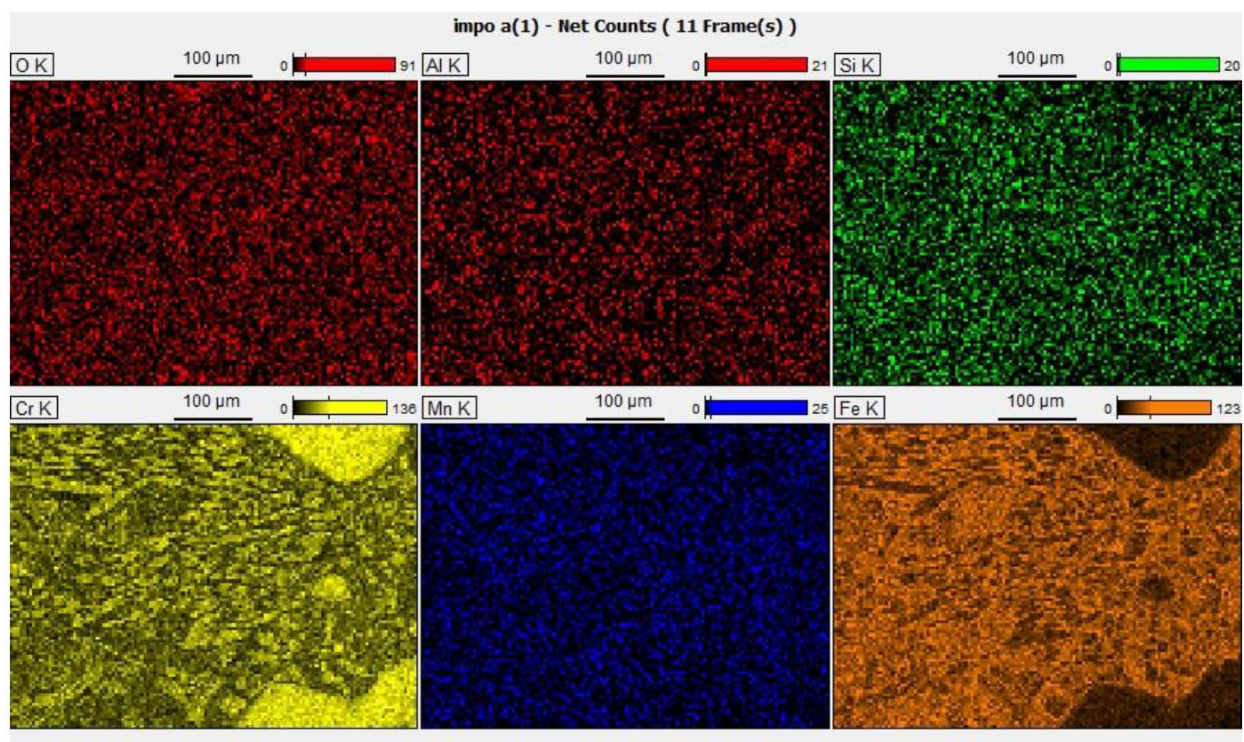
Filter Fit χ^2 value: 962.165 Errors: ± 1 Sigma

Correction Method: Proza (Phi-Rho-Z)

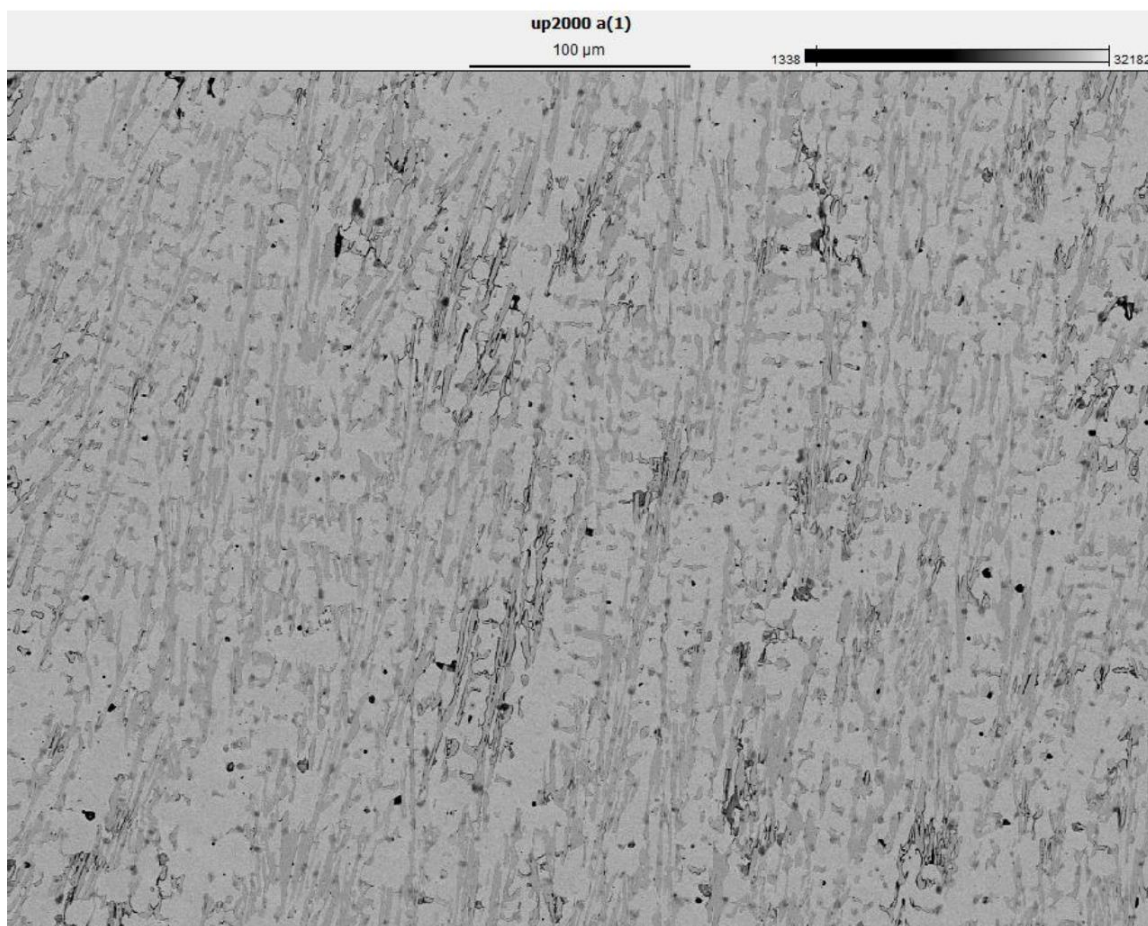
Acc.Voltage: 15.0 kV Take Off Angle:
36.6°

