



SAVONIA



OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

LISÄÄVÄLLÄ VALMISTUKSELLA RUOSTUMATTOMASTA TERÄKSESTÄ VALMISTETTUJEN KAPPALEIDEN PINNOITTAMINEN

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä(t) Jussi Ritvanen	
Työn nimi Lisäävällä valmistuksella ruostumattomasta teräksestä valmistettujen kappaleiden pinnoittaminen	
Päiväys 26.03.2015	Sivumäärä/Liitteet 35
Ohjaaja(t) Lehtori Eeva Jauhiainen, Lehtori Mika Mäkinen, diplomi-insinööri Pekka Nuutinen	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Savonia-ammattikorkeakoulu	
Tiivistelmä <p>Tässä opinnäytetyössä tutkitaan metallia lisäävän valmistuksen menetelmällä (Additive Manufacturing, LAM) valmistettujen ruostumattoman haponkestävän teräskappaleiden pinnoittamista. Kappaleet pinnoitettiin kemiallisella nikkelillä sekä kromilla. Kappaleille koneistettiin samasta materiaalista vastaavan kokoiset kappaleet, jotka pinnoitettiin samalla tavalla. LAM-kappaleet valmistettiin Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa ja kaikki kokeet suoritettiin Savonia-ammattikorkeakoululla.</p> <p>Teoriaosuudessa käsitellään metallia lisäävää valmistusta, kemiallista ja elektrolyyttistä pinnoitusta sekä korroosiota. Teoriaosuudessa on myös käsitelty tässä työssä käytetty pinnoitusprosessi sekä kaikki suoritettavat kokeet.</p> <p>Pinnoittamisen jälkeen kappaleista tehtiin poikkileikkeet, joiden avulla tutkittiin silmämääräisesti pinnoittumiset onnistuminen, sekä mitattiin pinnoitteiden paksuudet. Pinnoitteiden kulutuskestävyyttä ja kitkaominaisuuksia tutkittiin Pin-On-Rod-kokeella. Viimeiseksi kappaleiden ja pinnoitteiden korroosionkestoa simuloitiin suolasumukokeella.</p> <p>Tulososiossa verrataan koneistettujen ja LAM-kappaleiden tuloksia keskenään. Tulokset osoittavat koneistettujen ja LAM kappaleiden pinnoittamisen erot ja samankaltaisuudet sekä kokeiden onnistumiset ja epäonnistumiset.</p>	
Avainsanat 3D-tulostus, lisäävä valmistus, elektrolyyttinen pinnoittaminen, kemiallinen pinnoittaminen	
Julkinen	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Mechanical Engineering			
Author(s) Jussi Ritvanen			
Title of Thesis Coating of additively manufactured stainless steel			
Date	26 March 2015	Pages/Appendices	35
Supervisor(s) Mrs. Eeva Jauhiainen, Senior lecturer, Mr. Mika Mäkinen, Senior lecturer, Mr. Pekka Nuutinen, Project engineer			
Client Organisation /Partners Savonia University of Applied Sciences			
Abstract <p>The aim of this final year project was to research electroless plating and electroplating of objects made with additive manufacturing (LAM), and the quality of coating. The theoretical part of this thesis consists of the history and the theory of additive manufacturing as well as the theory of electroless and electrolytic plating. It also studies the plating process used in this project and explains the process step by step.</p> <p>The objects were plated with chemical nickel and chromium. The LAM-objects were manufactured at Lappeenranta University of Technology and the tests were carried out at the coating laboratory of Savonia University of Applied Sciences. The results of the tests for LAM objects were compared to machined objects of the same size and material. The properties of coatings were studied using various methods including abrasion and corrosion tests. The LAM- and machined objects were crosscut after the coating process to measure the thickness of the coating. Pin-On-Rod-test was used to examine the objects' abrasion resistance and frictional properties. A salt spray test was carried out to test the coatings resistance to corrosion.</p> <p>The results reveal the differences and similarities of coating LAM- and machined objects as well as the successes and failures of the tests.</p>			
Keywords 3D printing, additive manufacturing, electroplating, chemical plating			
public			

ESIPUHE

Työ suoritettiin yhteistyössä Savonia-ammattikorkeakoulun ja Lappeenrannan teknillisen yliopiston kanssa. Työn onnistumisesta ja ohjauksesta haluan kiittää ohjaajiani Savonia-ammattikorkeakoulun lehtori Eeva Jauhiaista ja lehtori Mika Mäkistä, Savonian pinnoituslaboratorion diplomi-insinööri Pekka Nuutista sekä Lappeenrannan teknillisen yliopiston lasertyöstön laboratorion tutkija Heidi Piiliä. Erityismaininnan avusta ansaitsee myös Jaakko Riihimäki, jonka oma opinnäytetyö valmistui tämän työn yhteydessä.

Kuopiossa _____

Jussi Ritvanen

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	7
2	LISÄÄVÄ VALMISTUS	8
2.1	Yleistä lisäävästä valmistuksesta	8
2.2	Jauhepetisulatus	8
2.3	Visuaalinen tarkastelu ja mittatarkkuus	10
3	PINNOITUKSEN TEORIAA	12
3.1	Elektrolyyttinen pinnoittaminen	12
3.2	Kemiallinen pinnoittaminen	12
3.3	Rasvapesu	12
3.4	Sähköpesu	12
3.5	Peittäus	13
3.6	Sulfamaattikylpy	13
3.7	Kemiallinen nikkelöinti	13
3.8	Kromaus	13
4	KORROOSIO	14
4.1	Kemiallinen korroosio	14
4.2	Sähkökemiallinen korroosio	14
4.3	Korkean lämpötilan korroosio	15
5	KOEMENETELMÄT	16
5.1	Pin-On-Rod	16
5.2	Poikkileikkeet	17
5.3	Korroosiotesti	18
6	TULOKSET	19
6.1	Pinnoitus	19
6.1.1	Pinnoittamisen aloittaminen	19
6.1.2	Pinnoituksen onnistuminen	21
6.2	Poikkileikkeet	22
6.3	Pin-On-Rod-kulutuskoe	25
6.4	Korroosiotestit	28
6.4.1	Pinnoittamaton	28
6.4.2	Nikkelikromipinnoitettu	30

7 YHTEENVETO..... 33

LÄHTEET 34

1 JOHDANTO

Opinnäytetyö on tehty yhdessä Lappeenrannan teknillisen yliopiston lasertyöstön laboratorion sekä Savonia-ammattikorkeakoulun kanssa. Opinnäytetyöhön on valmistettu metallia lisäävän valmistuksen menetelmällä (LAM) kappaleet Lappeenrannan yliopiston lasertyöstön tiloissa. LAM- ja koneistetut kappaleet on pinnoitettu Savonian pinnoituslaboratoriossa.

Lisäävä valmistus on yhä yleisempää pienten tavaraerien valmistamisessa. Sitä hyödynnetäänkin jo monella teollisuuden alalla, kuten prototyyppien valmistamiseen autoteollisuudessa ja proteesien ja elinten sekä puhelinten kuorien valmistamiseen. NASA on suunnitellut 3D-tulostimen viemistä kansainväliselle avaruusasemalle, jotta astronautit voivat tulostaa itse tarvittavia lisäosia (NASA 2014).

Opinnäytetyön tarkoitus on tutkia LAM-kappaleiden pinnoittamisen mahdollisuutta sekä verrata LAM- ja koneistettujen kappaleiden pinnoitteiden ominaisuuksia toisiinsa

Samaan aikaan tämän opinnäytetyön kanssa valmistui Jaakko Riihimäen opinnäytetyö. Kaikki työ on tehty yhteistyössä Riihimäen kanssa, mutta hänen työnsä keskittyy ruostumattoman LAM-teräksen kiiltoonikkelipinnoitetun kappaleen tutkimiseen.

2 LISÄÄVÄ VALMISTUS

2.1 Yleistä lisäävästä valmistuksesta

Lisäävä valmistus (additive manufacturing, LAM) eli 3D-tulostus tarkoittaa tietokoneella tehdyn virtuaalisen mallin tulostamista fyysiseksi esineeksi. Valmistuksessa käytetään useimmiten muovia, mutta on mahdollista käyttää myös metallia ja keraamia. Perinteiset valmistusmenetelmät perustuvat materiaalin poistamiseen kappaleesta, kun taas LAM perustuu aineen lisäämiseen. Useimmat tulostimet tulostavat kappaleen suihkuttaen sulaa perusmateriaalia ohuina nauhoina tulostusalustalle.

Ensimmäiset 3D-tulostimet otettiin käyttöön 1980-luvulla, mutta ensimmäiset kotikäyttöön tarkoitetut tulostimet tulivat markkinoille 1990-luvulla (Muurinen 2013, 3). LAM:n suosio on kasvanut 2000-luvulla halventuneiden 3D-tulostimien ja kotitekoisten avoimen lähdekoodin tulostimien myötä.