Element	Net	Element	Wt.%
Line	Counts	Wt.%	Error
O K	70997	2.4	± 0.1
Al K	1953	0.1	± 0.0
Si K	12721	0.3	± 0.0
Cr K	566978	37.3	± 0.1
Mn K	26715	2.4	± 0.0
Fe K	531463	57.4	± 0.2
Total		100.0	

7



8



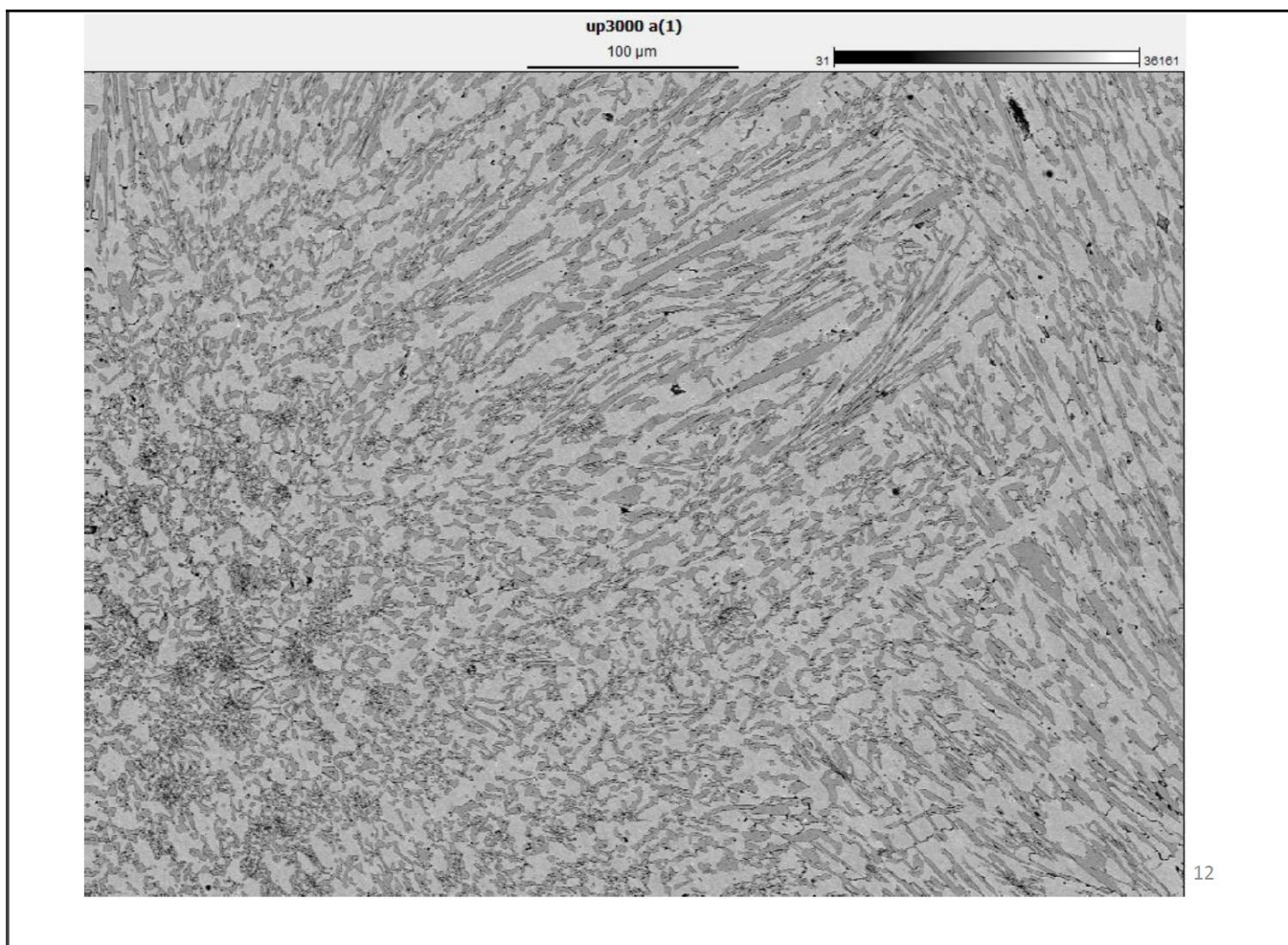
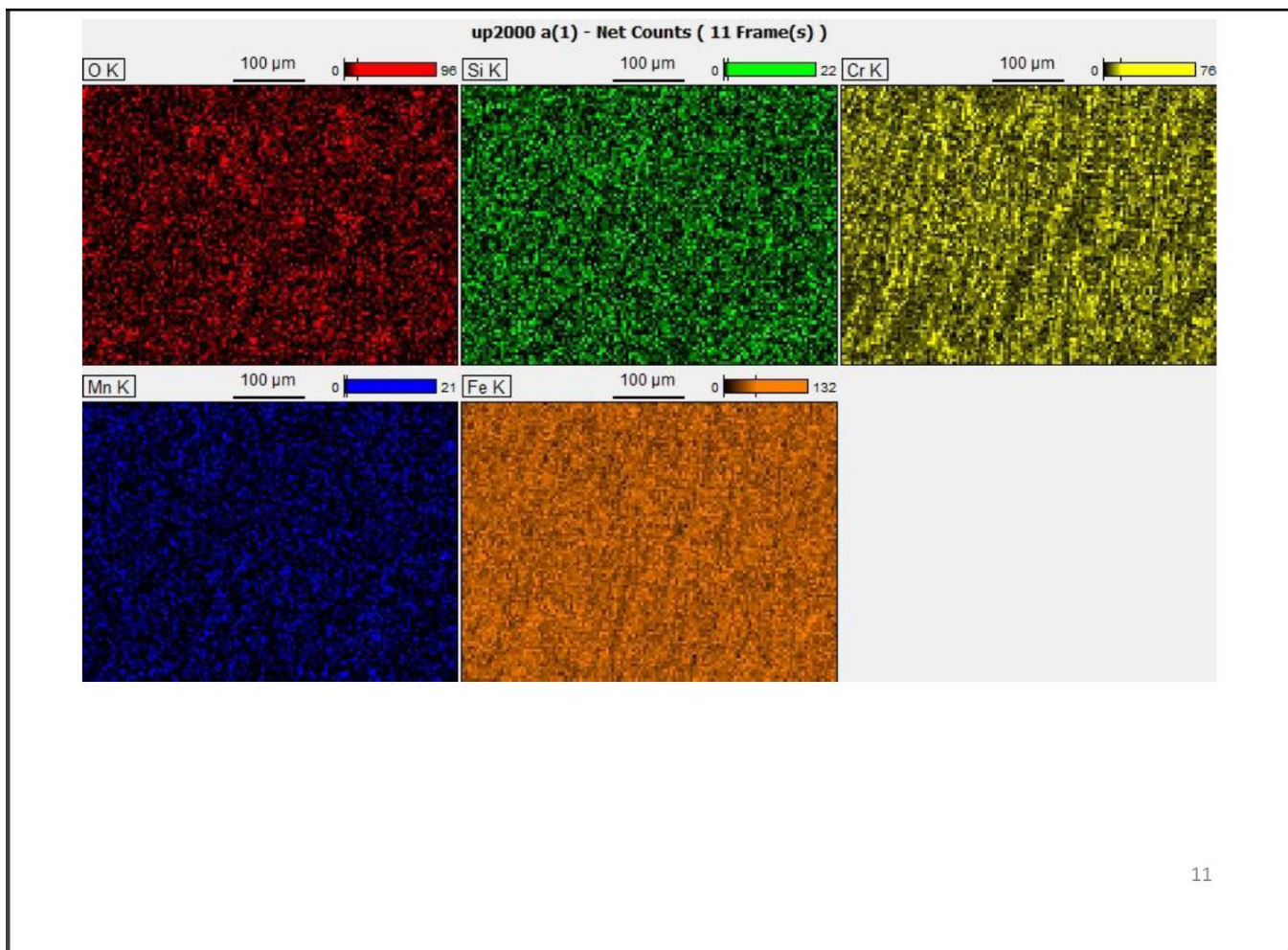
Mon Apr 25 17:30:28 2016

Filter Fit χ^2 value: 652.351 Errors: ± 1 Sigma

Correction Method: Proza (Phi-Rho-Z)

Acc.Voltage: 15.0 kV Take Off Angle:
37.1°

Element	Net	Element	Wt.%
Line	Counts	Wt.%	Error
O K	117004	4.2	± 0.0
Si K	40813	1.2	± 0.0
Cr K	252197	15.9	± 0.1
Mn K	18988	1.8	± 0.0
Fe K	712206	76.9	± 0.2
Total		100.0	



Mon Apr 25 17:41:59 2016

Filter Fit χ^2 value: 851.351 Errors: ± 1 Sigma

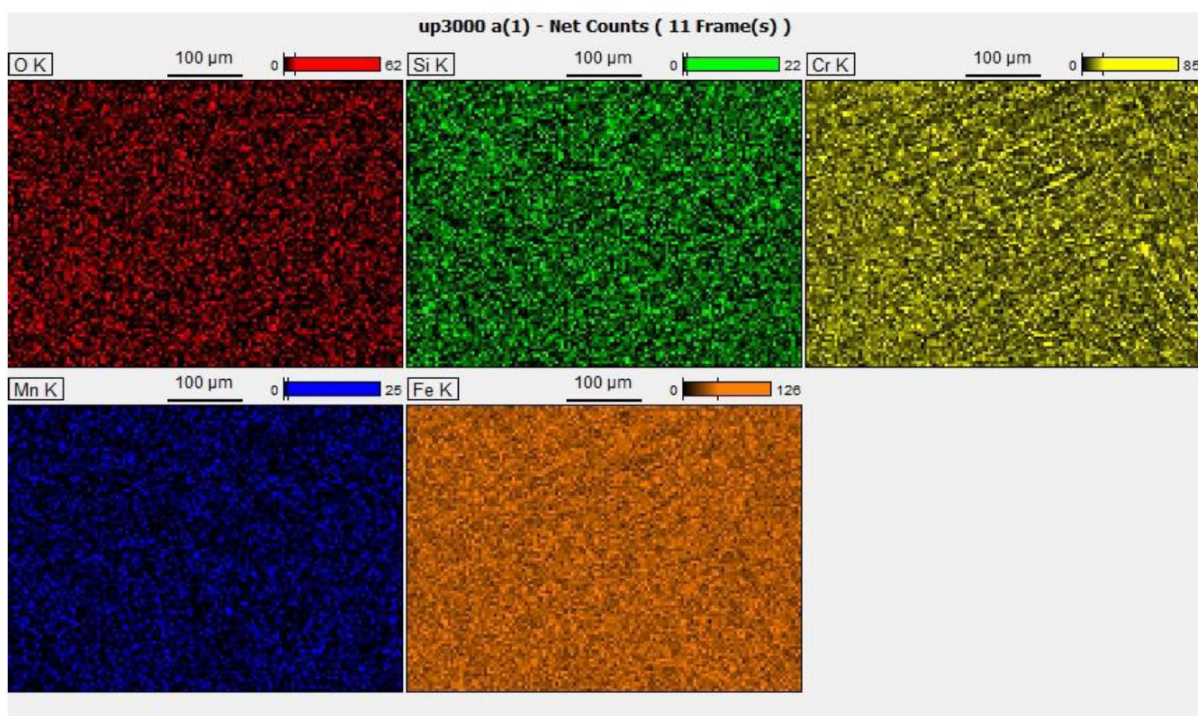
Correction Method: Proza (Phi-Rho-Z)