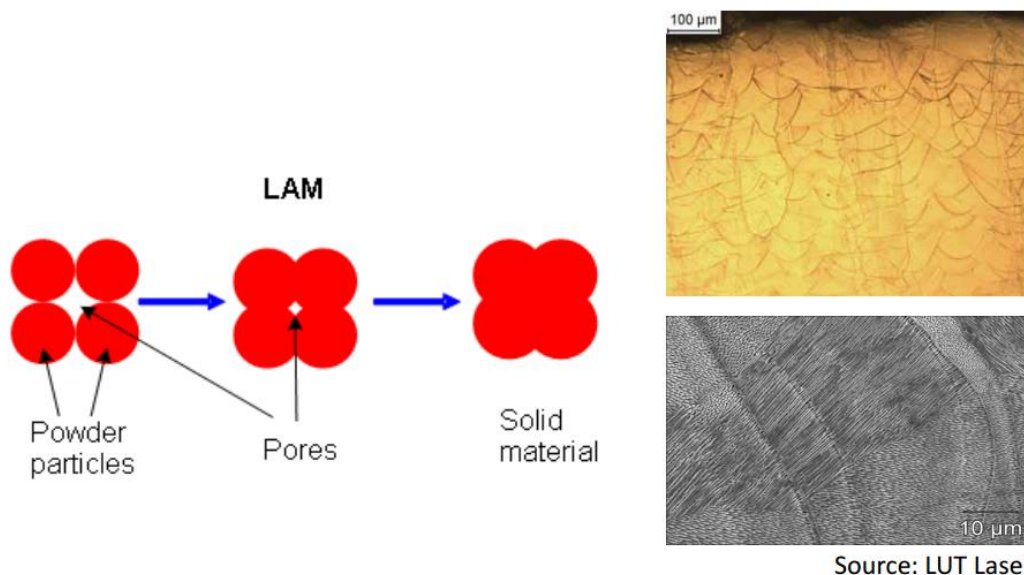
Tärkeää lisäävän valmistuksen yleistymisessä on ollut avoimen lähdekoodin hyödyntäminen. Ala onkin kehittynyt nopeasti, kun 3D-tulostimia ja LAM-tuotteita valmistavien yritysten lisäksi kotikäyttäjät ovat jakaneet internetissä omia tuotoksiaan. Ihmiset ovat päässeet ilmaiseksi tutkimaan muiden suunnitteleamia tuotteita ja tekemään niihin omia parannuksiaan. Avointa lähdekoodia ei kuitenkaan ole käytetty pelkästään suotuisen tarkoitukseen: Vuonna 2013 Yhdysvaltalainen yhtiö, Solid Concepts, valmisti ensimmäisen käsiaseen lisäävän valmistuksen menetelmällä. Pistooli valmistettiin metallista käyttäen teollista 3D-tulostinta (Gross 2013).

Harvardin yliopistossa on onnistuttu tulostamaan ihmisen kudoksesta monimutkaisia muotoja, kuten verisuonia (Ferber 2014). Tätä on pidetty isona askeleena kohti oikean elimen valmistamista laboratorio-olosuhteissa. Muita lisäävän valmistuksen epätavanomaisia käyttökohteita tulee olemaan muun muassa ruoan tulostaminen, jonka tutkimusta NASA rahoittaa (NASA 2014).

2.2 Jauhepetisulatus

Lappeenrannan yliopiston lasertyöstön laboratorion valmistusprosessia kutsutaan nimellä jauhepetisulatus. Se on yksi monesta standardin F2792-12a mukaisesta lisäävän valmistuksen menetelmästä.

Jauhepetisulatuksessa tulostusalustalle levitetään 20 µm:n kerros metallijauhetta, jota sulatetaan laserilla viipaloidun datan mukaisesti halutuista kohdista. Kun laser on sulattanut yhden kerroksen, tulostusalusta laskeutuu yhden kerroksen paksuuden verran ja uusi kerros metallijauhetta levitetään edellisen kerroksen päälle. Kuvan 1 vasemmasta reunasta huomataan, kuinka jauheen hiukkaset ovat prosessin alussa erillään, kunnes lasersäde sulauttaa hiukkaset yhteen. (Mansikka-aho 2014, 13 - 14.)



KUVA 1. Jauhepetitekniiikan havainnekuva (Lappeenrannan teknillinen yliopisto.)

Tässä työssä käytetyt kappaleet on suunniteltu käyttäen Solidworks 2013 –suunniteluohjelmistoa. Kappaleet tulostettiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston lasertyöstön laboratoriossa. Samoja 3D-malleja käytettiin vertailukappaleiden koneistamiseen.

Koneistettujen kappaleiden materiaalina käytettiin SS 316L haponkestävää ruostumatonta terästä, ja LAM-kappaleiden valmistukseen käytettiin EOS 17-4 PH –metallijauhetta. Taulukoissa 1 ja 2 on lueteltuina molempien metallien koostumus ainesosittain.

TAULUKKO 1. EOS 17-4 PH -metallijauheen koostumus (Lappeenrannan Lasertyöstön Laboratorio, 2014.)

Ainesosa	Fe	Ni	Mo	Cu	Cr	Mn	Si	C	P	S	O	N	Nb
Koostumus (%)	73,8	4,2	0,4	3,9	15,8	0,7	0,7	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3

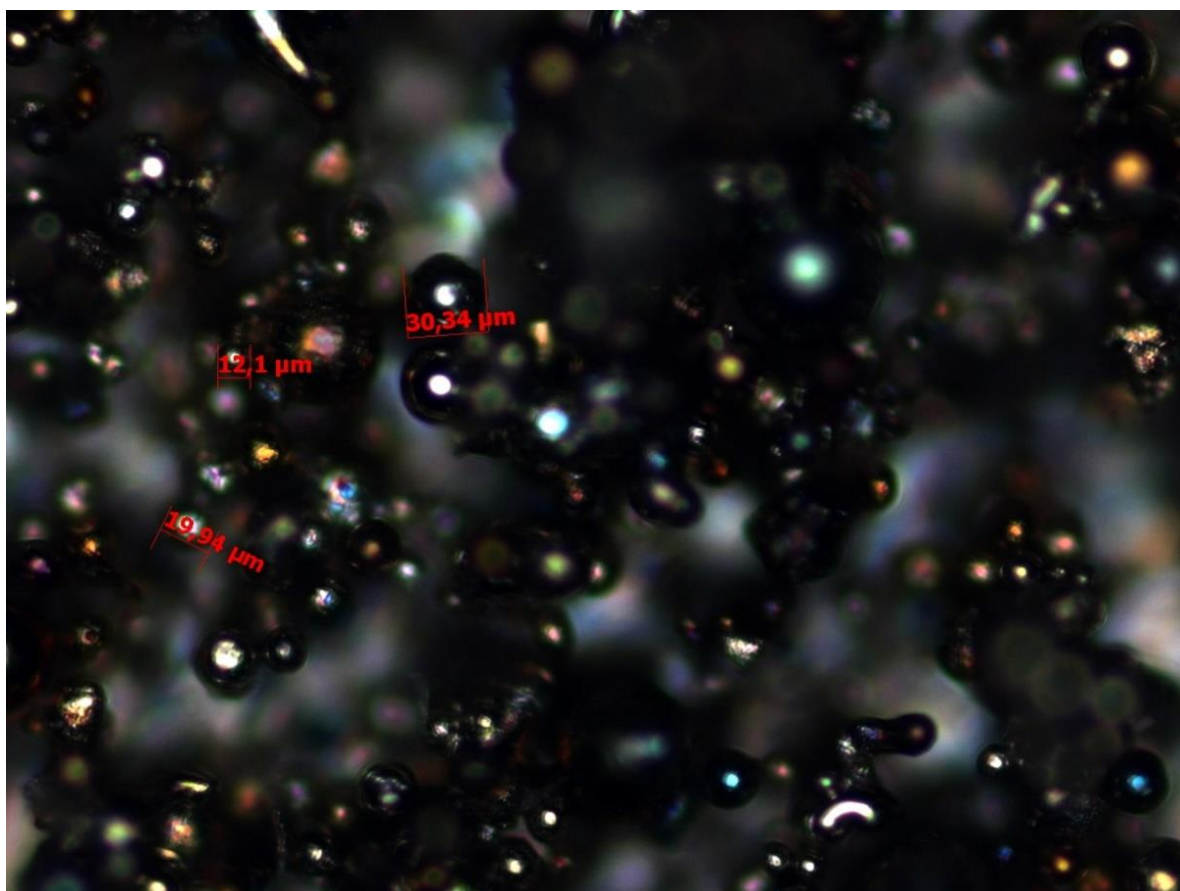
TAULUKKO 2. SS316L haponkestävän ruostumattoman teräksen koostumus (HPMetals, 2014.)

Ainesosa	Fe	Ni	Mo	Cu	Cr	Mn	Si	C	P	S	O	N	Nb
Koostumus Min (%)	-	10	2	-	16	-	-	-	-	-	-	-	-
Koostumus Max (%)	Loput	14	3	-	18	2	1	0,03	0,045	0,045	-	-	-

2.3 Visuaalinen tarkastelu ja mittatarkkuus

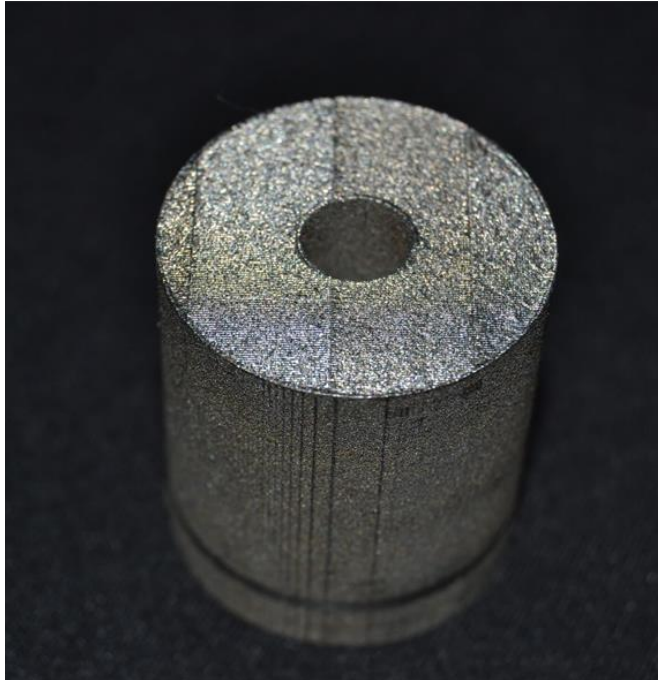
Tulostustarkkuus tarkastettiin mittaamalla kappaletta mikrometrillä useasta suunnasta. Sylinterien halkaisijat olivat suunnitteluvaiheessa 30 mm ja mitattaessa niiden halkaisijat olivat 29,80 – 29,70 mm. Särmiöiden halkaisijat suunnitteluvaiheessa olivat 20 mm, ja mitattaessa niiden halkaisijat olivat joka suunnalta mitattuna 19,94 mm.

Kuva 2 on otettu mikroskoopilla pinnoittamattomasta LAM-sylinteristä. Siitä huomataan, että LAM-kappaleen pinta on huokoinen, mikä osaltaan vaikutti kokeiden ja pinnoitusten tuloksiin. Kuvasta 2 havaitaan myös pinnan jauheesta muodostuneiden partikkeleiden olevan kooltaan noin 10 - 30 μm .



KUVA 2. Mikroskooppikuva LAM-sylinterin kyljestä (Jussi Ritvanen 2014.)

LAM-särmiöiden päällä kulkee kolme ohutta raitaa (kuva 3), jotka syntyvät, kun laserin alku- ja loppupäät kohtaavat ja sulavat osittain päällekkäin muodostaen ympäristöönsä paksumman kohdan. Nämä kohtauspisteet on kuvattu 200-kertaisena suurennoksena kuvassa 4.



KUVA 3. Pinnoittamaton LAM-sylinteri (Jussi Ritvanen 2014.)



KUVA 4. Mikroskooppikuva LAM-sylinterin päältä 200-kertaisella suurennoksella (Jussi Ritvanen 2014.)

3 PINNOITUKSEN TEORIAA

Tässä luvussa käsitellään pinnoittamisen teoriaa sekä käytettyä pinnoittamisprosessia. Kuviossa 1 kuvataan prosessin järjestys. Jokaisen vaiheen välissä suoritettiin huuhtelu joko upottamalla kappale vesiastiaan tai suihkuttamalla kappale puhtaaksi vedellä.



KUVIO 1. Pinnoitusprosessin järjestys

3.1 Elektrolyyttinen pinnoittaminen

Elektrolyttisessä pinnoittamisessa metalli pinnoitetaan kappaleen pintaan sähkövirran avulla. Kappale upotetaan pinnoituskylpyyn ja kytketään kiinni tasajännitelähteen negatiiviseen napaan eli katodiin. Positiiviseen napaan eli anodiin kytketään pinnoitemetallista tai muusta johdemateriaalista kytketty kappale. Molemmat elektrodit upotetaan elektrolyyttiliuokseen, joka sisältää liuennetta pinnoitemetallin ioneja, jotka pelkistyvät katodina toimivan kappaleen pinnalle diffuusion, elektrolyytin liikkeen ja sähkökentän vaikutuksesta. (Savonia-ammattikorkeakoulu 2012, 2.)

3.2 Kemiallinen pinnoittaminen

Kemiallisessa pinnoittamisessa myös kappale upotetaan metallia sisältävään vesiliuokseen, jossa metalli saostuu kappaleen pintaan ilman sähkövirtaa. Kemiallisen pinnoittamisen etuja elektrolyyttiseen verrattuna on pinnoitteen pääsy vaikeisiin paikkoihin, jolloin muotoilu saa olla vapaampaa kuin elektrolyttisesti pinnoitetun kappaleen. Kappaleen suunnittelussa täytyy kuitenkin ottaa huomioon huuhdeltavuus, jotta edellisten kylpyjen kemikaalit eivät pääse kulkeutumaan seuraavaan altaaseen. Kemiallinen pinnoitus soveltuu myös materiaaleille, jotka eivät johda tai johtavat huonosti sähköä. (Kinnunen 2013, 10.)

3.3 Rasvapesu

Kuumarasvapesu koostuu voimakkaasti emäksisestä vesipohjaisesta liuoksesta, jolla on tarkoitus poistaa kappaleen pinnalla olevat epäpuhtaudet. Rasvapesukylpy sisältää usein muun muassa natriumhydroksidia, pinta-aktiivisia aineita (tensidejä) ja korroosioinhibiittejä. Tensidit ja natriumhydroksidit irrottavat yhdessä tehokkaasti likaa, varsinkin korkeassa lämpötilassa.

(Savonia-ammattikorkeakoulu 2012, 5.)

3.4 Sähköpesu

Sähköpesussa pinnoitettava kappale kytketään toiseksi elektrodiksi ja toisena elektrodina toimii allas tai muu ulkoinen elektrodi. Elektrodit upotetaan voimakkaasti alkaliseen liuokseen ja niiden välille

kytketään jännite. Elektrodiin pinnoilla alkaa muodostua kaasua, anodilla happea ja katodilla vetyä, jotka puhdistavat kappaletta mekaanisesti ja kemiallisesti. (Savonia-ammattikorkeakoulu 2012, 2.)

3.5 Peittaus

Kappaleen pinnalle voi olla muodostunut valmistusvaiheessa tai sähköpesun jälkeen erilaisia oksidikerroksia, jotka haittaavat pinnoitusprosessia. Peittauskylpy sisältää epäorgaanisia mineraalihappoja, tyypillisesti suola- tai rikkihappoa, jotka reagoivat oksidikerroksen kanssa ja liuottavat sen kylpyyn. Lisäaineena käytettävät inhibiittorit muodostavat ohuen kalvon kappaleen pinnalle ja estävät puhtaan pinnan syöpyvän hapon vaikutuksesta. (Savonia-ammattikorkeakoulu 2012, 6.)

3.6 Sulfamaattikylpy

Sulfamaattikylpy toimii tässä työssä kemiallisen nikkelin esipinnoitteena, sillä kemiallinen nikkeli ei muuten tarttuisi käytettyihin kappaleisiin materiaalin huonon tarttuvuuden vuoksi. Sulfamaattikylpy perustuu nikkelisulfamaattiin $\text{Ni}(\text{NH}_2\text{SO}_3)$ ja aminorikkihappoon eli sulfamiinihappoon $\text{NH}_2\text{SO}_3\text{H}$. Sitä käytetään paljon paksujen nikkelikerrosten kasvattamisessa ja sähkömuovauksessa. (Suomen Galvanotekninen Yhdistys 2000, 171.)

3.7 Kemiallinen nikkelöinti

Elektrolyyttinen nikkelöinti toimii tyypillisesti korroosiosuojana ja antaa pehmeämmälle materiaalille kulutuskestävyyttä. Nikkelikerrosta voidaan myös käyttää parantamaan lopullisen pinnoitteen ominaisuuksia tai alustana lopulliselle pinnoitteelle säästösyistä. Tässä työssä nikkeli pinnoitetaan kappaleen pintaan ennen kromia. Näin nikkelipinnoite parantaa kromipinnoitteen korroosiokestävyyttä. (Savonia-ammattikorkeakoulu 2012, 6.)

3.8 Kromaus

Kromi on yksi yleisimmistä pinnoitemateriaaleista, koska se antaa hyvän korroosio- ja kulutuskestävyyden sekä hyvät kitkaominaisuudet. Se antaa myös tuotteelle hyvän kiiltävän pinnan. Kromipinnoite on hauras eikä sovi osiin, jotka altistuvat iskuille tai taivutuksille. Tähän vaikuttaa myös pinnoitteen paksuus, sillä alle $5\ \mu\text{m}$:n paksuiset kromipinnoitteet voivat kestää taivutusta, venytystä ja stanssausta. Tyypillinen kromipinnoite kestää hyvin typpihappoa ja laimeaa rikkihappoa, mutta liukenee suolahappoon ja kuumaan rikkihappoon.

Kromausta käytetään useimmiten ohuena $0,2 - 0,5\ \mu\text{m}$ pintakerroksena nikkelin päällä kiiltokromauksessa. Kovakromauksessa kromi pinnoitetaan melko paksuina, yli $10\ \mu\text{m}$ kerroksina joko suoraan teräsalustalle tai nikkelöinnin päälle. Kromausta voi käyttää myös pintavaurioiden korjaamiseen tai osan kasvattamiseen ylittään, minkä jälkeen osa hiotaan oikeamittaiseksi. (Suomen Galvanotekninen Yhdistys 2000, 55.)

4 KORROOSIO

Korroosio on ympäristön vaikutuksesta tapahtuvaa materiaalin muuttumista käyttökeltvottomaan muotoon. Vahingoittuva materiaali liukenee tai muuten reagoi ympäristön (ilma, neste, maa jne.) aineiden kanssa. Korroosion taustalla on kemiallinen tai sähkökemiallinen ilmiö, mutta ympäristö voi vaikuttaa myös mekaanisesti korroosioilmiön syntymiseen ja nopeuteen.

Yksinkertainen esimerkki korroosiosta on raudan ruostuminen, jossa rauta-atomit hapettuvat veden ja hapen vaikutuksesta. Ruoste on siis seos rautaoksidaa ja hydroksidaa.

Korroosiossa voidaan erottaa kolme päätyyppiä: kemiallinen korroosio, sähkökemiallinen korroosio ja korkean lämpötilan korroosio. (Mattila 2010, 16.)

4.1 Kemiallinen korroosio

Kemiallinen korroosio tapahtuu materiaalin suorana liukenemisena syövyttävään ympäristöön (esim. vesiliuokset, hapot, sulat metallit, polymeerien liuottimet jne.). Usein liukeneminen tapahtuu ns. valikoivana syöpmisenä, mistä esimerkkeinä on messinkien sinkin kato vedessä ja grafitoituminen valuraudassa. Kemiallista korroosiota voidaan vähentää alentamalla lämpötilaa, pinnoittamalla tai käyttämällä stabiileja materiaaleja. (Mattila 2010, 16.)

4.2 Sähkökemiallinen korroosio

Sähkökemiallinen korroosio on materiaalin liukenemista ympäristöön sähköisten tai kemiallisten ilmiöiden yhteisvaikutuksesta. Reaktio tapahtuu, kun eri jalousasteiset metallit muodostavat sähköä johtavan elektrolyyttisen yhteyden. Näiden ehtojen täytyessä muodostuu korroosiovirta ja korroosiopari, jossa epäjalompi materiaali liukenee.