Acc.Voltage: 15.0 kV Take Off Angle:
35.7°

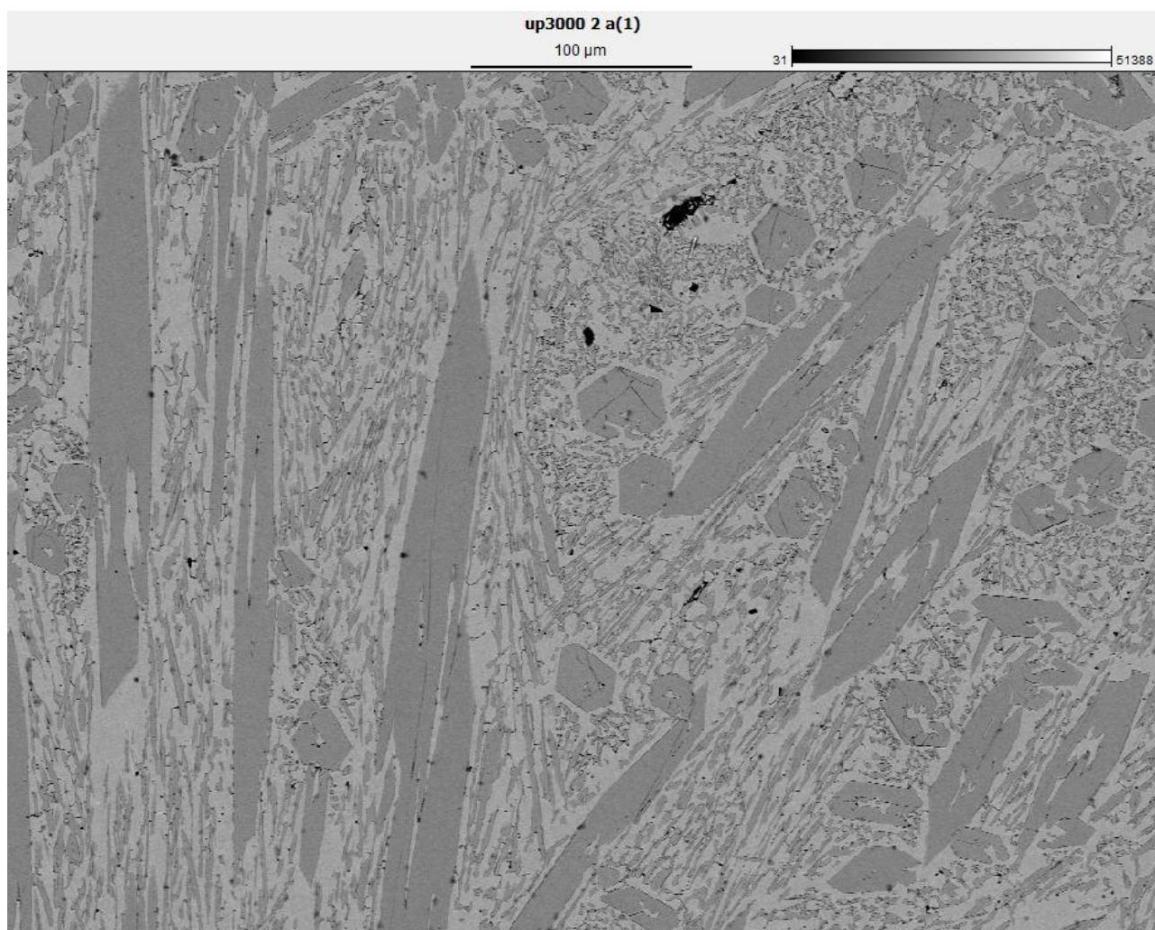
Element	Net	Element	Wt.%	
Line	Counts	Wt.%	Error	
O K	117717	4.1	± 0.0	
Si K	48558	1.3	± 0.0	
Cr K	301909	18.1	± 0.1	
Mn K	26757	2.3	± 0.1	
Fe K	729054	74.1	± 0.2	

Total		100.0		

13



14



Mon Apr 25 17:52:10 2016

Filter Fit χ^2 value: 894.110 Errors: ± 1 Sigma

Correction Method: Proza (Phi-Rho-Z)

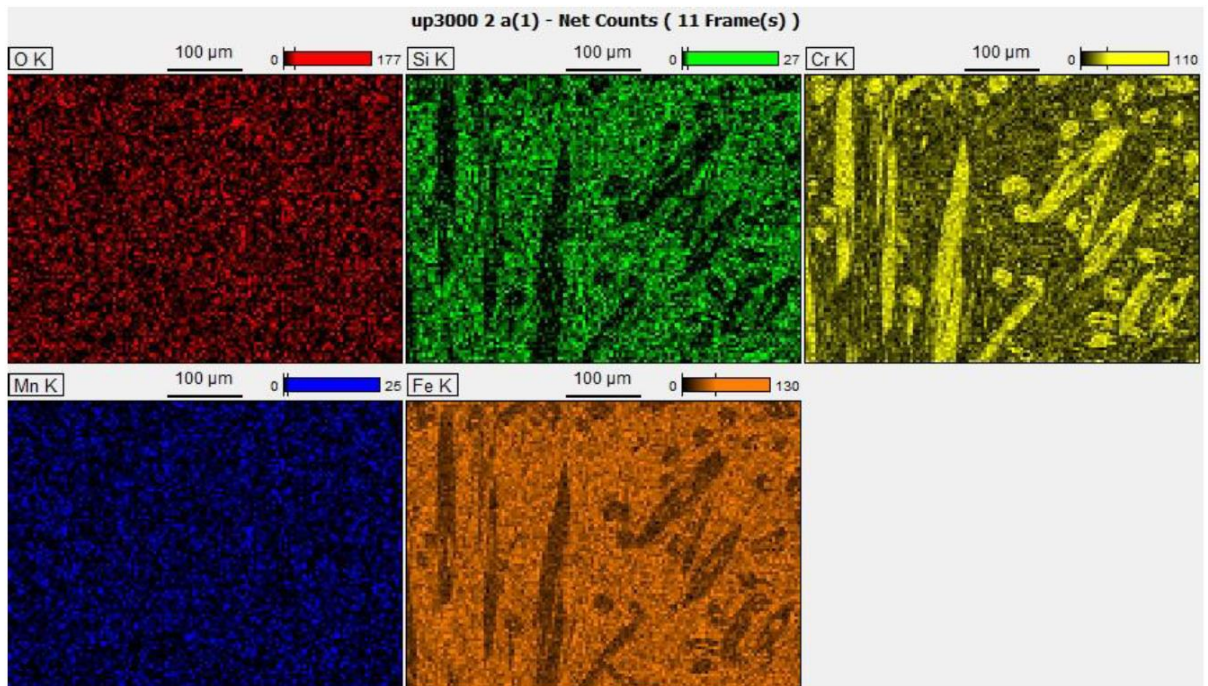
Acc.Voltage: 15.0 kV

Take Off Angle:

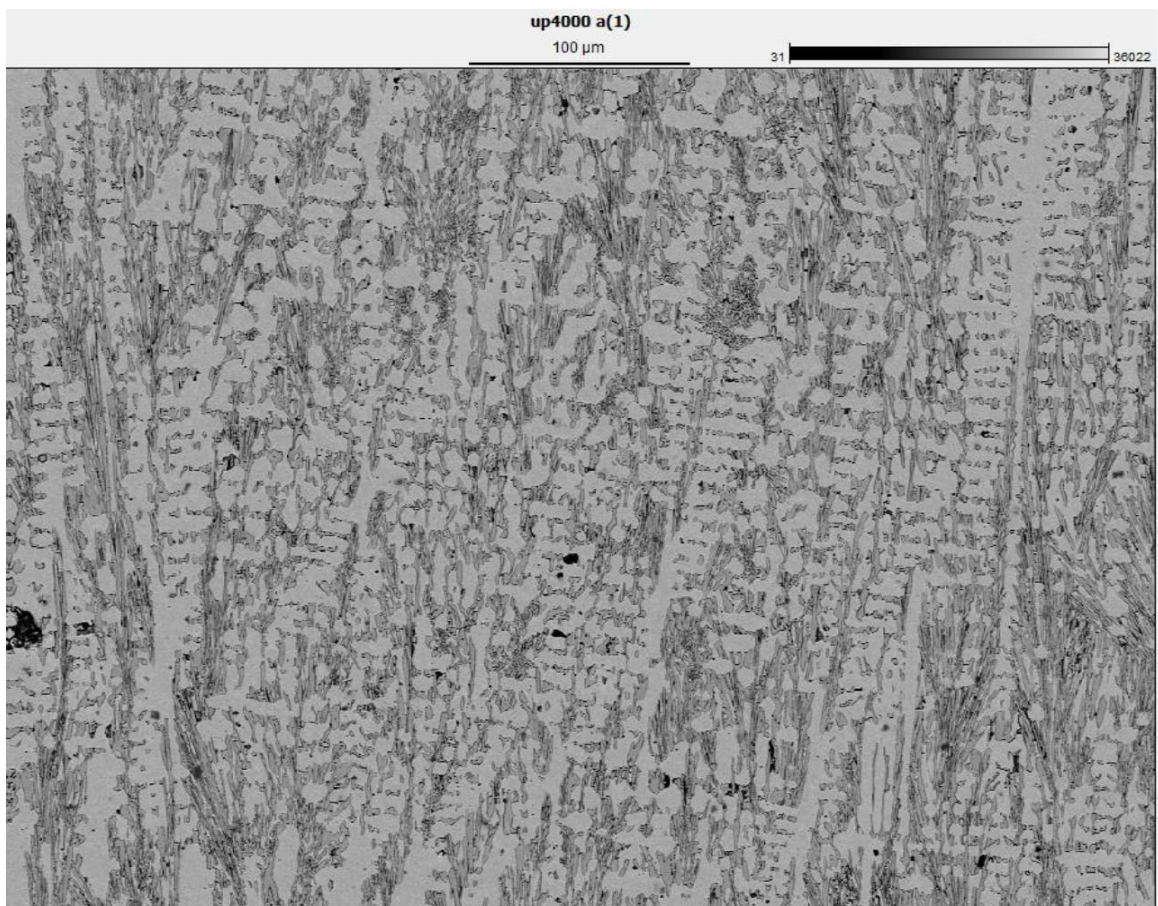
36.1°

Element	Net	Element	Wt.%
Line	Counts	Wt.%	Error
O K	24645	0.9	± 0.1
Si K	60029	1.7	± 0.0
Cr K	413779	26.9	± 0.1
Mn K	28348	2.6	± 0.1
Fe K	627898	67.9	± 0.2

Total		100.0	



17



18

Mon Apr 25 18:02:14 2016

Filter Fit χ^2 value: 618.390 Errors: ± 1 Sigma

Correction Method: Proza (Phi-Rho-Z)

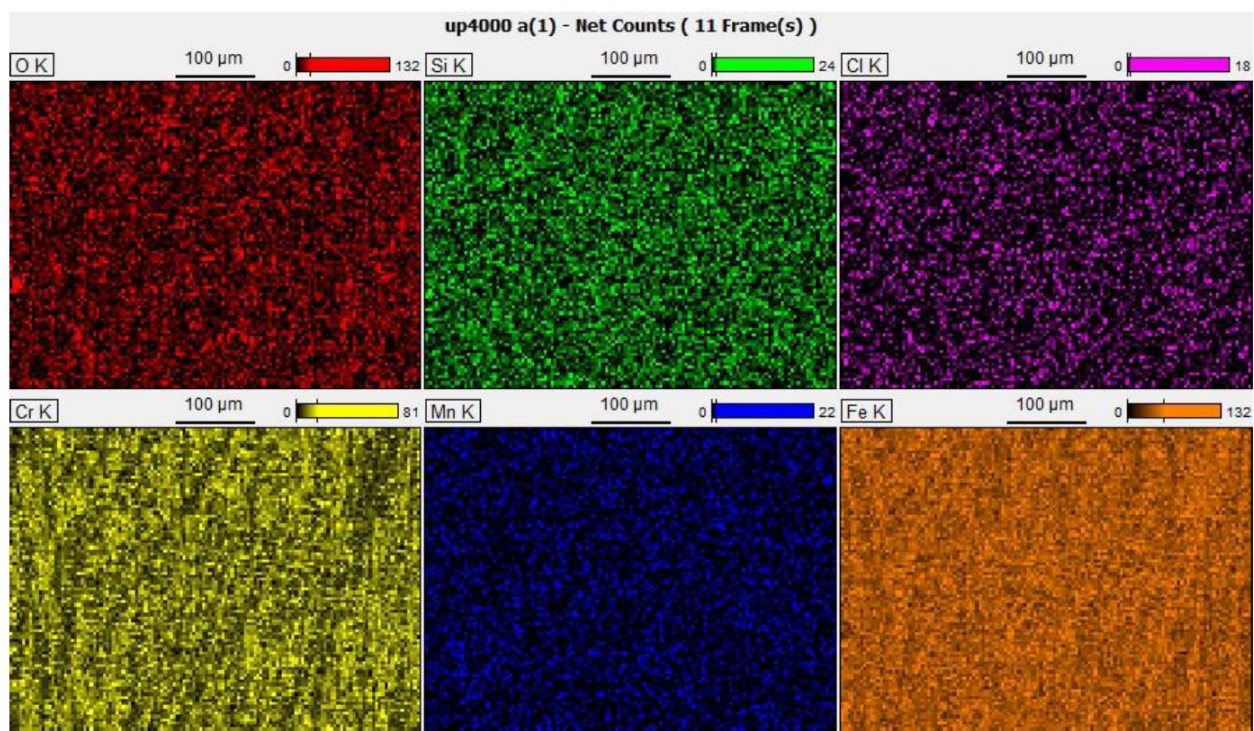
Acc.Voltage: 15.0 kV Take Off Angle:

36.7°

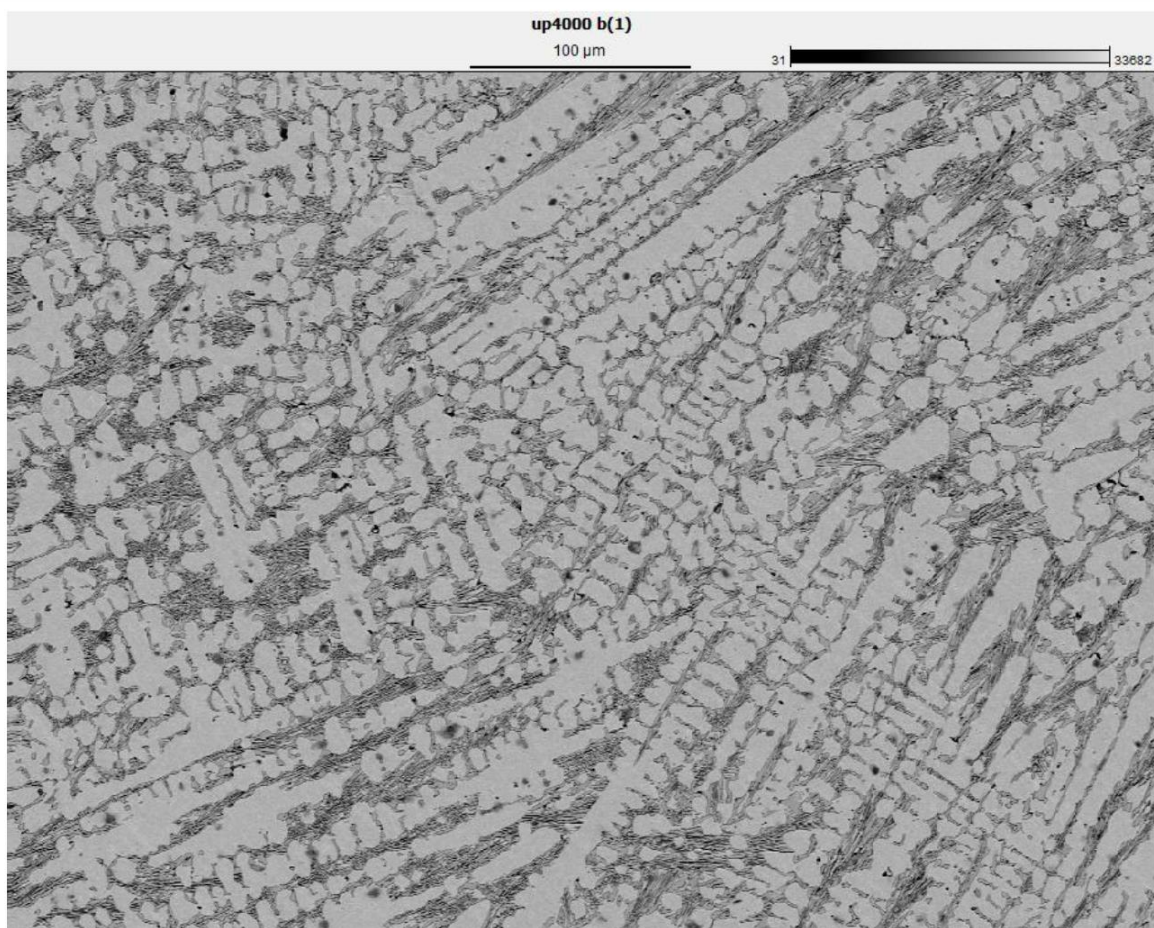
Element	Net	Element	Wt.%
Line	Counts	Wt.%	Error
O K	141757	4.9	± 0.0
Si K	36534	1.0	± 0.0
Cl K	1996	0.1	± 0.0
Cr K	295575	18.2	± 0.1
Mn K	21121	1.9	± 0.0
Fe K	708557	73.9	± 0.2

Total		100.0	

19



20



Mon Apr 25 17:58:34 2016

Filter Fit χ^2 value: 568.895 Errors: ± 1 Sigma Correction

Method: Proza (Phi-Rho-Z)

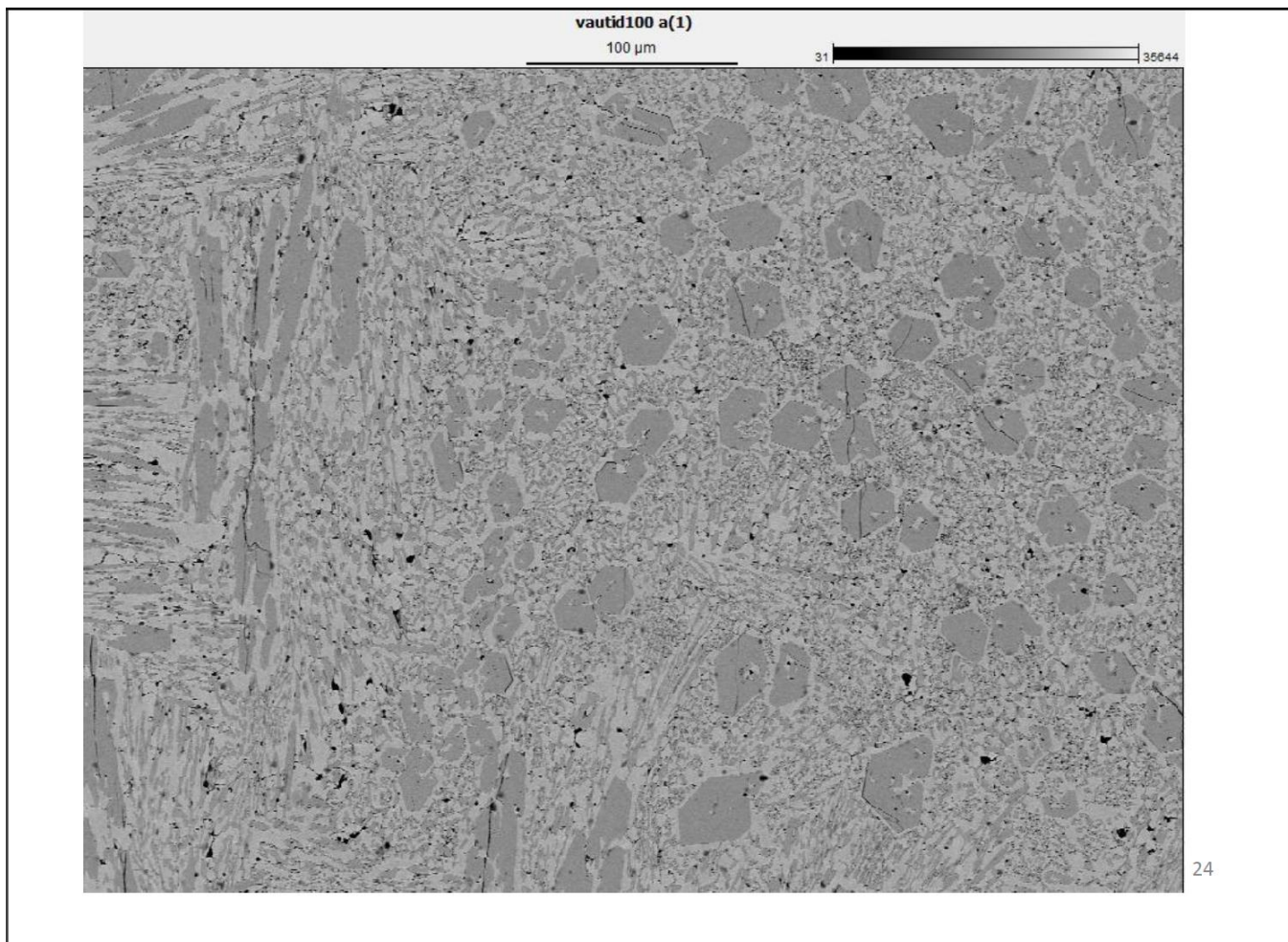
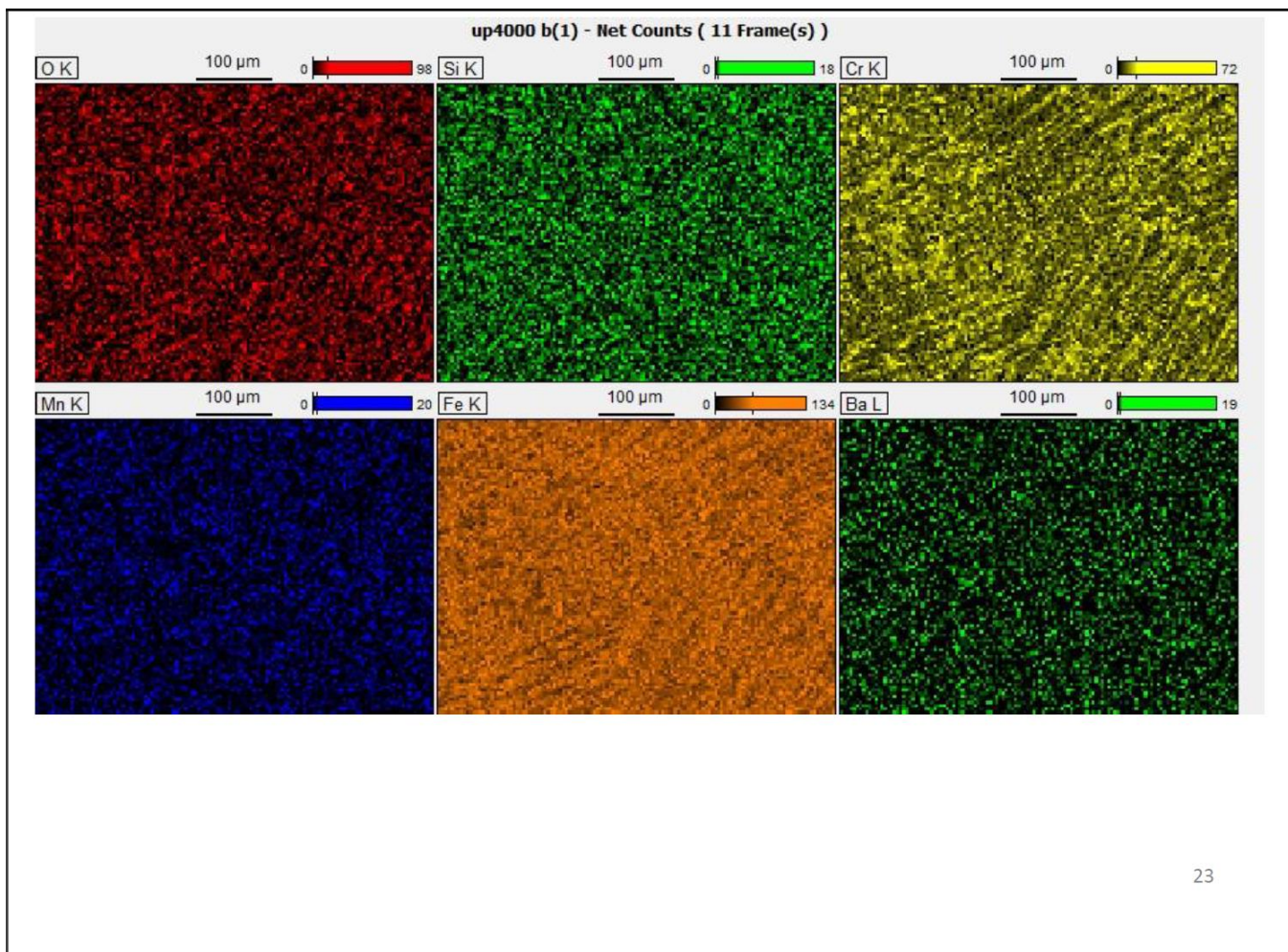
Acc.Voltage: 15.0 kV