Metallinen liukenemisen yhteydessä se saattaa reagoida ympäristönsä kanssa muodostaen kiinteän korroosiotuotekerroksen, joka eristää metallipinnan elektrolyytistä. Tällöin tuloksena on korroosiovirran katkeaminen ja korroosion pysähtyminen, ns. passivaatio. Useiden korroosiota kestävien metallien, kuten alumiinin, kromin, titaanin ja ruostumattomien terästen kestävyys perustuu passivoitumiseen.

Edelleen sähkökemiallinen korroosio voidaan lajitella eri alalajeihin. Näiden alalajien päätyypit ovat:

- tasainen syöpyminen
- galvaaninen korroosio
- paikallinen syöpyminen, kuten piste-, rako-, jännitys- tai raerajakorroosio
- eroosikorroosio
- korroosioväsyminen (TTY 2014.)

4.3 Korkean lämpötilan korroosio

Korkean lämpötilan korroosio on pääasiassa metallin muuttumista erilaisiksi yhdisteiksi korkea lämpötilan kiihdyttämän reaktionopeuden ansiosta tai metallin liukenemista sen pinnalle muodostuviin osittain suliiin korroosiotuotteisiin (Mattila 2010, 17.)

5 KOEMENETELMÄT

Pinnoittamisen jälkeen kappaleita tutkittiin Pin-On-Rod -menetelmällä, tekemällä kappaleista poikki-leikkeet sekä asettamalla koekappaleet suolasumukaappiin. Tässä luvussa esitellään eri kokeiden menetelmät sekä tarkoitukset.

5.1 Pin-On-Rod

Pinnoitettujen kappaleiden kulutuskokeet suoritettiin pinnoitushankkeessa kehitetyllä kulutuslaitteistolla. Kokeessa kappaleen pintaa vasten painetaan alumiinioksidikuulalla, kun kappaletta pyöritetään akselinsa ympäri. Kuulan päälle asetetaan määrätty paino, joka muodostaa kulutusuran. Kokeessa saadaan selville kappaleen kulutuskestävyys, sekä kappaleen ja kuulan välinen kitkavoima ja -kerroin.

Laitteen määrittämää kitkakerrointa ja -voimaa voidaan käyttää verrattaessa laitteella testattuja materiaaleja keskenään. Kappaleita tutkittaessa saatavaa kitkakerrointa ei voida verrata yleisiin kitkakertoimiin, vaan sitä käytetään verrattaessa tutkittavien kappaleiden kitka-arvoja keskenään. Koekappaleista voidaan myös mitata kulutusuran syvyys mikroskoopin avulla.

Tässä kokeessa käytettiin 200 gramman painoa ja koekappaletta pyöritettiin 300 kierrosta minuutissa 20 minuutin ajan. Kokeiden ajan olosuhteet pyrittiin pitämään samoina, jolloin lämpötila oli 22 °C ja ilmankosteus 21 %. Koeasetelma on kuvattuna kuvassa 5.



KUVA 5. Pin-On-Rod kulutuskoe (Ville Kinnunen 2013.)

5.2 Poikkileikkeet

Kappaleiden pinnoitteen paksuutta tutkittiin tekemällä kappaleista poikkileikkeet, joita katsottiin mikroskoopilla. Kappaleista leikattiin pois 10 - 15 mm pitkä pala, jonka ympärille valettiin 5mm paksuinen muovikerros. Sen jälkeen poikkileikkeiden päät hiottiin kiiltäviksi ja mahdollisimman naarmuttomiksi vesihiomapaperilaitteella. Poikkileikkeiden valmistukseen vaadittavat tarkkuussaha, hieiden valmistuslaite ja hieiden hiontalaite ovat kuvattuna kuvissa 6 - 8. Valmiit poikkileikkeet ovat kuvattuna kuvassa 9.



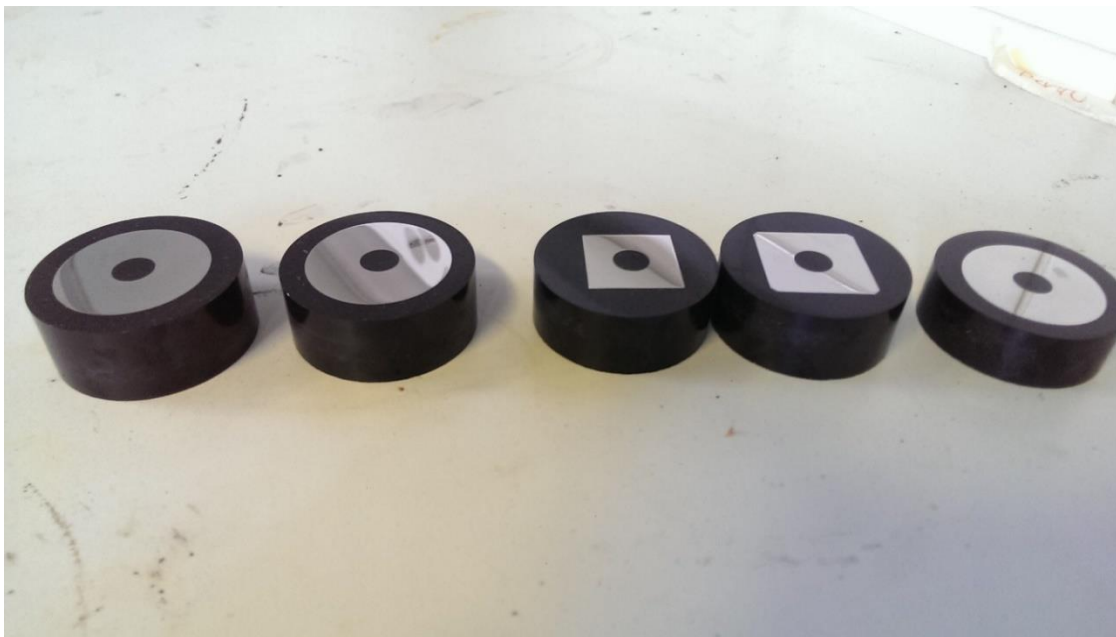
KUVA 6. Tarkkuussaha (Petri Savolainen 2013.)



KUVA 7. Hieiden valmistuslaite (Jussi Ritva-
nen 2014.)



KUVA 8. Hieiden hiomislaite (Petri Savo-
lainen 2013.)



KUVA 9. Valmiit poikkileikkeet (Jussi Ritvanen 2014.)

5.3 Korroosiotesti

Korroosiotestit suoritettiin suolasumukaapissa (kuva 10), joka simuloi nopeutetusti kappaleen korroosiota kosteissa ja lämpimissä olosuhteissa. Kaapin olosuhteet ovat standardin ISO 9227:2006 mukaisia. Suolasumukaapin lämpötila oli 34,8 °C ja suolaliuoksen pH-arvo oli 3,2. Kappaleisiin porattiin muutaman millimetrin syvyinen kolo ja pintaan tehtiin naarmuja, jotta nähtiin kuinka korrosio muodostuu vahingoittuneisiin kohtiin. Kappaleet asetettiin telineeseen 45° kulmaan ja niitä pidettiin kaapissa 12 vuorokauden ajan. Kappaleista otettiin kuvia 24 - 72 tunnin välein.



KUVA 10. Suolasumukaappi (Jussi Ritvanen 2014.)

6 TULOKSET

Tässä luvussa esitellään tehtyjen kokeiden tulokset. Tuloksien avulla selvitetään koneistettujen ja LAM-kappaleiden eroavaisuudet.

6.1 Pinnoitus

Tässä tutkimuksessa pinnoittamisen tavoitteena on selvittää, onnistuuko LAM-kappaleen pinnoittaminen samalla tavalla kuin koneistetun. Kokeessa tutkitaan myös, aiheuttaako LAM-kappaleen huokoinen pinta ongelmia pinnoitteen kiinnipysyvyyden kanssa ja pinnoittuuko huokoinen pinta tasaisesti joka alueelta.

6.1.1 Pinnoittamisen aloittaminen

Pinnoitusta varten täytyy laskea koekappaleiden pinta-alat, jotta voidaan laskea sähkövirrat sulfaatti- ja kromikylpyyn. Pinta-alat laskettiin seuraavilla kaavoilla:

Sylinterin pinta-ala laskettiin kaavalla

$$A = 2\pi r(h + r), \quad (1)$$

jossa A on yhteenlaskettu pinta-ala, r on kappaleen säde ja h on kappaleen korkeus. Suorakulmaisen särmiön pinta-ala laskettiin kaavalla

$$A = 2(ab + bc + ac), \quad (2)$$

jossa a , b ja c ovat kappaleen sivujen pituudet ja A on kappaleen pinta-ala.

Taulukossa 3 on laskettuna kaikkien koekappaleiden pinta-alat, joihin on lisätty koekappaleita kiinnittävän mutterin pinta-ala $0,042 \text{ dm}^2$.

TAULUKKO 3. Pinnoitettavien kappaleiden pinta-alat

	Halkaisija/kanta (dm)	Korkeus (dm)	Pinta-ala (dm ²)
LAM-sylinteri	0,29	0,33	0,47
LAM-särmiö	0,20	0,22	0,33
Koneistettu sylinteri	0,30	0,30	0,47
Koneistettu särmiö	0,22	0,30	0,40

Koekappaleiden pinnoituksiin käytetyt virrat laskettiin kaavalla

$$I = JA, \quad (3)$$

jossa I on sähkövirta, J on sähkövirran tiheys ja A on koekappaleen pinta-ala.

Taulukosta 4 nähdään kappaleiden pinnoitusajat. Ohjearvoilla nikkelöinnin pinnoitusnopeus on 20 - 25 $\mu\text{m/h}$ ja kromauksen 12 - 15 $\mu\text{m/h}$, joten kappaleilla tulisi teoriassa olla yhteensä 4 - 6 μm sekä sulfamaatti- että kemiallista nikkelpinnoitetta ja 3 - 4 μm kromipinnoitetta.