Take Off Angle:

36.8°

Element	Net	Element	Wt.%
Line	Counts	Wt.%	Error
O K	134133	4.7	± 0.0
Si K	29997	0.8	± 0.0
Cr K	256376	15.7	± 0.1
Mn K	17189	1.5	± 0.1
Fe K	734565	77.1	± 0.2
Ba L	845	0.1	± 0.0

Total		100.0	



Mon Apr 25 18:11:48 2016

Filter Fit χ^2 value: 734.973 Errors: ± 1 Sigma

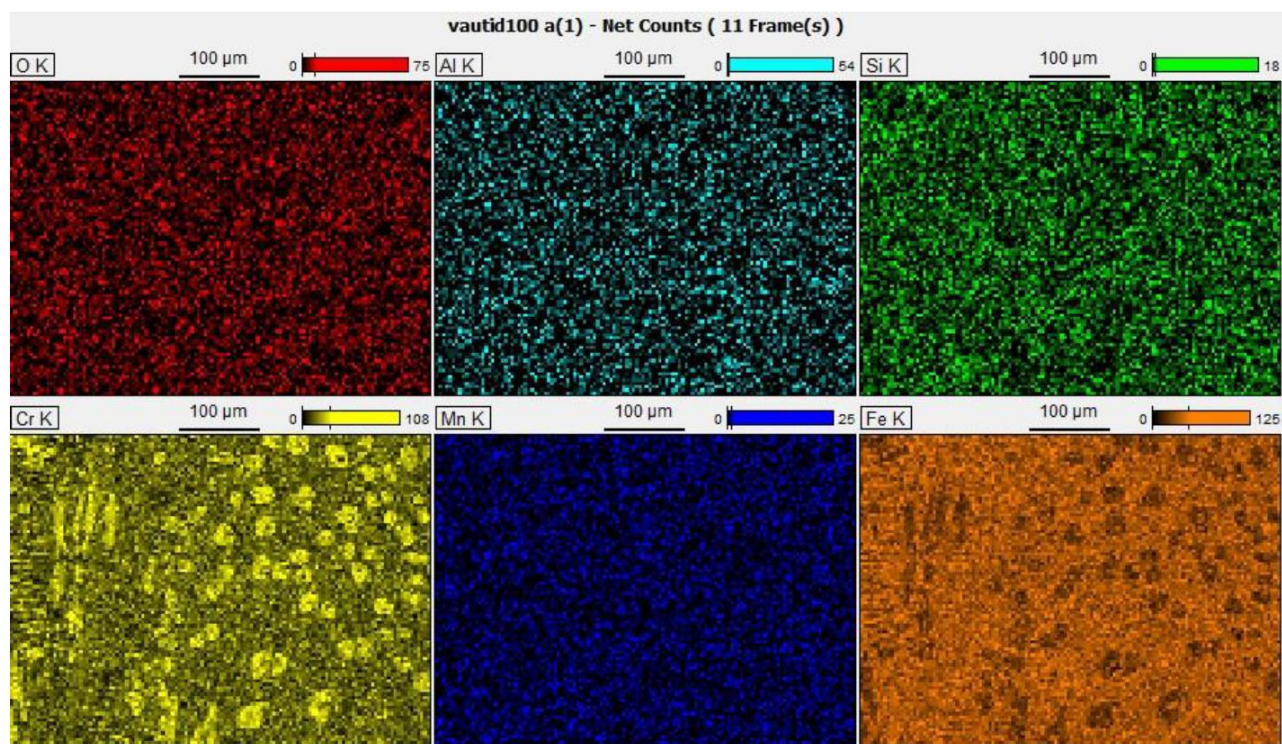
Correction Method: Proza (Phi-Rho-Z)