TAULUKKO 4. Pinnoitusten ajat ja virrantiheydet

Kylpy	Aika (min)	Virrantiheys
Rasvapesu	5	-
Peittäus	5	-
Suolahappo	0,5	-
Sulfamaattinikkeli	3	1,5 min 2,5 A/dm ² + 1,5 min 5 A/dm ²
Kemiallinen nikkeli	15	-
Kromi	20	10 A/dm ²

Pinnoitettavat kappaleet kiinnitettiin terästangolla kuvassa 11 nähtävään pyöreään telineeseen. Tangon kylpyyn uppoava osa peitettiin vulkanoituvalla teipillä, jotta sähkö ei johdu tangon pintaan eikä sen pinta-alaa tarvitse ottaa huomioon laskelmissa.

Ennen pinnoituksia kylvyistä mitattiin pH ja ainemäärien pitoisuudet. Mittausten jälkeen ne mukautettiin valmistajan antamien lähtöarvojen mukaiseksi.



KUVA 11. Teräslevyt kiinnitettynä telineeseen (Jaakko Riihimäki 2014.)

6.1.2 Pinnoituksen onnistuminen

Pinnoitukset aloitettiin tekemällä koepinnoituksia kuvan 11 teräslevyillä. Näiden tarkoituksena oli harjoitella pinnoitusprosessin läpiviemistä sekä nähdä kylpyjen laatu ja pinnoituksen lopputulos ennen tutkittavien kappaleiden pinnoitusta. Näin minimoitiin inhimilliset virheet, sekä huomattiin, jos kylpyä tarvitsi säätää tai vaihtaa uuteen.

Pinnoitusten alkaessa havaittiin, että sulfamaattinikkelikylvyssä oli paljon epäpuhtauksia, mikä pilasi ensimmäiset pinnoitukset. Kappaleiden pinnoite oli samea ja osittain musta kulmista sekä pinnoite hilseili helposti irti. Epäpuhtaudet olivat todennäköisesti kappaleista irronneita pieniä hiukkasia tai kylpyaltaan katodeista irronnutta ruostetta. Pinnoituksen epäonnistumiseen mahdollisesti vaikutti myös altaan muuttunut pH.

Koepinnoituksessa käytettiin teräslevyjä joiden tarkoituksena oli kerätä epäpuhtaudet kylvystä itseensä. Usean puhdistuskierroksen jälkeen sulfamaattikylpy vaihdettiin uuteen, mikä vähensi ongelmia. Kylvyn vaihdon jälkeen ongelmat vaikuttivat vielä pinnoitukseen, minkä huomasi useassa kappaleessa pinnoitteen huonona kiinnipysyvyytenä, varsinkin kappaleen pohjassa.

Käytetyssä pinnoituslinjassa kappaleiden siirtäminen ja huuhtelut ovat käyttäjien itsensä suorittamia toimintoja, automaattisen linjaston sijaan, joten joidenkin pinnoitusten huonot kiinnipysyvyydet ja muut epäonnistumiset voivat johtua myös käyttäjien tekemistä virheistä. Tärkeä asia pinnoitettaessa on huuhtelu, jonka täytyy olla nopea ja perusteellinen, jotta edellisen kylvyn aineet eivät siirry seuraavaan eikä kappale jäähy liikaa kylpyjen välillä. Pinnoitetuista kappaleista parhaat valittiin tutkimuksiin. Pinnoitteiden huono kiinnipysyvyys on huomioitu myöhemmissä korroosiotesteissä.



KUVA 12. Nikkelikromipinnoitettu LAM sekä pinnoittamaton särmiö (Jussi Ritvanen 2014.)

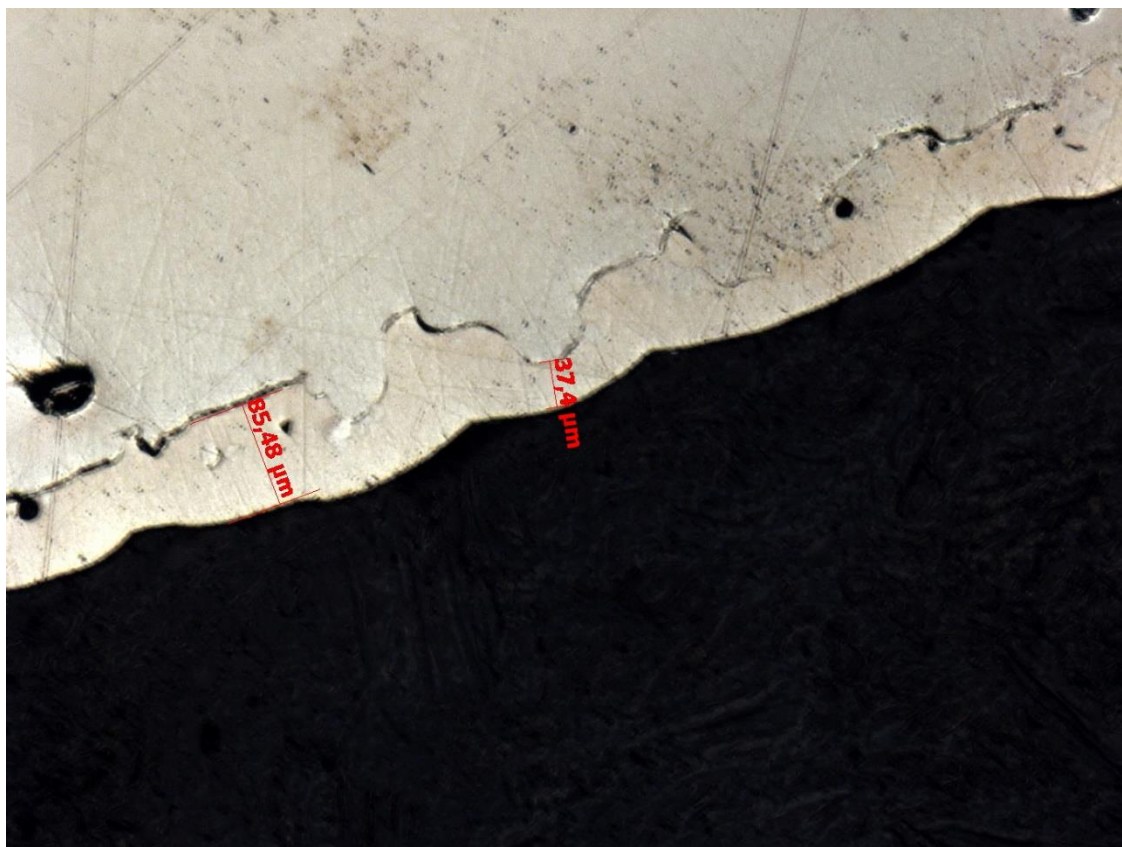
Pinnoitusten jälkeen pinnoitteen kiinnipysyvyyttä kokeiltiin raapaisemalla kappaleen pintaa terävällä puukolla. Näin huomattiin, hilseileekö pinnoite heti pois. Kuvassa 12 kuvattu LAM-särmiö pinnoitettiin hyvin. LAM-kappaleet pinnoitettiin yleisestikin paremmin kuin koneistetut. Kuvan 12 särmiöstä huomaa, kuinka sivun keskiosa on hieman tummempi kuin kulmat. Väriero johtuu kulmien

aiheuttamista suurista virtatihentymistä, joihin pinnoitetta kertyi enemmän kuin muualle. LAM-kappaleiden pinnoitteiden parempi kiinnipysyvyys luultavasti johtuu epätasaisesta pinnasta, jonka takia kappaleessa on enemmän tartuntapinta-alaa.

6.2 Poikkileikkeet

Kokeen tarkoitus oli tutkia pinnoitteiden paksuutta, ja kuinka pinnoite pääsi LAM-kappaleiden epätasaisen pinnan koloihin. Erikoisuutena LAM-kappaleista löytyi pinnoitteen muodostamia palloja, minkä voi huomata kuvan 15 alaosassa. Todennäköisesti pinnan tason alla on jokin suurempi perusaineen muodostama pallo, jonka ympärille pinnoite on muodostunut.

Käytetyt nikkeli- ja kromipinnoitteet eivät ole luonteeltaan tasoittavia, joten pinnoitteet myötäilevät pintaa ja jättävät sen edelleen epätasaisiksi. Nikkeli- ja kromipinnoitetta voi verrata kiiltoonikkelipinnoitteeseen, jota on tarkemmin tutkittu Riihimäen opinnäytetyössä. Kiiltoonikkelipinnoite on tasoittava, kuten kuvasta 13 havaitaan.



KUVA 13. Kiiltoonikkelipinnoitetun LAM-kappaleen poikkileike (Jaakko Riihimäki 2014.)

Kuviin 14 ja 15 on merkitty mitatut pinnoitteen paksuudet, jotka näkee myös taulukosta 5. Kappaleet pinnoituivat kuten pinnoitusta edeltävät laskelmat ennustivat. Koneistettujen kappaleiden pinnoitteet olivat yhtä paksuja jokaisesta kohdasta, mutta LAM-kappaleiden pinnan epätasaisuuden vuoksi pinnoitetta kertyi enemmän virtatihentymiin, eli kappaleen teräviin kohtiin.

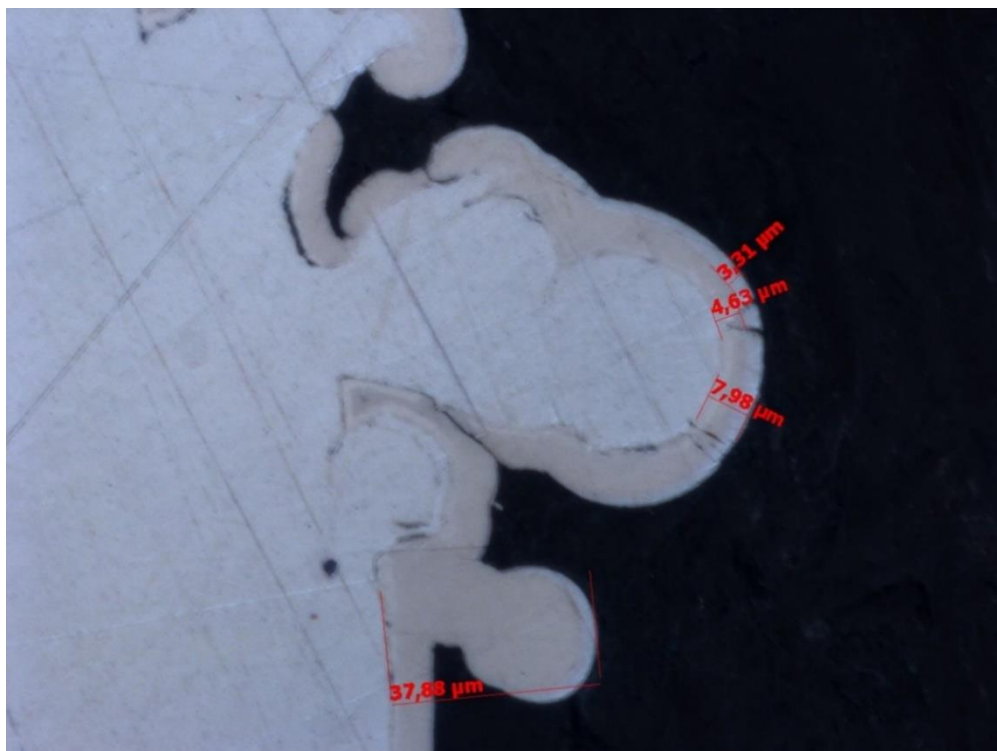
TAULUKKO 5. Pinnoitteiden paksuudet

Tutkimuskappale	Nikkelikerroksien paksuus (μm)	Kromikerroksen paksuus (μm)
LAM	4,63	3,31
Koneistettu	6,38	3,82



KUVA 14. Koneistetun nikkelikromipinnoitetun kappaleen poikkileike (Jussi Ritvanen 2014.)

Kuva 15 on esimerkki siitä, kuinka epätasainen pinta aiheutti ongelmia pinnoituksessa. Kuvan yläosassa pinnoite on osittain irti kappaleesta ja vieressä ei ole ollenkaan pinnoitetta. Pinnoittamaton kohta näyttää olevan eräänlaisessa kuopassa, jossa pinnoitekylpy ei ole todennäköisesti päässyt kiertämään.



KUVA 15. Nikkelikromipinnoitetun LAM-kappaleen poikkileikekuva (Jussi Ritvanen 2014.)

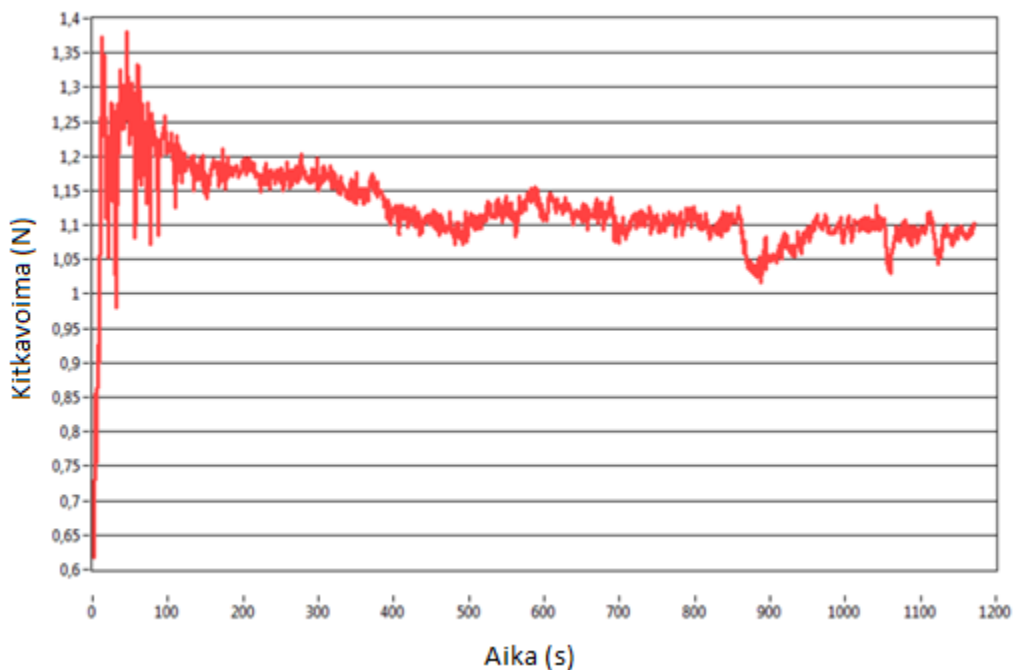
Kokeiden perusteella näyttäisi siltä, että LAM-kappale pinnoittui yhtä hyvin kuin koneistettu, vaikka sen pinta on epätasainen ja huokoinen. Nikkelikerros on hieman ohuempi, mutta pinnoitetta on päässyt vaikeisiin paikkoihin. Kuvassa 16 havaittavat pinnoittamattomat kohdat voivat aiheuttaa pinnoitteen halkeilua, mutta tätä ei kokeiden aikana havaittu. Jos kappaleen materiaali olisi muuta kuin haponkestävää tai ruostumatonta terästä, aukot pinnoituksessa voisivat altistaa perusmateriaalin korroosiolle.



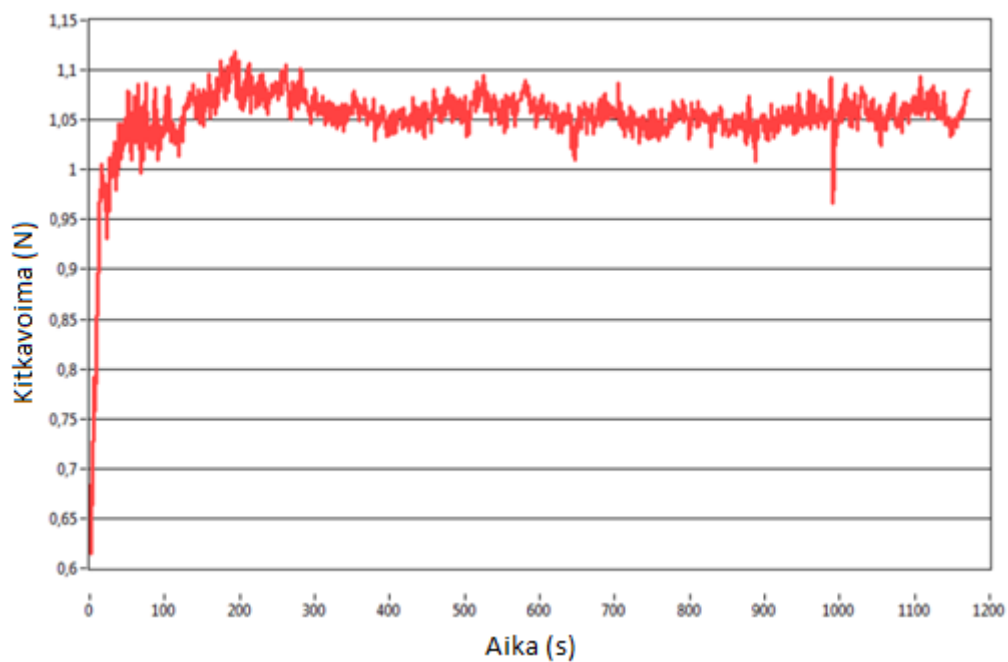
KUVA 16. Nikkelikromipinnoitetun LAM-kappaleen pinnoitteen halkeamia (Jussi Ritvanen 2014.)

6.3 Pin-On-Rod-kulutuskoee

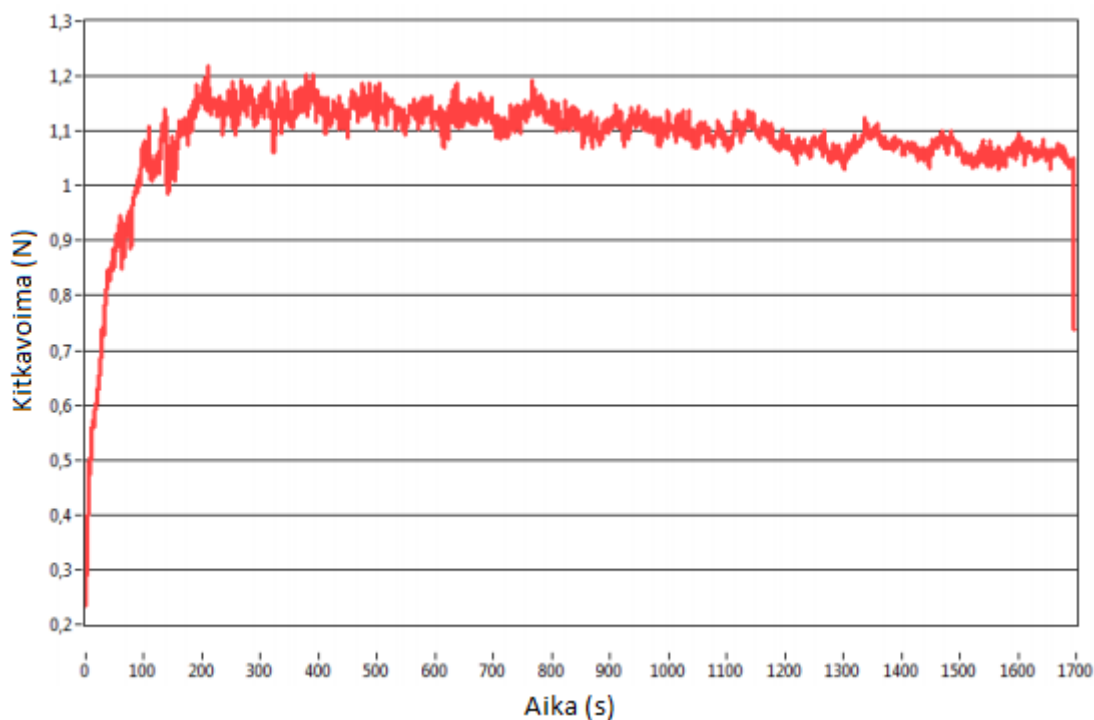
Kuvioissa 2-5 on kuvattuna PIN-ON-ROD kulutuskokeen tulokset. Kuviot esittävät suhteellisen kitkavoiman muuttumisen ajan suhteen. Kokeiden kesto oli 1200 sekuntia, mutta pinnoittamattoman LAM-kappaleen koe kesti 1700 sekuntia. Pinnoittamattoman LAM-kappaleen kokeen kitkavoiman ja kitkakertoimen keskiarvot on kuitenkin otettu ensimmäisten 1200 sekunnin ajalta.