Acc.Voltage: 15.0 kV Take Off Angle:
35.9°

Element	Net	Element	Wt.%
Line	Counts	Wt.%	Error
O K	29692	1.1	± 0.1
Al K	1869	0.1	± 0.0
Si K	28128	0.8	± 0.0
Cr K	411452	26.3	± 0.1
Mn K	31170	2.8	± 0.1
Fe K	646484	69.0	± 0.2

Total		100.0	

25



26

LIITE 4: KUMIPYÖRÄABRAASIOKOKOEN MITTAUSPÖYTÄKIRJA

Mittauspöytäkirja Kumipyöräabraasiokoe											
Standardi:	ASTM G-65										
Päivämäärä:	26.4.2016										
Tutkija:	Petri Viitala										
Hiekan raekoko:	0,6 - 1,0										
Hiekan kulutus:	n. 20 g /min / koepaikka										
Kuljettu kulutusmatka:	6430 m										
Tuote	Alkupaino (g)	Alkutilavuus (mm ³)	Paino 1 (g)	Paino 2 (g)	Paino 3 (g)	Paino 4 (g)	Loppupaino (g)	Lopputilavuus (mm ³)	Kuluminen (mm/h)	Kuluminen KA (mm/h)	
Coroplate 143 (1)	100,10	12833,33	99,93	99,87	99,84	99,81	99,78	12792,31	0,04		
Coroplate 143 (2)	100,83	12926,92	100,69	100,54	100,49	100,45	100,40	12871,79	0,06	0,05	
Impoweld-W 100 (1)	99,27	12726,92	99,02	98,92	98,85	98,77	98,71	12655,13	0,07		
Impoweld-W 100 (2)	95,56	12251,28	95,36	95,27	95,12	95,04	94,95	12173,08	0,08	0,08	
Ultraplate 2000 (1)	102,97	13201,28	102,57	102,40	102,30	102,22	102,16	13097,44	0,10		
Ultraplate 2000 (2)	106,46	13648,72	106,17	106,07	105,99	105,78	105,68	13548,72	0,10	0,10	
Ultraplate 3000 (6/4) (1)	72,77	9329,49	72,60	72,54	72,47	72,37	72,33	9273,08	0,06		
Ultraplate 3000 (6/4) (2)	78,38	10048,72	78,09	77,94	77,87	77,80	77,78	9971,79	0,08	0,07	
Ultraplate 3000 (8/5) (1)	97,39	12485,90	97,02	96,86	96,77	96,71	96,65	12391,03	0,09		
Ultraplate 3000 (8/5) (2)	105,10	13474,36	104,85	104,75	104,67	104,61	104,56	13405,13	0,07	0,08	
Ultraplate 4000 (1)	73,74	9453,85	73,33	73,10	72,80	72,62	72,19	9255,13	0,20		
Ultraplate 4000 (2)	80,81	10360,26	80,42	80,25	80,17	80,06	79,93	10247,44	0,11	0,16	
Vautid 100 (1)	97,61	12514,10	97,23	97,02	96,91	96,75	96,63	12388,46	0,13		
Vautid 100 (2)	97,07	12444,87	96,64	96,52	96,35	96,27	96,05	12314,10	0,13	0,13	
SKM Ceramic 1	35,26	4520,51	35,24	35,22	35,19	35,16	35,15	4506,41	0,01	0,01	
Hardox 400	95,37	12226,92	94,55	94,15	93,32	93,00	92,53	11862,82	0,36	0,36	
s235	82,25	10544,87	81,33	80,69	80,22	79,72	79,07	10137,18	0,41	0,41	
KEKIARVOT										0,09	
Tuote (koekappaleen järjestysnumero suluissa)	Kuluminen (painohäviö) (g)							Keskiarvo (g)	Mittausero koepalojen välillä (g)	Tilavuushäviö (mm ³)	Keskiarvo (mm ³)
	0 min	12 min	24 min	36 min	48 min	60 min					
Coroplate 143 (1)	0,00	0,17	0,23	0,26	0,29	0,32	0,37	0,11	41,03	48,08	
Coroplate 143 (2)	0,00	0,14	0,29	0,34	0,38	0,43			55,13		
Impoweld-W 100 (1)	0,00	0,25	0,35	0,42	0,50	0,56	0,59	0,05	71,79	75,00	
Impoweld-W 100 (2)	0,00	0,20	0,29	0,44	0,52	0,61			78,21		
Ultraplate 2000 (1)	0,00	0,40	0,57	0,67	0,75	0,81	0,79	0,03	103,85	101,92	
Ultraplate 2000 (2)	0,00	0,29	0,39	0,47	0,68	0,78			100,00		
Ultraplate 3000 (6/4) (1)	0,00	0,17	0,23	0,30	0,40	0,44	0,52	0,16	56,41	66,67	
Ultraplate 3000 (6/4) (2)	0,00	0,29	0,44	0,51	0,58	0,60			76,92		
Ultraplate 3000 (8/5) (1)	0,00	0,37	0,53	0,62	0,68	0,74	0,64	0,20	94,87	82,05	
Ultraplate 3000 (8/5) (2)	0,00	0,25	0,35	0,43	0,49	0,54			69,23		
Ultraplate 4000 (1)	0,00	0,41	0,64	0,94	1,12	1,55	1,22	0,67	198,72	155,77	
Ultraplate 4000 (2)	0,00	0,39	0,56	0,64	0,75	0,88			112,82		
Vautid 100 (1)	0,00	0,38	0,59	0,70	0,86	0,98	1,00	0,04	125,64	128,21	
Vautid 100 (2)	0,00	0,43	0,55	0,72	0,80	1,02			130,77		
SKM Ceramic 1	0,00	0,02	0,04	0,07	0,10	0,11	0,11	0,00	14,10	14,10	
Hardox 400	0,00	0,82	1,22	2,05	2,37	2,84	2,84	0,00	364,10	364,10	
s235	0,00	0,92	1,56	2,03	2,53	3,18	3,18	0,00	407,69	407,69	
KESKIARVOT (panssarilevyt)		0,30					0,73	0,18			

Painohäviö (g)