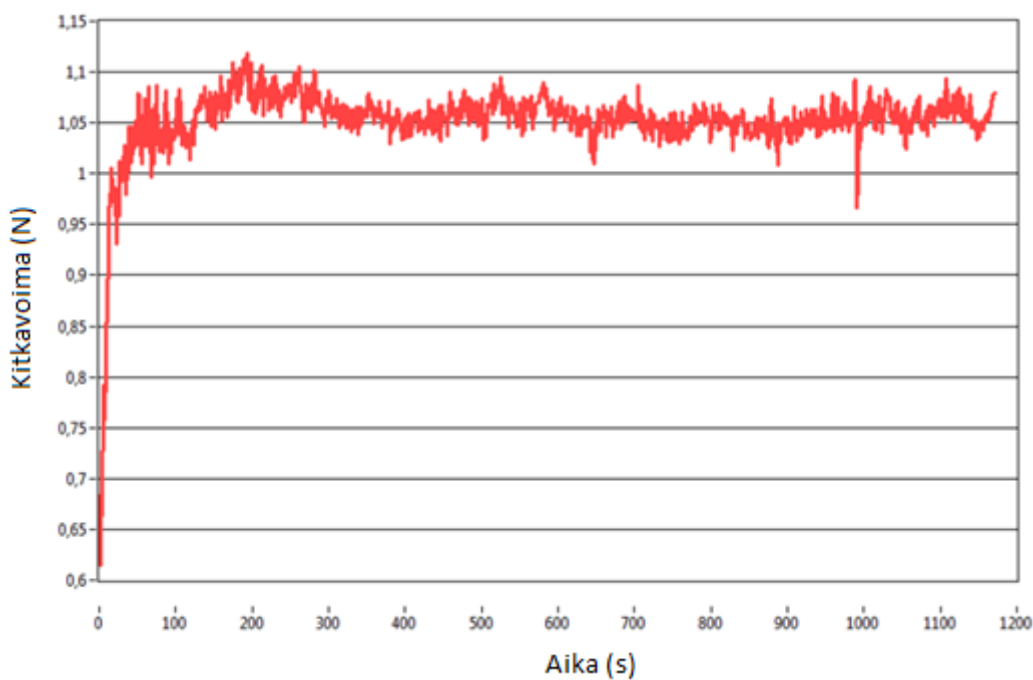
KUVIO 2. Koneistetun pinnoittamattoman sylinterin kulutustesti



KUVIO 3. Koneistetut krominikkelipinnoitetun sylinterin kulutustesti



KUVIO 4. Pinnoittamattoman LAM-sylinterin kulutustesti

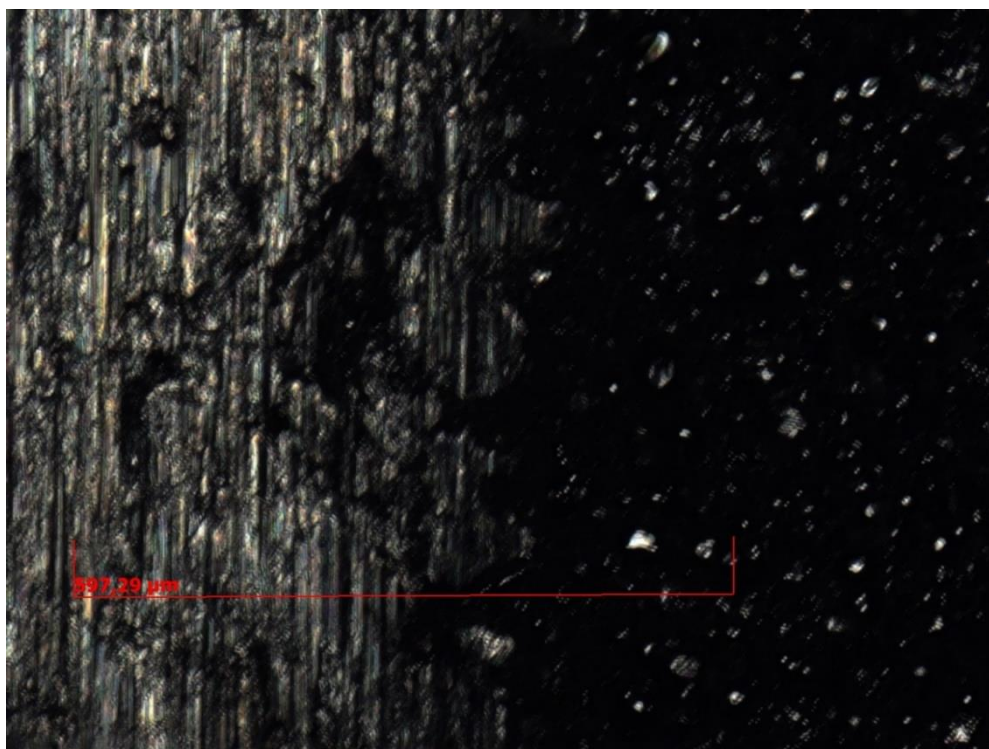


KUVIO 5. Krominikkelpinnoitetun LAM-sylinterin kulutustesti

Taulukossa 6 on esitetty Pin-On-Rod kitkakokeen suhteellisten kitkavoimien ja kitkakertoimien keskiarvot. Luvuista huomaa, että pinnoite lisää kappaleiden kitkaa. Varsinkin LAM-kappaleiden kohdalla kitkavoima nousi suhteellisesti enemmän kuin koneistetuissa kappaleissa. Tuloksista myös havaitaan, että LAM-kappaleiden karhea pinta odotetusti lisää kitkaa.

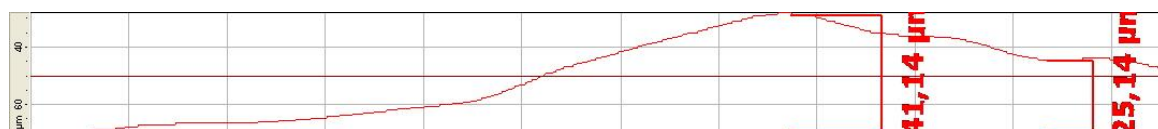
TAULUKKO 6. Pin-On-Rod kitkavoimien ja -kertoimien arvot

Kappale	Kitkavoiman keskiarvo (N)	Kitkakertoimen keskiarvo
Koneistettu pinnoittamaton	1,010	1,981
Koneistettu pinnoitettu	1,054	2,067
pinnoittamaton LAM	1,095	2,147
pinnoitettu LAM	1,241	2,434



KUVA 17. Pinnoittamattoman LAM-kappaleen kulutusura (Jussi Ritvanen 2014.)

Kuvassa 17 ja kuviossa 6 on kuvattuna kokeen muodostama kulutusura. Kuvan 17 vasen reuna on kulutusura joka loppuu kuvan keskikohtalla, ja oikeassa reunassa näkyy LAM-kappaleen huokoinen pinta. Kuvassa oleva punainen mitta on yhteydessä kuvion 6 korkeuskäyrään. Kuvan 17 käyrän vasen reuna on kulutustestin muodostama ura, joka nousee oikealle alkuperäistä korkeutta kohti, ja näiden erotus on kulutusuran syvyys. LAM-kappaleissa pinta on niin epätasainen, että tarkan lähtökorkeuden määrittäminen voi olla mahdotonta. Tämän takia pinnan epätasaisuuksista on otettava keskiarvo.



KUVIO 6. Pinnoittamattoman LAM-kappaleen urasyvyyskäyrä

Koneistetuissa kappaleissa pinnoitus on lisännyt kulutuskestävyyttä, kuten taulukosta 7 huomataan. LAM-kappaleiden urasyvyyksistä ei voi tehdä kunnollisia päätelmiä, sillä tulokset osoittavat, että pin-

noittamaton kappale olisi kovempi kuin pinnoitettu. Vaikka kovempi pinnoite ei välttämättä tarkoita, että kulutuskestävyys paranisi, edelliset tulokset kyseisillä pinnoitteilla ovat osoittaneet, että nikkeli-kromipinnoitus lisää kulutuskestävyyttä (Kinnunen 2013, 20 - 28.). Rakkulainen pinta voi aiheuttaa suurempaa kulutusta, koska Pin-On-Rod-kokeen kuula ei liiku tasaista rataa koekappaleen päällä, vaan se hyppii ja jauhaa kappaleen pintaa. Tämän takia tulokset voivat vaihdella samalla tavalla pinnoitettujen ja samanlaatuisten kappaleiden välillä.

TAULUKKO 7. Kulutuskokeen tutkimuskappaleisiin muodostamat urasyvytydet

Tutkimuskappale	Uraisyvyys (μm)
Koneistettu nikkelikromattu	6,1
Koneistettu pinnoittamaton	7,3
LAM nikkelikromattu	57
LAM pinnoittamaton	33,1

6.4 Korroosiotestit

Kappaleiden oltua suolasumukaapissa 264 tuntia ne otettiin lopullisesti pois ja niitä vertailtiin samantyyppisiin kappaleisiin, jotka eivät olleet suolasumukaapissa. Korroosiotestin koeasetelma on kuvattuna kuvassa 18.



KUVA 18. Asetelma korroosiotestin alkaessa (Jussi Ritvanen 2014.)

6.4.1 Pinnoittamaton

Materiaalin ollessa haponkestävää AISI 316L terästä, pinnoittamattomissa kappaleissa ei odotetusti esiinny korroosiota. Kappaleet olivat kokeessa mukana toimimassa vertailukappaleina pinnoitetuille kappaleille. Kuvasta 19 näkee pinnoittamattoman koneistetun sylinterin korroosiokokeen lopuksi.



KUVA 19. Pinnoittamaton koneistettu sylinteri korroosiotestin lopuksi (Jaakko Riihimäki 2014.)

6.4.2 Nikkelikromipinnoitettu

LAM-kappaleen pinnanmuodon takia korroosion laajenemisen huomaa epäselvemmin kuin koneistetuissa. LAM-kappaleen korroosio on selvästi alkanut jo 24 tunnin jälkeen, kuten kuvasta 20 havaitaan. Sen jälkeen eteneminen (kuvat 21 – 23) on vaikeampi huomata. Koneistetussa kappaleessa korroosio havaitaan myös 24 tunnin jälkeen, varsinkin kulutusurassa. Ero 24 tunnin ja 264 tunnin (kuva 23) jälkeen on visuaalisesti tarkasteltuna koneistetussa kappaleessa paljon selvempi.



KUVA 20. Nikkelikromipinnoitettu LAM-sylinteri 24 tuntia suolasumukaapissa (Jussi Ritvanen 2014.)



KUVA 21. Nikkelikromipinnoitettu LAM-sylinteri 96 tuntia suolasumukaapissa (Jussi Ritvanen 2014.)



KUVA 22. Nikkelikromipinnoitettu LAM-sylinteri 192 tuntia suolasumukaapissa (Jaakko Riihimäki 2014.)



KUVA 23. Nikkelikromipinnoitettu LAM-sylinteri 264 tuntia suolasumukaapissa (Jaakko Riihimäki 2014.)

Kuvat 24 – 27 osoittavat, kuinka koneistettu nikkelikromipinnoitetun kappaleen korroosion eteneminen on selvemmin havaittavissa kuin LAM-kappaleiden. Koneistetun nikkelikromipinnoitetun kappaleen pinnalla havaitaan 72 tunnin kohdalla (kuva 25), kuinka ennen koetta tehtyyn naarmuun on muodostunut suhteellisesti enemmän korroosiota kuin muualle kappaleeseen. Kuvasta 26 huomaa, kuinka 192 tunnin jälkeen koko kappaleeseen on muodostunut laajalti korroosiota.



KUVA 24. Koneistettu nikkelikromipinnoitettu 24 tuntia suolasumukaapissa (Jussi Ritvanen 2014.)



KUVA 25. Koneistettu nikkelikromipinnoitettu 72 tuntia suolasumukaapissa (Jussi Ritvanen 2014.)



KUVA 26. Koneistettu nikkelikromipinnoitettu 192 tuntia suolasumukaapissa (Jaakko Riihimäki 2014.)



KUVA 27. Koneistettu nikkelikromipinnoitettu 264 tuntia suolasumukaapissa (Jaakko Riihimäki 2014.)

Nikkelikromipinnoitetun LAM-kappaleen pinnalle on muodostunut laajasti korroosiota, mutta sen pinnoite pysyy paikallaan. Koneistettuun nikkelikromipinnoitettuun kappaleeseen verrattuna pinnoite pysyy paremmin paikoillaan pohjassa. Tämä saattaa johtua huonosti onnistuneesta pinnoituksesta. Irronnut pinnoite huomataan varsinkin kuvasta 27, jossa kappaleen pohjan pinnoite on osittain irronnut.

Koneistetun kappaleen Pin-On-Rod-kulutuskokeen muodostamassa urassa on enemmän korroosiota kuin LAM-kappaleessa. LAM-kappaleen pinnanmuodon takia on mahdollista, että kulutuskokeessa käytetty alumiinioksidikuula on mennyt pinnoitteen läpi perusaineeseen. Näin ei tapahtunut koneistetussa kappaleessa. Kuvassa 28 on kuvattuna kaikki suolasumukaapissa olleet kappaleet kokeen päätteeksi.



KUVA 28. Kaikki korroosiokokeessa olleet kappaleet 264 tunnin jälkeen (Jussi Ritvanen 2014.)

7 YHTEENVETO

Työ suoritettiin yhteistyössä Savonia-ammattikorkeakoulun ja Lappeenrannan teknillisen yliopiston kanssa. Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia lisäävällä valmistuksella (LAM) ruostumattomasta teräksestä valmistettujen kappaleiden pinnoittamista kromilla ja kemiallisella nikkelillä ja sitä, kuinka se eroaa ominaisuuksiltaan pinnoitetusta koneistetusta kappaleesta. LAM-kappaleen pinnoittaminen, kuten koko lisäävä valmistus, on vielä uutta teollisuudessa. LAM-kappaleen pinnoittamisesta ei löytynyt aikasempia tutkimuksia. Pinnoitettaessa LAM-kappaleita huomattiin kuinka huokoinen pinnanmuoto vaikutti pinnoitteen kiinnipysyvyyteen.

Työn perusteella saatiin selville, että pinnoite tarttui kiinni LAM-kappaleiden pinnan epätasaisuuksiin erinomaisesti sekä pinnoitteen kiinnipysyvyys oli parempi kuin koneistettujen kappaleiden. Tämä johtui todennäköisesti siitä, kuinka pinnoite tarttui huokoisen pinnan ympärille. Korroosiotestissä LAM-kappaleen pinnoite pysyi kiinni eikä hilseillyt korroosion takia. Tutkimuksissa saatujen tulosten perusteella LAM-kappaleen pinnoittaminen poikkeaa koneistetun kappaleen pinnoittamisesta ainoastaan epätasaiselta pinnaltaan. Epätasaisen pinnan vuoksi pinnoitetta ei välttämättä pääse kaikkialle, mutta samaan aikaan sitä pääsee osittain tarttumaan paremmin pintaan.

Kulutuskokeet suoritettiin pinnoitetuille ja pinnoittamattomille LAM- ja koneistetuille kappaleille. Pinnoitettujen koneistettujen kappaleiden suhteelliset kitkavoimat ja –kertoimet nousivat odotetusti, mutta pinnoitettujen LAM-kappaleiden kulutuskestävyys laski. Aiemmissa Savonian pinnoituslaboratoriossa tehdyissä tutkimuksissa nikkelikromipinnoiteen on todettu parantavan koneistettujen kappaleiden kulutuskestävyyttä.

Tulevissa tutkimuksissa LAM-kappaleiden pinnan voisi hioa tasaiseksi. Kappaleet voisi myös valmistaa materiaalista, joka altistuu korroosiolle, ja tutkia mitä tapahtuu, kun sekä pinnoite että perusmateriaali reagoivat ympäristön kanssa. Yksi tutkimuskohde voisi olla kovuuden mittaaminen, jota ei voitu suorittaa käytettävissä oleilla laitteilla.

LÄHTEET

FERBER, D. 2014. An essential step toward printing living tissues. [Viitattu 30-8-2014] Saatavissa: <http://wys.harvard.edu/viewpressrelease/141>

GROSS, D. 2013. Texas company makes metal gun with 3-D printer. [Viitattu 2014-30-8.] Saatavissa: <http://edition.cnn.com/2013/11/08/tech/innovation/3d-printed-metal-gun/index.html>

HAMILTON PRECISION METALS, SS316L –datasheet [Viitattu 1.10.2014] Saatavissa: www.hpmetals.com/download/SS-316L.pdf

KINNUNEN, V. 2013. Fosforipitoisuuden sekä piikarbidin vaikutus kemiallisen nikkelin ominaisuuksiin. Savonia-ammattikorkeakoulu. Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö [Viitattu 2014-30-8] Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201305066409>

KYRÖLÄINEN, A. ja LUKKARI, J. 1999. Ruostumattomat teräkset ja niiden hitsaus. MET-Kustannus Oy.

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO. 2014. Ainetta lisäävän valmistuksen perusteet. Oppimateriaali. Lappeenranta: Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto

MANSIKKA-AHO, P. 2014. Materiaalia lisäävä valmistus. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. [Viitattu 2014-30-8] Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201405229422>

MATTILA, R. 2010. Metallin esikäsittelymenetelmien korroosionkestävyytutkimus. Vaasan Ammattikorkeakoulu. Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö [Viitattu 2014-30-8] Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201001181360>

MUURINEN, K. 2013. 3D-tulostaminen – digitaalisesta mallista esineeksi. Haaga-Helia Ammattikorkeakoulu. Tietojenkäsittelyn koulutusohjelma. Opinnäytetyö [Viitattu 2014-25-9] Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2013060512986>

NASA 2014-23-5. 3D Printing: Food in space. [Viitattu 2014-30-8] Saatavissa: http://www.nasa.gov/directorates/spacetech/home/feature_3d_food_prt.htm

SAVONIA-AMMATTIKORKEAKOULU. 2012. Elektrolyyttinen pinnoitus. Materiaaliopin laboratoriotyöohje. Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulu

SUOMEN GALVANOTEKNINEN YHDISTYS. 2003. Kemiallinen ja sähkökemiallinen pintakäsittely osa 1. Helsinki: Suomen Galvanotekninen yhdistys

SUOMEN GALVANOTEKNINEN YHDISTYS. 2003. Kemiallinen ja sähkökemiallinen pintakäsittely osa 2. Helsinki: Suomen Galvanotekninen yhdistys

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO. 2005. Korroosio. Oppimateriaali.[Viitattu 2014-30-8]

Saatavissa: http://www.ims.tut.fi/vmv/2005/vmv_2_1_6.php